



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 27

Vol. 27

№ 1

No. 1

январь – февраль

January – February

2022

Дорогие читатели!

Сердечно поздравляю вас с наступившим Новым годом! Желаю крепкого здоровья, бодрости духа и новых творческих достижений.

2021 год оказался трудным. Мы были вынуждены соблюдать самоизоляцию, ограничивать личное общение, но даже в этих непростых условиях у нас получилось достичь хороших результатов.

Журнал «Известия вузов. Электроника» выходил в срок, четко по графику, несмотря на длительный период удаленной работы. Это стало возможным благодаря слаженному труду наших экспертов, членов редколлегии и сотрудников редакции. Материалы журнала продолжали публиковаться в дополнительных номерах англоязычных изданий Semiconductors и Russian Microelectronics. Также мы оцифровали и разместили в открытом доступе значительную часть архива «Известий вузов. Электроника». Эта работа продолжится и в наступившем году.

На сегодняшний день перед нами стоит амбициозная цель – реализовать новую стратегию развития журнала «Известия вузов. Электроника» для поэтапной интеграции в международное академическое сообщество. Уверен, что обладая знаниями и имея стремления, наш коллектив обязательно добьется лучших результатов, шагая в ногу со временем и оставаясь на передовой российской науки!

Главный редактор
академик РАН



Ю. А. Чаплыгин



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



Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА

Том 27, № 1, 2022
январь – февраль

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

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

Главный редактор: *Чаплыгин Юрий Александрович* – академик РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X

Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878

Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136

Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4935-7292

Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482

Газарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Горбачевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X

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)

Лабунев 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 «Синописис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860

Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросяниц 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 техно-
логический 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
Тимошенко Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-5411-1804
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания),
ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией *И. М. Доронина*
Редактор *А. В. Тихонова*
Корректор *И. В. Проскуракова*
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 15.02.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 17,67 усл.печ.л., 16,184 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 3. 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 соиска-
ние ученой степени доктора наук по следующим группам специальностей:

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

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

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

Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934
Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы»
ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

- Лавров И. В., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Бардушкин А. В.* Моделирование диэлектрических характеристик синтактных материалов 7
- Куксин А. В., Глухова О. Е., Герасименко А. Ю.* Электропроводящие каркасные материалы из углеродных нанотрубок 19

Технологические процессы и маршруты

- Вертянов Д. В., Беляков И. А., Погудкин А. В., Тимошенко С. П., Сидоренко В. Н.* Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках..... 28
- Радзиевская Т. А., Иванов Н. Н., Тарасов С. А.* Отсекающий УФ-светофильтр для предотвращения отрицательного наклона стенок мастер-штампа мягкой литографии 41

Элементы интегральной электроники

- Залесский В. Б., Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Цымбал В. С.* Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя..... 50

Микро- и наносистемная техника

- Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калугин В. В., Зарянкин Н. М., Тимошенко А. С., Дернов И. С.* Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра..... 59
- Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б. М., Тимошенко С. П.* Исследование функционирования чувствительного элемента микромеханического акселерометра сэндвич-конструкции емкостного типа в условиях паразитных воздействий по нерабочим осям и случайной вибрации 68
- Соколов Н. А., Баяндин А. И.* Феррозондовые преобразователи слабого магнитного поля на основе стержневых сердечников из аморфных сплавов 80

Биомедицинская электроника

- Рубцова Е. Н.* Персонализированная математическая модель сердечно-сосудистой системы с механизмом барорефлекса 89

Информационно-коммуникационные технологии

- Парфирьев А. В., Парфирьева О. В., Душкин А. В.* Оптимизация алгоритма анализа и обработки информации в оптико-электронной системе..... 106
- Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Ломакин А. А.* Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов 120
- К 90-летию со дня рождения Вернера Виталия Дмитриевича 150

Конференции

- 29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022»..... 4-я стр. обложки
- К сведению авторов 151



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 27, No. 1, 2022
January – February

The scientific 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

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

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

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482

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. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC “NIIME” (Moscow, Russia)

Vladimir A. Labunov – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881

Ivan A. Maksimov – PhD, Prof., Lund University (Sweden), ORCID: 0000-0003-1944-4878

Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company “Synopsys Armenia” (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377

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

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

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

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

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

Signed to print 15.02.2022. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 17,67. Number of copies 150. Order no. 3. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

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

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

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

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

Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue "Russian Press" LLC "Agency "Book a Service" – 38934
The subscription index in catalogue "Periodicals. Newspapers and magazines"
LLC "Ural-Press Okrug" – 47570

CONTENTS

Electronics materials

- Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Yakovlev V. B., Bardushkin A. V.* Simulation of dielectric characteristics of syntactic materials 7
- Kuksin A. V., Glukhova O. E., Gerasimenko A. Yu.* Electrically conductive carbon nanotube framework materials 19

Technological processes and routes

- Vertyanov D. V., Belyakov I. A., Pogudkin A. V., Timoshenkov S. P., Sidorenko V. N.* Investigation of the influence of mechanical and thermal effects on the level of stresses and deformations in three-dimensional microassemblies sealed with two types of compounds 28
- Radzievskaya T. A., Ivanov N. N., Tarasov S. A.* Cut-off UV light filter to prevent negative slope of the soft lithography hard mold walls 41

Integrated electronics elements

- Zalessky V. B., Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Tsymbal V. S.* Investigation of the optical communication channel throughput with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier 50

Micro- and nanosystem technology

- Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalugin V. V., Zaryankin N. M., Timoshenkov A. S., Dernov I. S.* Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer 59
- Ye Ko Ko Aung, Simonov B. M., Timoshenkov S. P.* Study of the functioning of the sensitive element of a micromechanical capacitive accelerometer with a sandwich structure under the conditions of parasitic influences along non-working axes and random vibration..... 68
- Sokolov N. A., Bayandin A. I.* Ferroprobe converters of a weak magnetic field based on rod cores made of amorphous alloys..... 80

Biomedical electronics

- Rubtsova E. N.* The personalized mathematical model of the cardiovascular system with baroreflex... 89

Information-communication technologies

- Parfiryev A. V., Parfiryeva O. V., Dushkin A. V.* Optimization of the algorithm of information analysis and processing in the optoelectronic system 106
- Pantekov D. G., Gusakov N. V., Lomakin A. A.* Review of the current state of the orbital groups of remote sensing spacecraft and information relay spacecraft 120
- To the 90th anniversary of the birth of Verner Vitaly Dmitrievich..... 150

Conferences

- 29th All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students "Microelectronics and Informatics – 2022" 4 cover page
- Instructions for authors 151

Научная статья

УДК [621.315.5:537.311/.312]:001.891.57

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-7-18

Моделирование диэлектрических характеристик синтактных материалов

И. В. Лавров¹, В. В. Бардушкин¹, В. Б. Яковлев^{1,2}, А. В. Бардушкин^{1,3}

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

²*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской
академии наук, г. Москва, Россия*

³*ООО «Альфачип», г. Москва, Россия*

iglavr@mail.ru

Аннотация. Синтактные материалы (сферопластики), в силу структурных особенностей характеризующиеся низкой плотностью, в зависимости от материала стенок микросфер могут иметь достаточно высокую прочность и низкую теплопроводность, что делает их перспективными для использования в качестве теплоизоляционных материалов. Подбором материала стенок микросфер и концентрации компонентов сферопластиков можно существенно изменять их диэлектрические характеристики. В работе рассмотрена задача моделирования эффективных диэлектрических характеристик синтактного материала с полимерным связующим и наполнителем в виде полых стеклянных микросфер с учетом наличия в материале технологических примесей. Предложена модель для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости образца синтактного материала, основанная на модели матричного композита с несколькими видами неоднородных или однородных включений. Для вычисления применяется обобщенное приближение эффективного поля для неоднородной среды с включениями с оболочкой. Проведены модельные расчеты для синтактической пены с кремнийорганическим связующим полидиметилсилоксаном и полыми микросферами с оболочкой из Е-стекла при наличии в материале некоторого количества влаги. Получены частотные диэлектрические характеристики данного материала в диапазоне 10^2 – 10^{10} Гц. Показано, что увеличение объемной доли полых микросфер приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Также показано, что расчетные значения находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными, полученными при частоте электромагнитного поля 9,8 ГГц.

Ключевые слова: эффективная диэлектрическая проницаемость, синтактный материал, матричный композит, включение, обобщенное приближение эффективно-го поля, обобщенное приближение Максвелла Гарнетта

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-08-00155-а).

Для цитирования: Лавров И. В., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б., Бардушкин А. В. Моделирование диэлектрических характеристик синтактных материалов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 7–18. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-7-18>

Original article

Simulation of dielectric characteristics of syntactic materials

I. V. Lavrov¹, V. V. Bardushkin¹, V. B. Yakovlev^{1,2}, A. V. Bardushkin^{1,3}

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³LLC “AlphaCHIP”, Moscow, Russia

iglavr@mail.ru

Abstract. Syntactic materials (spheroplastics) having low density due to structural features, depending on the material of the microsphere walls can have a sufficiently high strength and low thermal conductivity, which makes them promising for use as heat insulation materials. By selecting the material of the microsphere walls and the concentration of the components of the spheroplastics, their dielectric characteristics can be significantly changed. In this work, the task of modeling the effective dielectric characteristics of a syntactic material with a polymer binder and filler in the form of hollow glass microspheres is considered, taking into account the presence of technological impurities in the material. A model for calculating the effective permittivity of a sample of a syntactic material was proposed, based on a model of a matrix composite with several types of inhomogeneous or homogeneous inclusions. To calculate, a generalized effective-field approximation for a heterogeneous medium with coated inclusions was used. Model calculations were carried out for syntactic foam with an organosilicon binder polydimethylsiloxane and hollow microspheres with E-glass shell with some moisture presence in the material. Frequency dielectric characteristics of this material were obtained in the range of 10^2 – 10^{10} Hz. It has been shown that an increase in the volume fraction of hollow microspheres leads to a decrease in the dielectric constant and the tangent of the dielectric loss angle. It has also been shown that the calculated values are in satisfactory accordance with the experimental data obtained at an electromagnetic field frequency of 9.8 GHz.

Keywords: effective permittivity, syntactic material, matrix composite, inclusion, generalized effective-field approximation, generalized Maxwell Garnett approximation

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 20-08-00155-a).

For citation: Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Yakovlev V. B., Bardushkin A. V. Simulation of dielectric characteristics of syntactic materials. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 7–18. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-7-18>

Введение. Синтактные материалы, или сферопластики, – композиционные материалы, состоящие из полимерного связующего и полых включений (наполнителя), форма которых обычно близка к сферической. Такие включения называют микросферами, их размер варьируется от 1 до 500 мкм, также используются микросферы большего размера – от 10 до 40 мм. Стенки микросфер могут быть полимерными, стеклянными, углеродными, керамическими, металлическими [1]. В качестве связующего (матрицы) в сферопластиках применяют терморезактивные эпоксидные и полиэфирные смолы, а также кремнийорганические полимерные материалы [2, 3]. В силу структурных особенностей синтактные материалы характеризуются низкой плотностью. При этом в зависимости от материала стенок микросфер синтактные материалы могут иметь достаточно высокую прочность и низкую теплопроводность, что делает их перспективными для использования в качестве теплоизоляционных материалов [4, 5]. Подбирая материал стенок микросфер, можно добиться желаемых диэлектрических характеристик сферопластика: высокой радиопрозрачности [2, 3, 6] или, наоборот, высокой поглощающей способности в определенном диапазоне волн [7] для применения в устройствах специального назначения.

При изготовлении синтактных материалов образуется некоторое количество примесей в материале, например влаги, что приводит к ухудшению диэлектрических характеристик материала, увеличению рассеяния энергии и уменьшению радиопрозрачности. Для уменьшения содержания воды в материале используют гидрофобизирующие добавки [2].

В настоящей работе на основе обобщенного приближения эффективного поля [8] моделируются частотные диэлектрические характеристики синтактного материала в диапазоне 10^2 – 10^{10} Гц. В качестве синтактного материала рассматривается синтактическая пена с кремнийорганическим связующим – полидиметилсилоксаном (ПДМС) [2] – и наполнителем в виде полых микросфер из алюмоборосиликатного стекла марки Е. Учитывается также наличие некоторого количества воды в материале. Проводятся вычисления действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости, а также тангенса угла диэлектрических потерь материала в зависимости от частоты электромагнитного поля при различных объемных долях микросфер в материале.

Постановка задачи и ее решение в обобщенном приближении эффективного поля. Рассмотрим образец статистически однородного композита объемом V , к границе S которого приложено однородное электрическое поле напряженностью \mathbf{E}_0 . Композит имеет матричную структуру, т. е. состоит из однородной диэлектрической матрицы, в которую погружены включения нескольких видов, причем включения могут быть как однородными, так и неоднородными, состоящими из однородного ядра и однородной оболочки. Диэлектрические проницаемости матрицы, ядра и оболочки включений считаются известными скалярными величинами. Тензор $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ эффективной диэлектрической проницаемости данного образца – это оператор, который связывает средние по объему образца векторы электрической индукции и напряженности электрического поля: $\langle \mathbf{D} \rangle = \boldsymbol{\varepsilon}^* \langle \mathbf{E} \rangle$.

Запишем выражение для $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ в обобщенном приближении эффективного поля (ОПЭП) для композитов с неоднородными включениями [8]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \langle \langle (1-\nu)\boldsymbol{\varepsilon}_1\boldsymbol{\lambda}_{12} + \nu\boldsymbol{\varepsilon}_2 \rangle \rangle \langle \langle (1-\nu)\boldsymbol{\lambda}_{12} + \nu\mathbf{I} \rangle \rangle^{-1}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор 2-го ранга; $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ и $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ – тензоры диэлектрической проницаемости оболочек и ядер включений соответственно; ν – относительная объемная доля ядра во включении (матрицу также можно считать состоящей из отдельных однородных включений); $\boldsymbol{\lambda}_{12}$ и $\boldsymbol{\lambda}_{20}$ – тензоры, относящиеся к конкретному включению. Угловые скобки обозначают усреднение по всем включениям образца, в том числе включениям, составляющим матрицу.

Тензор $\boldsymbol{\lambda}_{12}$ связывает средние значения напряженностей электрического поля \mathbf{E}_1 в оболочке и \mathbf{E}_2 в ядре, т. е. для k -го включения он определяется формулой

$$\langle \mathbf{E} \rangle_{1k} = \boldsymbol{\lambda}_{12,k} \langle \mathbf{E} \rangle_{2k}.$$

Тензор $\boldsymbol{\lambda}_{20}$ связывает среднюю напряженность поля в ядре включения со средней напряженностью эффективного поля в этом же включении [8]:

$$\boldsymbol{\lambda}_{20} = \left[(1-\nu)(\mathbf{I} - \mathbf{g}_1(\boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}^c))\boldsymbol{\lambda}_{12} + \nu(\mathbf{I} - \mathbf{g}_1(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \boldsymbol{\varepsilon}^c)) \right]^{-1}. \quad (2)$$

Здесь $\boldsymbol{\varepsilon}^c$ – тензор диэлектрической проницаемости тела сравнения [8, 9]; \mathbf{g}_1 – тензор, связанный с конкретным включением, выражения для компонент которого в случае скалярной диэлектрической проницаемости тела сравнения, т. е. при $\boldsymbol{\varepsilon}^c = \varepsilon^c \mathbf{I}$, имеет вид [10]

$$g_{1,jj} = -\frac{L_j}{\varepsilon^c}, \quad j = 1, 2, 3; \quad g_{1,ij} = 0, \quad i \neq j, \quad (3)$$

где L_j – главные компоненты тензора \mathbf{L} геометрических факторов включения в вакууме [11].

Модельные расчетные выражения для частотных диэлектрических характеристик синтактической пены с учетом технологических примесей. В качестве модели синтактической пены с полыми стеклянными микросферами выбран матричный композит с десятью видами включений. Включения 1-го, основного, вида – полые микросферы, представляющие собой стеклянную сферическую оболочку, внутри которой находится газ. Объемную долю газа в микросфере обозначим ν_1 . Включения остальных девяти видов моделируют наличие примесей (воды и газа), возникающих в процессе производства синтактической пены. Включения 2-го вида – сферические пузырьки газа, окруженные пленкой воды, с объемной долей газа ν_2 . Включения 3-го вида – сферические сплошные капельки воды, 4-го вида – пузырьки газа сферической формы. Включения с 5-го по 7-й вид представляют собой воду в форме сжатых сфероидов с большим аспектным соотношением, которые моделируют несплошные водные пленки на поверхностях стеклянных микросфер, а также пленки в порах связующего. Эти включения имеют фиксированные ориентации, которые взаимно перпендикулярны. Включения с 8-го по 10-й вид представляют собой газ в форме сжатых сфероидов с большим аспектным соотношением, которые моделируют поры внутри связующего, заполнен-

ные газом. Так же как и включения с 5-го по 7-й вид, последние три вида включений имеют фиксированные ориентации, которые взаимно перпендикулярны.

Таким образом, включения 1-го и 2-го видов неоднородные, а остальные восемь однородные и могут быть описаны в рамках общей схемы для включений с оболочкой разными способами. Например, можно считать, что в однородном включении i -го вида отсутствует оболочка ($v_i = 1$) либо ядро ($v_i = 0$) или материальные характеристики ядра и оболочки совпадают ($\epsilon_1 = \epsilon_2$). При этом в двух последних случаях следует также положить, что тензор $\lambda_{12} = \mathbf{I}$ для данного вида включений.

Для включений 1-го и 2-го видов, поскольку они сферические с оболочкой, тензоры λ_{12} и λ_{20} рассчитываются как [8]

$$\begin{aligned} \lambda_{12}^{(i)} &= (3\epsilon_1^{(i)})^{-1}(2\epsilon_1^{(i)} + \epsilon_2^{(i)})\mathbf{I}, \quad i=1,2, \\ \lambda_{20}^{(i)} &= 9\epsilon^c \epsilon_1^{(i)} \left[(2\epsilon^c + \epsilon_1^{(i)})(2\epsilon_1^{(i)} + \epsilon_2^{(i)}) + 2v_i(\epsilon_1^{(i)} - \epsilon^c)(\epsilon_2^{(i)} - \epsilon_1^{(i)}) \right]^{-1} \mathbf{I}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\epsilon_1^{(i)}$ и $\epsilon_2^{(i)}$ – диэлектрические проницаемости оболочки и ядра включений i -го вида.

Для включений с 3-го по 10-й вид, полагая $v_i = 1$, $i = 3, \dots, 10$, с учетом (2), (3) получим

$$\lambda_{12}^{(i)} = \mathbf{I}, \quad \lambda_{20}^{(i)} = \left[\mathbf{I} + (\epsilon^c)^{-1} \mathbf{L}(\epsilon^{(i)} - \epsilon^c) \right]^{-1}, \quad i = 3, \dots, 10. \quad (5)$$

Здесь $\epsilon^{(i)}$ – диэлектрическая проницаемость включений i -го вида.

Для тензоров $\lambda_{12}^{(m)}$ и $\lambda_{20}^{(m)}$ сферических включений матрицы имеем [8]

$$\lambda_{12}^{(m)} = \mathbf{I}, \quad \lambda_{20}^{(m)} = 3\epsilon^c (2\epsilon^c + \epsilon^{(m)})^{-1} \mathbf{I}, \quad (6)$$

где $\epsilon^{(m)}$ – диэлектрическая проницаемость матрицы.

В данной модели сферопластика предполагается, что включения каждого из видов имеют фиксированную форму. Тогда, ввиду того что ориентации всех видов включений также фиксированы, усреднение в (1) сводится к усреднению по объему с учетом объемных долей включений:

$$\begin{aligned} \epsilon^* &= \left(f_m \epsilon^{(m)} \lambda_{20}^{(m)} + \sum_{i=1}^{10} f_i ((1 - v_i) \epsilon_1^{(i)} \lambda_{12}^{(i)} + v_i \epsilon_2^{(i)} \mathbf{I}) \lambda_{20}^{(i)} \right) \times \\ &\times \left(f_m \lambda_{20}^{(m)} + \sum_{i=1}^{10} f_i ((1 - v_i) \lambda_{12}^{(i)} + v_i \mathbf{I}) \lambda_{20}^{(i)} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где f_m – объемная доля матрицы; f_i , $i = 1, \dots, 10$, – объемные доли видов включений, причем $f_m + \sum_{i=1}^{10} f_i = 1$; λ_{12} и λ_{20} – тензоры соответствующих видов включений, которые вычисляются по выражениям (4), (5) или (6).

Результаты модельных расчетов. На основе выражения (7) в частотном диапазоне 10^2 – 10^{10} Гц проведены расчеты эффективных диэлектрических характеристик синтактической пены с ПДМС ($\text{Re} \epsilon^{(m)} \approx 3,0$; $\text{tg} \delta^{(m)} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ на частоте 10 ГГц [12]) и микросферами с оболочкой из алюмоборосиликатного стекла марки Е, заполненными газом ($\epsilon_1^{(1)} \approx 6,1$; $\text{tg} \delta_1^{(1)} \approx 5 \cdot 10^{-3}$; $\epsilon_2^{(1)} \approx 1$ [12]). Объемная доля полости в микросферах

$v_1 \approx 0,8$, что соответствует отношению внутреннего и внешнего радиусов оболочки включения $r_1/R_1 \approx 0,93$. Вычисления проводили при различных фиксированных объемных долях связующего в материале f_m .

При составлении модели предполагали, что объемные доли f_i видов включений, составляющих примеси, зависят как от содержания микросфер в материале, так и от объемной доли связующего. Это основано на сопоставлении результатов измерений диэлектрических характеристик материала, представленных в [2]. Так, например, при полном отсутствии микросфер в материале тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 9,8 ГГц равен 0,042, в то время как по справочным данным его значение для кремнийорганического связующего должно быть примерно на порядок меньше. В данном случае это может быть свидетельством наличия в связующем примесей, рассеивающих электромагнитную энергию, прежде всего воды, проникшей в материал сквозь поры. Зависимость объемных долей включений, представляющих собой примеси, имеет вид

$$f_i = f_m \alpha_i + f_1 \beta_i, \quad i = 2, \dots, 10, \quad (8)$$

где f_1 – объемная доля микросфер в материале; α_i, β_i – коэффициенты, значения которых приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения коэффициентов α_1 и β_1 для включений всех видов

Table 1

Values of coefficients α_1 and β_1 for inclusions of all types

Коэффициент	Вид включения				
	2-й	3-й	4-й	с 5-го по 7-й	с 8-го по 10-й
α_i	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
β_i	10^{-4}	10^{-4}	0,01	10^{-3}	0

Объемная доля газа во включениях 2-го вида принималась равной 0,95, что соответствует отношению внутреннего и внешнего радиусов водной оболочки включения $r_2/R_2 \approx 0,98$. Отношение полуосей включений с 5-го по 7-й вид, а также с 8-го по 10-й вид принималось равным 200 : 200 : 1. Объемные доли включений этих видов равны между собой, поэтому материал получается макроскопически изотропным со скалярной эффективной диэлектрической проницаемостью.

Полные объемные доли включений всех видов при различных объемных долях связующего, вычисленные по формуле (8) при значениях коэффициентов α_i, β_i из табл.1, приведены в табл.2.

В данной модели ПДМС при отсутствии микросфер содержит 2,78 % примесей по объему, в том числе воды примерно 0,7 %, в основном в виде пленок, моделируемых дискообразными сфероидами. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости воды во включениях соответствующих видов принималась в форме [13]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 - i\omega\tau} + i \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (9)$$

где ε_s и σ – соответственно статическая диэлектрическая проницаемость и проводимость воды; ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; τ – время ориентационной

Таблица 2

Объемные доли включений всех видов при различных
объемных долях связующего

Table 2

Volume fractions of inclusions of all types with different
volume fractions of the binder

f_m	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5-f_7	f_8-f_{10}
0,9722	0	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$5,83 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$4,86 \cdot 10^{-3}$
0,9	0,07329	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$4,50 \cdot 10^{-3}$
0,7	0,2733	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$6,96 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$
0,5	0,4794	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$7,79 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$
0,3	0,6824	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$8,62 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$

релаксации в дебаевской релаксационной модели. В данном случае принимались следующие значения параметров: $\varepsilon_s = 77,5$; $\varepsilon_\infty = 5,5$; $\tau = 9,55 \cdot 10^{-12}$ с [14], $\sigma \approx 10^{-4}$ (Ом·м)⁻¹.

При расчетах по формулам (4)–(7) принималось, что $\varepsilon^c = \varepsilon^{(m)}$. Это соответствует обобщенному приближению Максвелла Гарнетта [15] как частному случаю ОПЭП. Некоторые результаты модельных расчетов приведены на рис. 1 и 2. Видно, что с уменьшением доли ПДМС, т. е. с увеличением доли микросфер в материале, значения действительной части эффективной диэлектрической проницаемости $\text{Re} \varepsilon^*$ (см. рис. 1) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta^*$ (см. рис. 2) уменьшаются во всем частотном диапазоне 10^2 – 10^{10} Гц. Это приводит к повышению радиопрозрачности материала в данном диапазоне.

Согласно модельным расчетам в частотном диапазоне $2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^4$ Гц наблюдается диэлектрическая релаксация синтактного материала, обусловленная наличием проводимости у включений, содержащих воду (рис. 1, б). При этом $\text{tg} \delta^*$ материала имеет максимум на частоте $\approx 3 \cdot 10^3$ Гц, значение которого варьируется от 0,27 при объемной доле микросфер $\approx 0,68$ до 0,37 при отсутствии микросфер.

В диапазоне $3 \cdot 10^5$ – 10^9 Гц значение $\text{tg} \delta^*$ не превышает 0,01 (не приведено на рисунках). На частотах более 2 ГГц наблюдается увеличение $\text{tg} \delta^*$ вследствие диэлектрической релаксации дебаевского типа, связанной с изменением ориентации молекул воды в высокочастотном электромагнитном поле (рис. 2, а). При этом происходит снижение $\text{Re} \varepsilon^*$ (рис. 1, а). Также на рис. 1, а и 2, а отмечены экспериментальные значения $\text{Re} \varepsilon^*$ и $\text{tg} \delta^*$ соответственно на частоте 9,8 ГГц. Видно, что модельные расчетные значения находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными. Следует отметить, что абсолютная величина погрешности возрастает при уменьшении объемной доли связующего, т. е. при увеличении полной объемной доли включений.

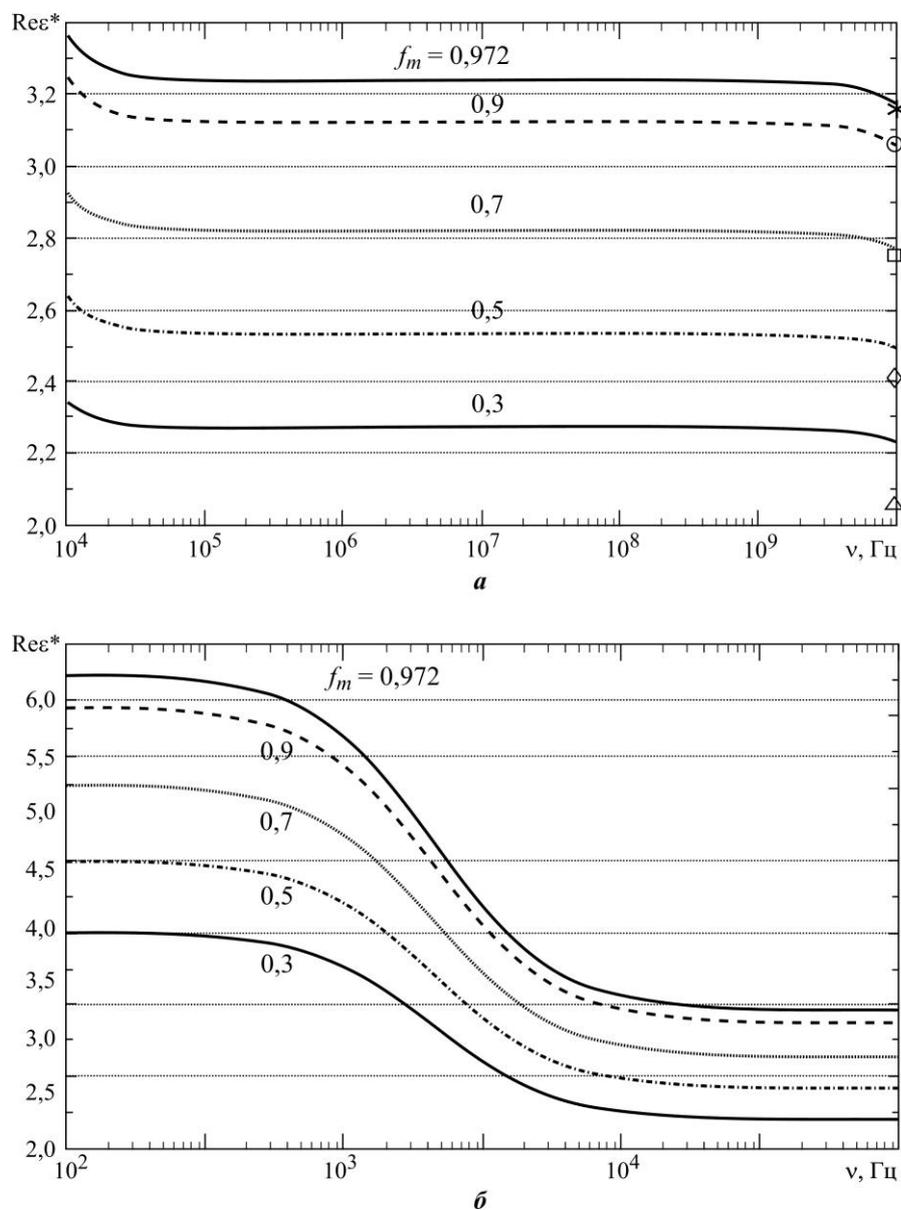


Рис. 1. Частотные зависимости действительной части эффективной диэлектрической проницаемости синтактической пены на основе связующего ПДМС и наполнителя в виде стеклянных микросфер при различных объемных долях связующего в диапазонах частот 10^4 – 10^{10} Гц (а) и 10^2 – 10^5 Гц (б) (*, \circ , \square , \diamond , Δ – экспериментальные значения при 9,8 ГГц [2])

Fig. 1. Frequency dependencies of the real part of the effective dielectric constant of the syntactic foam based on the organosilicon binder PDMS and filler in the form of glass microspheres at various volume fractions of the binder in the ranges of 10^4 – 10^{10} Hz (a) and 10^2 – 10^5 Hz (b) (*, \circ , \square , \diamond , Δ – the experimental values at 9.8 GHz [2])

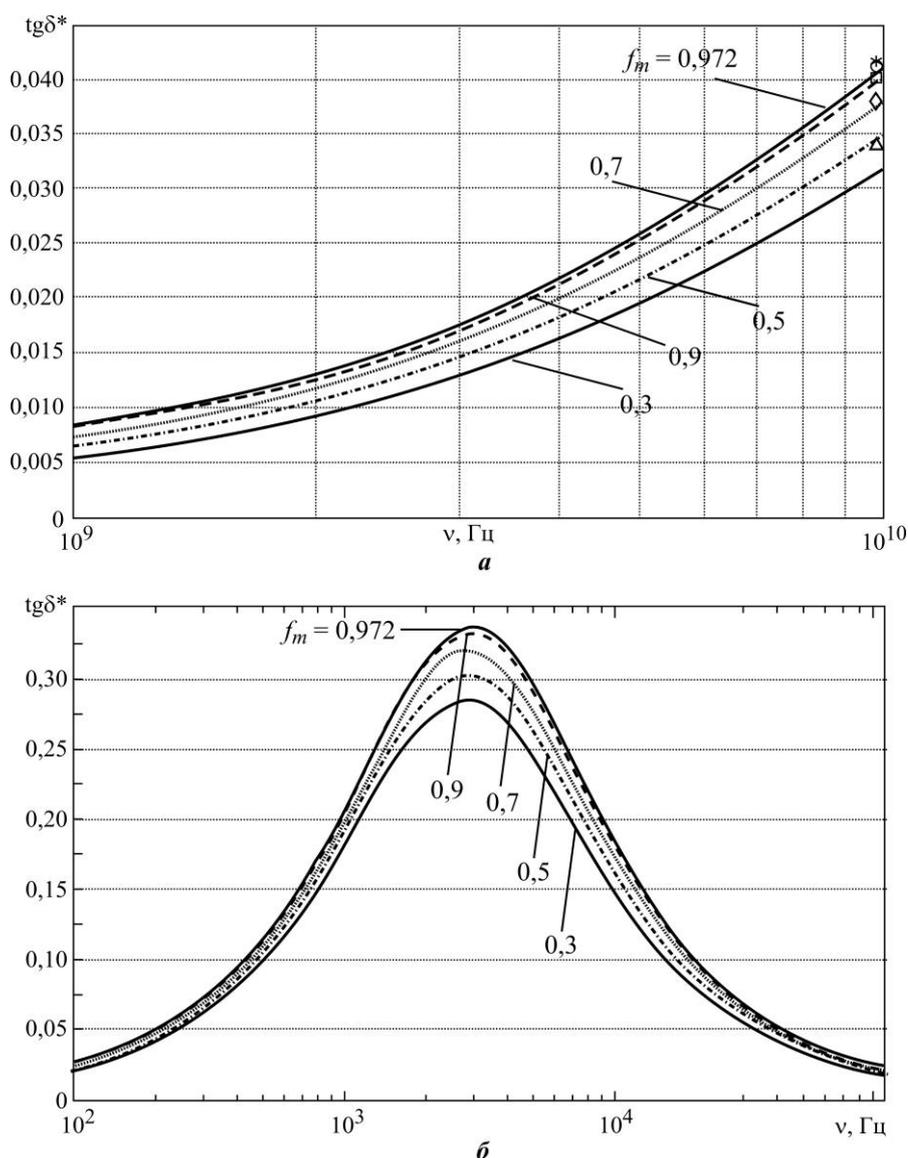


Рис. 2. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь синтактической пены на основе связующего ПДМС и наполнителя в виде стеклянных микросфер при различных объемных долях связующего в диапазонах частот 10^9 – 10^{10} Гц (а) и 10^2 – 10^5 Гц (б) (*, o, □, ◇, Δ – экспериментальные значения при 9,8 ГГц [2])

Fig. 2. Frequency dependencies of the real part of the tangent of the dielectric loss angle of the syntactic foam based on the organosilicon binder PDMS and filler in the form of glass microspheres at various volume fractions of the binder in the ranges of 10^9 – 10^{10} Hz (a) and 10^2 – 10^5 Hz (b) (*, o, □, ◇, Δ – the experimental values at 9.8 GHz [2])

Заключение. С помощью предложенного метода моделирования диэлектрических характеристик синтактного материала, основанного на ОПЭП, получены модельные расчетные выражения (4)–(7). На основе данных выражений проведены модельные расчеты частотных диэлектрических характеристик синтактической пены с ПДМС и полыми стеклянными микросферами. Расчеты показали удовлетворительное соответствие полученных результатов экспериментальным. Полученные экспериментально высокие значения тангенса диэлектрических потерь связующего, а также синтактической пены на его основе могут быть объяснены наличием воды в виде тонких пленок в порах материала и на стенках микросфер.

Предложенный в настоящей работе метод прогнозирования диэлектрических характеристик синтактных материалов может быть использован при проектировании и создании новых сферопластиков с учетом качественного и количественного состава и структуры их компонентов.

Литература

1. **Чухланов В. Ю., Панов Ю. Т., Синявин А. В., Ермолаева Е. В.** Газонаполненные пластмассы. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 152 с.
2. **Чухланов В. Ю., Селиванов О. Г.** Исследование диэлектрических свойств синтактических пен на основе кремнийорганического связующего // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8-1. С. 26–29.
3. **Михайлов В. А.** Синтактные материалы с высокими диэлектрическими свойствами на основе кремнийорганического полимера // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 47–50.
4. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Оценки диэлектрической проницаемости сферопластика // Радиооптика. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 3. С. 29–46. doi: <https://doi.org/10.7463/rdopt.0316.0846170>
5. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения / **Т. В. Яковенко, Г. К. Яруллина, И. В. Гарустович и др.** // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 8 (177). С. 71–73.
6. **Трофимов А. Н.** Высокотехнологичные эпоксидные связующие, полимерные композиты и инновационные технологии получения радиопрозрачных изделий специального назначения из конструкционных стеклопластиков: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 305 с.
7. **Bowler N.** Designing dielectric loss at microwave frequencies using multi-layered filler particles in a composite // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2006. Vol. 13. No. 4. P. 703–711. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1667727>
8. Обобщенное приближение эффективного поля для неоднородной среды с включениями в оболочке / **В. И. Колесников, В. В. Бардушкин, И. В. Лавров и др.** // Докл. Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 280–284. doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565217270081>
9. **Фокин А. Г.** О границах для эффективной диэлектрической проницаемости неоднородных материалов // ЖТФ. 1973. Т. 43. № 1. С. 71–77.
10. О вычислении эффективной теплопроводности текстурированных матричных композитов с высокой объемной долей включений / **И. В. Лавров, В. В. Бардушкин, А. П. Сычев и др.** // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2018. Т. 15. № 3. С. 92–101. doi: <https://doi.org/10.31429/vestnik-15-3-92-101>
11. **Борен К., Хафмен Д.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
12. Физика композиционных материалов: в 2 т. / **Н. Н. Трофимова, М. З. Канович, Э. М. Карташов и др.; под ред. Н. Н. Трофимова.** Т. 2. М.: Мир, 2005. 344 с.
13. **Путинцев Н. М., Путинцев Д. Н.** Классическая теория поляризации молекулярных систем. М.: Физматлит, 2011. 176 с.
14. **Эйзенберг Д., Кауцман В.** Структура и свойства воды / пер. с англ. А. К. Шемелина. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
15. Обобщенное приближение Максвелла Гарнетта для текстурированных матричных композитов с включениями в оболочке / **В. И. Колесников, И. В. Лавров, В. В. Бардушкин и др.** // Докл. Российской академии наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 498. № 1. С. 11–16. doi: <https://doi.org/10.31857/S268674002103010X>

Статья поступила в редакцию 30.06.2021 г.; одобрена после рецензирования 30.06.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Лавров Игорь Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), iglavr@mail.ru

Бардушкин Владимир Валентинович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), bardushkin@mail.ru

Яковлев Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, профессор Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), главный научный сотрудник, начальник отдела Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а/11), yakvb@mail.ru

Бардушкин Андрей Владимирович – инженер-электроник Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Альфа-чип» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1/8), i170k@yandex.ru

References

1. Chukhlanov V. Yu., Panov Yu. T., Sinyavin A. V., Yermolayeva E. V. *Gas-filled plastics*. Vladimir, Vladimir State University, 2008. 152 p. (In Russian).
2. Chukhlanov V. Yu., Selivanov O. G. The dielectric properties of syntactic foams based on silicon binder. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, no. 8-1, pp. 26–29. (In Russian).
3. Mikhailov V. A. Syntactic materials with high dielectric properties based on silicon polymer. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, 2015, no. 12, pp. 47–50. (In Russian).
4. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savel'eva I. Yu. The spheroplastic permittivity estimates. *Radiooptika, MGTU im. N. E. Baumana = Radiooptics of the Bauman MSTU*, 2016, no. 3, pp. 29–46. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.7463/rdopt.0316.0846170>
5. Yakovenko T. V., Yarullina G. K., Garustovich I. V., Shishilov O. N., Melnikov N. O. Spheroplastics as thermal insulating protective materials for industrial applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2016, vol. 30, no. 8 (177), pp. 71–73. (In Russian).
6. Trofimov A. N. *High-tech epoxy binders, polymer composites and innovative technologies to produce special-purpose radio-transparent products from structural fiberglass*. Diss. for the Dr. Sci. (Eng.). Moscow, 2018. 305 p. (In Russian).
7. Bowler N. Designing dielectric loss at microwave frequencies using multi-layered filler particles in a composite. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2006, vol. 13, no. 4, pp. 703–711. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1667727>
8. Kolesnikov V. I., Bardushkin V. V., Lavrov I. V., Sychev A. P., Yakovlev V. B. A generalized effective-field approximation for an inhomogeneous medium with coated inclusions. *Dokl. Phys.*, 2017, vol. 62, no. 9, pp. 415–419. doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335817090087>
9. Fokin A. G. On bounds for the effective permittivity of inhomogeneous materials. *Soviet Physics: Technical Physics*, 1973, vol. 18, p. 44.
10. Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Sychev A. P., Yakovlev V. B., Kochetygov A. A. On calculation of the effective thermal conductivity of textured matrix composites with high volume fraction of inclusions. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 92–101. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31429/vestnik-15-3-92-101>
11. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. 1st ed. New York, Wiley-VCH, 1983. 544 p.
12. Trofimov N. N. (auth., ed.), Kanovich M. Z., Kartashov E. M., Natrusov V. I., Ponomarenko A. T., Shevchenko V. G., Sokolov V. I. *Physics of composite materials*. Vol. 2. Moscow, Mir Publ., 2005. 344 p. (In Russian).
13. Putintsev N. M., Putintsev D. N. *Classical polarization theory of molecular systems*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 176 p. (In Russian).
14. Eisenberg D., Kauzmann W. *The structure and properties of water*. Oxford, Oxford University Press, 1969. 296 p.

15. Kolesnikov V. I., Bardushkin V. V., Lavrov I. V., Sychev A. P., Yakovlev V. B. Generalized Maxwell Garnett approximation for textured matrix composites with coated inclusions. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki = Doklady of Russian Academy of Science. Physics, Technical Science*, 2021, vol. 498, no. 1, pp. 11–16. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31857/S268674002103010X>

The article was submitted 30.06.2021; approved after reviewing 30.06.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Igor V. Lavrov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), iglavr@mail.ru

Vladimir V. Bardushkin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bardushkin@mail.ru

Victor B. Yakovlev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a/11), yakvb@mail.ru

Andrey V. Bardushkin – Hardware Engineer of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, LLC “Alphachip” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1/8), i170k@yandex.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы»
ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство
«Книга-Сервис». 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 «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru

Электропроводящие каркасные материалы из углеродных нанотрубок

А. В. Куксин¹, О. Е. Глухова^{2,3}, А. Ю. Герасименко^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²Первый Московский государственный медицинский университет
имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия

³Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

nix007@mail.ru

Аннотация. Для создания биоинтерфейсов наиболее перспективными являются электропроводящие материалы на основе углерода и его модификаций. Такие материалы можно использовать для направленной стимуляции клеток и тканей с высоким пространственным разрешением. В работе для создания электропроводящих материалов предложено применение углеродных нанотрубок ввиду их уникальных электрических, механических и оптических характеристик. Показано, что под воздействием лазерного излучения можно достичь эффекта сваривания с образованием разветвленных сетей на кремниевой подложке и в объеме биополимерной матрицы. В результате экспериментальных исследований установлена плотность энергии излучения, равная 0,061 Дж/см², при которой появляется эффект связывания одностенных нанотрубок между собой. Определен механизм формирования пористых материалов на основе биополимеров альбумина, коллагена и хитозана, содержащих в своем составе одностенные углеродные нанотрубки. Изготовлены материалы из одностенных углеродных нанотрубок и биополимеров с контролируемым размером пор. Объем пор составил более 60 % от объема нанокомпозита. Созданные материалы могут иметь различную форму для производства независимых имплантируемых структур или покрытий для имплантируемых устройств.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, лазерное излучение, электрическая проводимость, наноэлектроника, биоэлектроника

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант 21-19-00226).

Для цитирования: Куксин А. В., Глухова О. Е., Герасименко А. Ю. Электропроводящие каркасные материалы из углеродных нанотрубок // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 19–27. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-19-27>

Electrically conductive carbon nanotube framework materials

A. V. Kuksin¹, O. E. Glukhova^{2,3}, A. Yu. Gerasimenko^{1,2}

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Saratov State University, Saratov, Russia

nix007@mail.ru

Abstract. Most promising materials for creating biointerfaces are electrically conductive materials based on carbon and its modifications. Such materials can be used for targeted stimulation of cells and tissues with high spatial resolution. In this work, carbon nanotubes are considered to be used for electrically conductive materials creation because of their outstanding electrical, mechanical and optical properties. It was shown that under the influence of laser radiation, it is possible to achieve the effect of welding with the formation of branched networks on a silicon substrate and within the biopolymer matrix. As a result of experimental studies, the radiation energy density was established at which the effect of single-walled carbon nanotubes bonding to each other appears – 0.061 J/cm². The mechanism of porous materials based on biopolymers albumin, collagen and chitosan formation containing single-walled carbon nanotubes has been determined. Materials were made from single-walled carbon nanotubes and biopolymers with controlled pore size. The pore volume was more than 60 % of the nanocomposite volume.

Keywords: carbon nanotubes, laser radiation, electrical conductivity, nanoelectronics, bioelectronics

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant 21-19-00226).

For citation: Kuksin A. V., Glukhova O. E., Gerasimenko A. Yu. Electrically conductive carbon nanotube framework materials. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 19–27. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-19-27>

Введение. В настоящее время лазерное излучение широко используется для модификации наноматериалов из металлов, диэлектриков и полупроводников. Одно из применений лазерного излучения – улучшение характеристик материалов для биоэлектроники, а именно электропроводящих материалов для биоинтерфейсов. Такие материалы можно использовать для направленной стимуляции клеток и тканей с высоким пространственным разрешением. Одним из перспективных материалов являются углеродные нанотрубки [1]. Они долговечны [2] и характеризуются высокой биосовместимостью [3]. Известно, что лазерное излучение в импульсном и непрерывном режимах может связывать углеродные наночастицы (углеродные нанотрубки, графен) между собой [4]. Этот эффект достигается за счет двух основных механизмов: сублимации наиболее дефектных нанотрубок или листов графена под действием лазерного излучения и

последующей конденсации продуктов сублимации на нанотрубках и переходах графена, а также образования ковалентных связей в дефектных областях наночастиц при лазерном нагреве. Дефектные участки наночастиц имеют наименьшую теплопроводность и наиболее химически активны. Это приводит к появлению химических связей на дефектных участках [5, 6]. Известно, что углеродные наночастицы характеризуются полупроводниковыми и электропроводящими свойствами. Когда нанотрубки и графен связаны друг с другом, появляются электропроводящие узлы (узлы перколяции). Для изготовления электропроводящих соединений для наноэлектроники или функциональных трехмерных материалов в биоэлектронике необходимо создать комплекс узлов перколяции на заданной площади или в заданном объеме [7, 8].

Биополимеры используются для повышения биосовместимости интерфейсных материалов [9]. Альбумин под действием лазера образует богатую питательными веществами матрицу для роста клеток, коллаген повышает гибкость биоинтерфейса, хитозан имеет антибактериальные свойства [10, 11]. Сети из нанотрубок в матрице, сформированные под действием лазера, увеличивают электропроводность материала.

В настоящей работе рассматривается технология создания электропроводящих биополимерных нанокомпозитов на основе сетей из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в матрице биополимеров: альбумина, коллагена и хитозана. Материалы на основе сетей из ОУНТ характеризуются высокой прочностью и электропроводностью, что актуально при создании биоэлектронных устройств, например электропроводящих структур и покрытий для сердечно-сосудистых или нервных устройств и биоинтерфейсов.

Материалы и методы исследования. На этапе подготовки образцов однородную дисперсию ОУНТ получали в растворителе (диметилформамид 90 % и метилэтилкетон 10 %). Использовали ОУНТ OCSiAl Tuball диаметром 1,2–2 нм, длиной не более 5 мкм и удельной поверхностью ≥ 300 м²/г. Полученную дисперсию наносили на полированную кремниевую пластину, расположенную на нагревательном столике, для испарения растворителя. Дисперсию наносили послойно с использованием установки для напыления, закрепленной на системе позиционирования. Количество слоев задавали числом проходов напыляющей головки установки над подложкой. С помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) установлено, что толщина одного слоя составляет (3 ± 1) нм. После этого неупорядоченную систему ОУНТ, состоящую из 500 слоев, обрабатывали лазерным воздействием в режиме сканирования. Лазерная установка включает в себя систему облучения в виде импульсного Yb-лазера с длиной волны 1064 нм и частотой импульсов 30 кГц. Длительность импульса составляет 100 нс, плотность энергии находится в диапазоне 0,002–0,061 Дж/см², диаметр пучка равен 35 мкм. Позиционирование лазерного луча осуществляли сканером с двумя зеркалами и фокусирующей линзой. Образец равномерно покрывали лазерными импульсами с одинаковой плотностью энергии. Лазерное сканирование осуществляли с помощью компьютерной программы по заданной траектории. Воздействие лазером проводили в среде инертного газа (Ar).

Нанокомпозиты с биополимерами создавали воздействием Yb-лазера на однородную дисперсию из альбумина, коллагена, хитозана и ОУНТ. Дисперсии готовили из дистиллированной воды и ОУНТ с концентрацией 0,01 %. Компоненты перемешивали на магнитной мешалке в течение 30 мин, затем агломераты нанотрубок разделяли с помощью ультразвукового гомогенизатора и ультразвуковой ванны. К полученной дисперсии добавляли биополимеры, обработку проводили на магнитной мешалке в течение 1 ч и в ультразвуковой ванне в течение 1 ч. Концентрации биополимеров составляли: 25 % альбумина, 1 % коллагена и 2 % хитозана. Нанесение дисперсии на кремниевую

подложку проводили послойно аналогично нанесению ОУНТ. Поскольку толщина слоев на основе биополимеров значительно превышала толщину слоев только из ОУНТ, после нанесения дисперсии в жидком состоянии каждый слой подвергали лазерному воздействию с плотностью энергии $0,51\text{--}0,61\text{ Дж/см}^2$ для трансформации в твердое состояние. Толщина каждого слоя на основе биополимеров и ОУНТ равна (30 ± 5) мкм. Для формирования объемного нанокompозита наносили не менее 10 слоев. Воздействие лазером проводили в среде инертного газа (Ar). Пористость нанокompозитов с биополимерами определяли методом томографии на томографе Bruker Skyscan 1174.

Все полученные образцы детально исследованы с применением сканирующего электронного микроскопа FEI Helios NanoLab 650 при ускоряющем напряжении электронной колонны 2 кВ и токе электронного зонда 21 пА.

Удельную электропроводность сетей из ОУНТ и биополимеров определяли четырехзондовым методом. Четыре зонда станции Cascade Microtech PM5 располагались по краям образца. Контакты зондовой станции подключали к мультиметру Keysight Technologies 34401A. Изначально измеряли сопротивление образцов (не менее 5 раз), затем рассчитывали среднее значение удельной электропроводности.

Результаты и их обсуждение. В результате лазерного воздействия сформирована сеть из ОУНТ. Экспериментальные исследования позволили определить плотность энергии, равную $0,061\text{ Дж/см}^2$, которая приводит к образованию сетей. На рис. 1 показана оптическая схема лазерной установки для воздействия на ОУНТ и создания нанокompозитов. Изображения исходных ОУНТ, нанесенных на подложку, и сетей связанных ОУНТ представлены на снимках, полученных методом СЭМ (рис. 2). На рис. 2, з, д стрелками показаны места соединения нанотрубок.

Известно, что высокие температуры способствуют разрушению ОУНТ и С–С-связей, но также приводят к последующему образованию новых связей. При высокоинтенсивном воздействии Yb-лазером с длиной волны 1064 нм на ОУНТ происходит их нагрев в диапазоне температур $1400\text{--}1800\text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Это облегчает формирование сетей из ОУНТ. Помимо эффекта наносварки на контактных поверхностях нагретых ОУНТ образуются

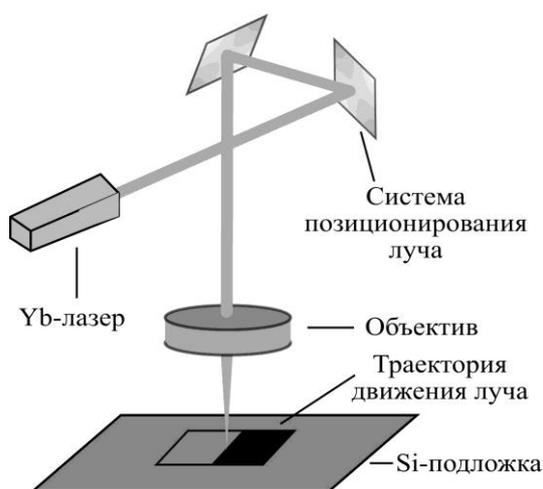


Рис. 1. Оптическая схема лазерной установки для воздействия на ОУНТ и создания нанокompозитов

Fig. 1. Optical scheme of a laser setup for influencing SWCNT and creating nanocomposites

новые химические связи. Образованная при плотности лазерной энергии $0,061\text{ Дж/см}^2$ сеть из ОУНТ имеет высокую электропроводность, равную $1,1\cdot 10^5\text{ См/м}$. При превышении порогового значения плотности энергии $0,061\text{ Дж/см}^2$ избыточная лазерная энергия приводит к разрушению С–С-связей в остове ОУНТ и в области их контактов с образованием аморфного углерода на поверхности ОУНТ. Соответственно, происходит разрушение сетей из ОУНТ и, как следствие, снижение электропроводности. В таблице представлены данные по электропроводности полученных сетей из ОУНТ, сформированных при различных режимах лазерного воздействия. Помимо обеспечения электропроводности сети из ОУНТ в матрице биополимера повышают механические характеристики материала [7].

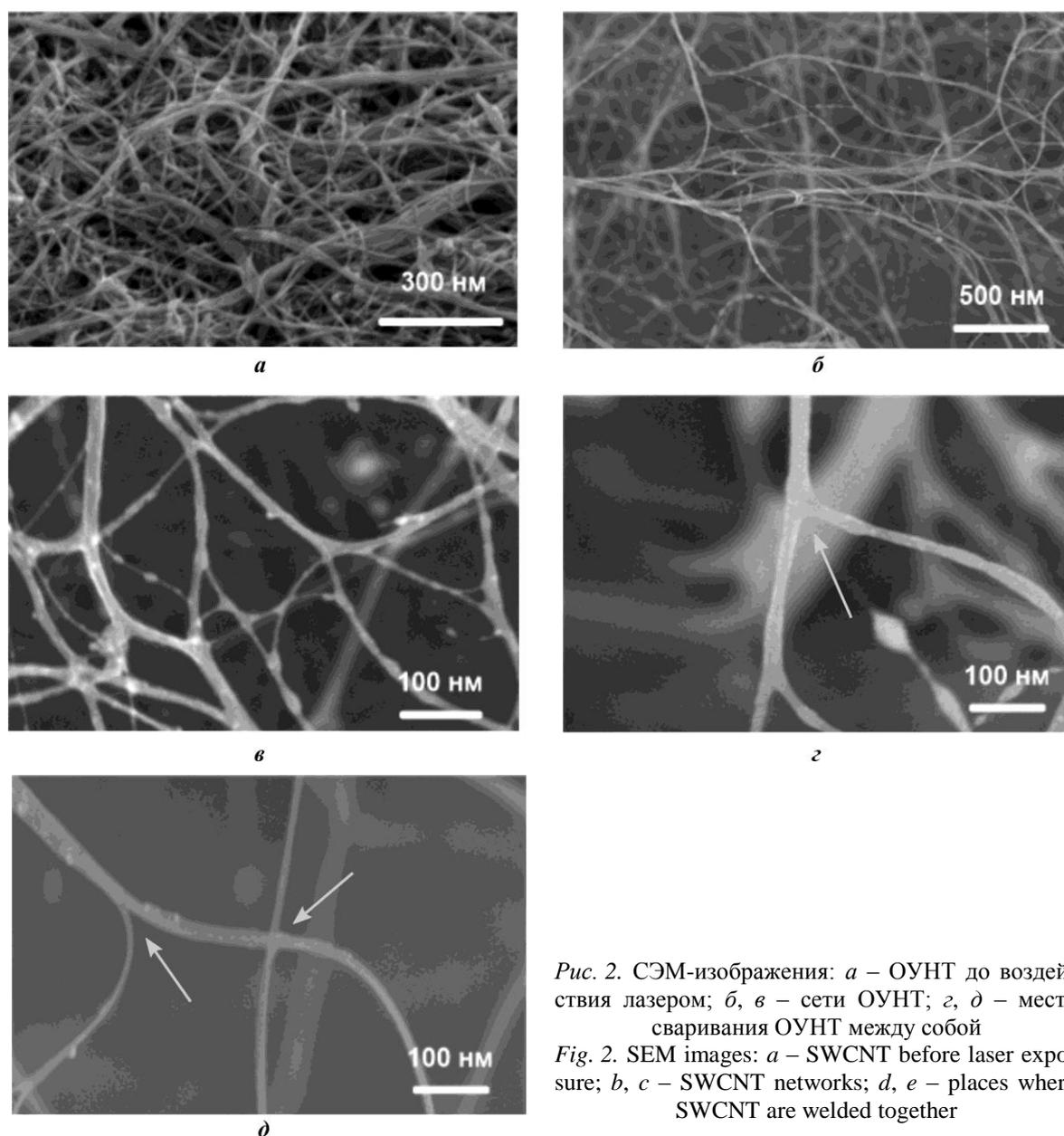


Рис. 2. СЭМ-изображения: а – ОУНТ до воздействия лазером; б, в – сети ОУНТ; г, д – места сваривания ОУНТ между собой
 Fig. 2. SEM images: a – SWCNT before laser exposure; b, c – SWCNT networks; d, e – places where SWCNT are welded together

Значения параметров сетей из ОУНТ, образованных лазерным воздействием с плотностью энергии E/S

Parameter values of SWCNT networks formed by laser action with energy density E/S

Плотность энергии, Дж/см ²	Число проходов	Удельная электропроводность, См/м
0,002	10	$3,8 \cdot 10^4$
0,028	1	$6,5 \cdot 10^4$
0,044	1	$8,7 \cdot 10^4$
0,061	1	$1,1 \cdot 10^5$

Примечание: удельная электропроводность исходных ОУНТ равна $2,3 \cdot 10^3$ См/м.

Физический механизм образования связей между ОУНТ можно объяснить следующим образом. Во время процесса облучения энергия поглощается электронами, а затем преобразуется в энергию атомов ОУНТ. Столкновение фононов с атомами углерода приводит к образованию дефектов, таких как вакансии и междоузлия, в стенках УНТ. Баллистическое столкновение электронов с ядрами углерода также способствует образованию дефектов. Благодаря умеренной температуре подвижность таких дефектов вызывает разрыв С–С-связей в ОУНТ. Новые химические связи образуются на контактных поверхностях сваренных ОУНТ, что приводит к реконструкции их поверхности.

Линейно-оптические исследования материалов с ОУНТ показывают, что в жидкой дисперсной среде при воздействии импульсного лазерного излучения (с большой энергией импульса) происходят процессы нелинейного поглощения и нелинейного рассеяния излучения. В этом случае энергия лазерного импульса поглощается ОУНТ и преобразуется в тепло. Кроме того, из-за нагрева вокруг ОУНТ появляются пузырьки газа, которые рассеивают оставшуюся часть импульса и последующие лазерные импульсы. Нелинейные процессы при диспергировании ОУНТ запускаются, если лазерный импульс имеет достаточную пороговую плотность энергии. Созданы биополимерные нанокомпозиты из дисперсии на основе альбумина, коллагена хитозана и ОУНТ. При этом установлена пороговая плотность энергии, при которой происходит формирование нанокомпозитов с заданной структурой (пористостью).

Путем определения пороговой плотности энергии излучения можно контролировать размер пор в твердом композите. При воздействии излучения с пороговой плотностью энергии $0,51 \text{ Дж/см}^2$ появились единичные поры (рис. 3, а). В случае превышения указанной плотности энергии на $0,05 \text{ Дж/см}^2$ ($0,56 \text{ Дж/см}^2$) наблюдается увеличение количества и размера пор (рис. 3, б). При достижении плотности энергии $0,61 \text{ Дж/см}^2$ пористость биополимерных нанокомпозитов составила более 60 % (рис.3, в). В этом

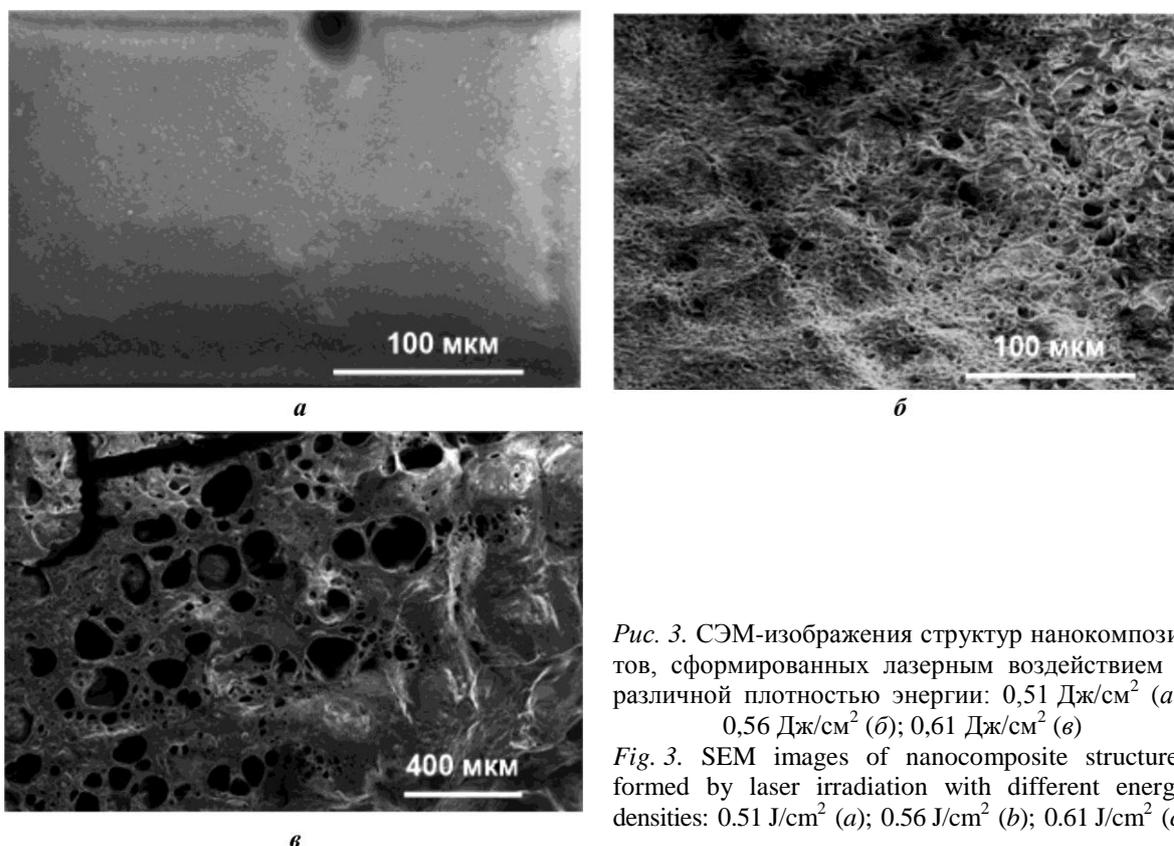


Рис. 3. СЭМ-изображения структур нанокомпозитов, сформированных лазерным воздействием с различной плотностью энергии: $0,51 \text{ Дж/см}^2$ (а); $0,56 \text{ Дж/см}^2$ (б); $0,61 \text{ Дж/см}^2$ (в)
Fig. 3. SEM images of nanocomposite structures formed by laser irradiation with different energy densities: 0.51 J/cm^2 (a); 0.56 J/cm^2 (b); 0.61 J/cm^2 (c)

случае биополимерные нанокompозиты из альбумина, коллагена и хитозана с ОУНТ имеют четко видимую пористость, размеры пор составляют 1–5 мкм и 100–200 мкм. Большие поры должны способствовать адгезии и пролиферации клеток, малые поры необходимы для процессов васкуляризации и иннервации. Созданные нанокompозиты могут быть использованы в качестве электропроводящих интерфейсов для восстановления нервных и мышечных тканей организма. Установлено, что в структуре нанокompозита также присутствуют поры субмикронного размера. Исследования влияния геометрических характеристик ОУНТ на размер субмикронных пор в нанокompозитах представлены в работе [13].

На рис. 4 стрелками показаны области соединений ОУНТ в сети, сформированные под воздействием лазерного излучения. Видно, что размер элементов сети превышает диаметр одиночных ОУНТ. Увеличение диаметра ОУНТ может быть связано с их покрытием биополимерами. Под действием лазерного излучения удлиненные молекулы биополимера разворачиваются и прикрепляются к ОУНТ за счет боковых аминогрупп [7]. Когда молекулы воды удаляются, биополимеры полностью покрывают стенки ОУНТ.

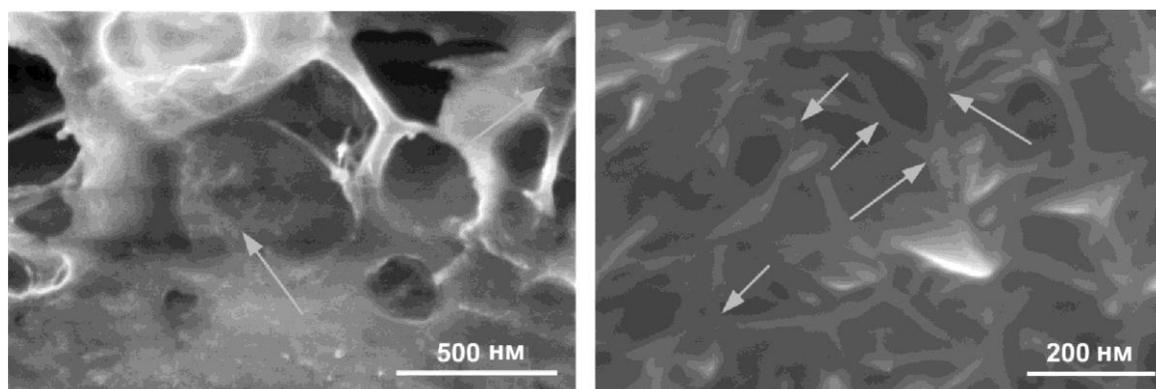


Рис. 4. Сети из ОУНТ на основе нанокompозитного слоя с биополимерами
Fig. 4. SWCNT networks based on a nanocomposite layer with biopolymers

Заключение. В результате экспериментальных исследований материалов на основе проводящих сетей из ОУНТ определена плотность энергии излучения ($0,061 \text{ Дж/см}^2$), при которой проявляется эффект связывания ОУНТ, и установлен механизм формирования пористых материалов в составе ОУНТ. Полученные с помощью лазерного излучения материалы из ОУНТ и биополимеров с контролируемым размером пор, которые занимают более 60 % от объема нанокompозита, можно изготавливать в различных формах.

Созданные материалы могут применяться для производства независимых имплантируемых структур или покрытий для сердечно-сосудистых или нервных устройств и биоинтерфейсов.

Литература

1. *Rastogi S. K., Kalmykov A., Johnson N., Cohen-Karni T.* Bioelectronics with nanocarbons // J. Mater. Chem. B. 2018. Vol. 6. Iss. 44. P. 7159–7178. doi: <https://doi.org/10.1039/C8TB01600C>
2. Strength of carbon nanotubes depends on their chemical structures / *A. Takakura, K. Beppu, T. Nishihara et al.* // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. Art. No. 3040. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10959-7>
3. Advances in carbon nanotubes – hydrogel hybrids in nanomedicine for therapeutics / *A. Vashist, A. Kaushik, At. Vashist et al.* // Adv. Healthcare Mater. 2018. Vol. 7. Art. ID: 1701213. doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.201701213>
4. *Liu Y.-T., Yao T.-T., Zhang W.-S., Wu G.-P.* Laser welding of carbon nanotube networks on carbon fibers from ultrasonic-directed assembly // Mater. Lett. 2019. Vol. 236. P. 244–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.161>

5. Hydrogen storage in heat welded random CNT network structures / **Z. Ozturk, C. Baykasoglu, A. T. Celebi et al.** // *Int. J. Hydrog. Energy*. 2015. Vol. 40. Iss. 1. P. 403–411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.148>
6. Vibration promotes heat welding of single-walled carbon nanotubes / **N. M. Piper, Y. Fu, J. Tao et al.** // *Chem. Phys. Lett.* 2011. Vol. 502. Iss. 4–6. P. 231–234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.12.068>
7. Laser fabrication of composite layers from biopolymers with branched 3D networks of single-walled carbon nanotubes for cardiovascular implants / **A. Yu. Gerasimenko, U. E. Kurilova, M. S. Savelyev et al.** // *Compos. Struct.* 2021. Vol. 260. Art. ID: 113517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113517>
8. Biocompatible SWCNT conductive composites for biomedical applications / **A. Markov, R. Wördenweber, L. P. Ichkitidze et al.** // *Nanomat.* 2020. Vol. 10. Iss. 12. Art. ID: 2492. doi: <https://doi.org/10.3390/nano10122492>
9. **Song J., Winkeljann B., Lieleg O.** Biopolymer-based coatings: promising strategies to improve the biocompatibility and functionality of materials used in biomedical engineering // *Adv. Mater. Interfaces*. 2020. Vol. 7. Art. ID: 2000850. doi: <https://doi.org/10.1002/admi.202000850>
10. Electrospun collagen – chitosan – TPU nanofibrous scaffolds for tissue engineered tubular grafts / **C. Huang, R. Chen, Q. Ke et al.** // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2011. Vol. 82. Iss. 2. P. 307–315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.09.002>
11. **Badawy M. E. I., Rabea E. I.** A biopolymer chitosan and its derivatives as promising antimicrobial agents against plant pathogens and their applications in crop protection // *Int. J. Carbohydr. Chem.* 2011. Vol. 2011. Art. ID: 460381. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/460381>
12. **Yuan Y., Chen J.** Nano-welding of multi-walled carbon nanotubes on silicon and silica surface by laser irradiation // *Nanomaterials*. 2016. Vol. 6 (3). Art. No. 36. doi: <https://doi.org/10.3390/nano6030036>
13. Laser technology for the formation of bioelectronic nanocomposites based on single-walled carbon nanotubes and proteins with different structures, electrical conductivity and biocompatibility / **A. Yu. Gerasimenko, U. E. Kurilova, I. A. Suetina et al.** // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11 (17). Art. ID: 8036. doi: <https://doi.org/10.3390/app11178036>

Статья поступила в редакцию 27.07.2021 г.; одобрена после рецензирования 27.07.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Куксин Артем Викторович – аспирант Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), nix007@mail.ru

Глухова Ольга Евгеньевна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой радиотехники и электродинамики, главный научный сотрудник отдела математического моделирования Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), ведущий научный сотрудник лаборатории биомедицинских нанотехнологий Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8/2), glukhova.o@info.sgu.ru

Герасименко Александр Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), заведующий лабораторией биомедицинских нанотехнологий Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8/2), gerasimenko@bms.zone

References

1. Rastogi S. K., Kalmykov A., Johnson N., Cohen-Karni T. Bioelectronics with nanocarbons. *J. Mater. Chem. B*, 2018, vol. 6, iss. 44, pp. 7159–7178. doi: <https://doi.org/10.1039/C8TB01600C>
2. Takakura A., Веппу К., Nishihara T., Fukui A., Kozeki T., Namazu T., Itami K. Strength of carbon nanotubes depends on their chemical structures. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, art. no. 3040. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10959-7>

3. Vashist A., Kaushik A., Vashist At., Sagar V., Ghosal A., Gupta Y. K., Nair M. Advances in carbon nanotubes – hydrogel hybrids in nanomedicine for therapeutics. *Adv. Healthcare Mater.*, 2018, vol. 7, art. ID: 1701213. doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.201701213>
4. Liu Y.-T., Yao T.-T., Zhang W.-S., Wu G.-P. Laser welding of carbon nanotube networks on carbon fibers from ultrasonic-directed assembly. *Mater. Lett.*, 2019, vol. 236, pp. 244–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.161>
5. Ozturk Z., Baykasoglu C., Celebi A. T., Kirca M., Mugan A., To A. C. Hydrogen storage in heat welded random CNT network structures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, vol. 40, iss. 1, pp. 403–411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.148>
6. Piper N. M., Fu Y., Tao J., Yang X., To A. C. Vibration promotes heat welding of single-walled carbon nanotubes. *Chem. Phys. Lett.*, 2011, vol. 502, iss. 4–6, pp. 231–234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.12.068>
7. Gerasimenko A. Yu., Kurilova U. E., Savelyev M. S., Murashko D. T., Glukhova O. E. Laser fabrication of composite layers from biopolymers with branched 3D networks of single-walled carbon nanotubes for cardiovascular implants. *Compos. Struct.*, 2021, vol. 260, art. ID: 113517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113517>
8. Markov A., Wördenweber R., Ichkitidze L. P., Gerasimenko A. Yu., Kurilova U. E., Suetina I. A., Mezentseva M. V., Offenhäusser A., Telyshev D. V. Biocompatible SWCNT conductive composites for biomedical applications. *Nanomater.*, 2020, vol. 10, iss. 12, art. ID: 2492. doi: <https://doi.org/10.3390/nano10122492>
9. Song J., Winkeljann B., Lieleg O. Biopolymer-based coatings: promising strategies to improve the biocompatibility and functionality of materials used in biomedical engineering. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020, vol. 7, art. ID: 2000850. doi: <https://doi.org/10.1002/admi.202000850>
10. Huang C., Chen R., Ke Q., Morsi Y., Zhang K., Mo X. Electrospun collagen–chitosan–TPU nanofibrous scaffolds for tissue engineered tubular grafts. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2011, vol. 82, iss. 2, pp. 307–315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.09.002>
11. Badawy M. E. I., Rabea E. I. A biopolymer chitosan and its derivatives as promising antimicrobial agents against plant pathogens and their applications in crop protection. *Int. J. Carbohydr. Chem.*, 2011, vol. 2011, art. ID: 460381. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/460381>
12. Yuan Y., Chen J. Nano-welding of multi-walled carbon nanotubes on silicon and silica surface by laser irradiation. *Nanomaterials*, 2016, vol. 6 (3), art. no. 36. doi: <https://doi.org/10.3390/nano6030036>
13. Gerasimenko A. Yu., Kurilova U. E., Suetina I. A., Mezentseva M. V., Zubko A. V., Sekacheva M. I., Glukhova O. E. Laser technology for the formation of bioelectronic nanocomposites based on single-walled carbon nanotubes and proteins with different structures, electrical conductivity and biocompatibility. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11 (17), art. ID: 8036. doi: <https://doi.org/10.3390/app11178036>

The article was submitted 27.07.2021; approved after reviewing 27.07.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Artem V. Kuksin – PhD student of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), nix007@mail.ru

Olga E. Glukhova – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Radio Engineering and Electrodynamics Department, Chief Researcher of the of Mathematical Modeling Department, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 83), Leading Researcher of the Laboratory of Biomedical Nanotechnologies, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8/2), glukhovaoe@info.sgu.ru

Alexander Yu. Gerasimenko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Researcher of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Laboratory of Biomedical Nanotechnologies, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8/2), gerasimenko@bms.zone

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 621.3.049.76
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-28-40

Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках

Д. В. Вертянов¹, И. А. Беляков¹, А. В. Погудкин¹,
С. П. Тимошенко¹, В. Н. Сидоренко²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия

² АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», г. Москва,
Россия

vdv.vertyanov@gmail.com

Аннотация. Для снижения разницы температурного коэффициента линейного расширения между кристаллом и материалом герметизации при корпусировании микросхем в пластиковые корпуса применяются эпоксидные монолитизирующие компаунды, содержащие высокий процент наполнителя в виде частиц оксида кремния. Однако помимо кристалла значительное влияние на уровень термомеханических напряжений в корпусе оказывает коммутационная подложка. При трехмерной интеграции в микросборке с помощью объемной коммутации объединяется несколько подложек, которые могут быть изготовлены из различных диэлектриков. В работе показано, что снизить уровень температурных напряжений в такой структуре могут герметизирующие материалы с различным температурным коэффициентом линейного расширения во внешней и внутренней частях изделия. Определены зависимости термомеханического напряжения и деформации микросборки от числа уровней и количества наполнителя во внешнем герметизирующем компаунде. Исследование проведено посредством компьютерного моделирования различных конструкций микросборок, герметизированных компаундами с разными значениями температурных и механических параметров. На основе полученных графиков зависимостей установлены оптимальные значения содержания наполнителя во внешнем и внутреннем компаундах для обеспечения минимальной температурной и механической (под действием ускорения) деформации микросборок при разном числе уровней.

Ключевые слова: корпусирование, эпоксидный монолитизирующий компаунд, трехмерная интеграция, трехмерная микросборка

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-37-90096).

Для цитирования: Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках / Д. В. Вертянов, И. А. Беляков, А. В. Погудкин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 28–40. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-28-40>

Original article

Investigation of the influence of mechanical and thermal effects on the level of stresses and deformations in three-dimensional microassemblies sealed with two types of compounds

*D. V. Vertyanov¹, I. A. Belyakov¹, A. V. Pogudkin¹,
S. P. Timoshenkov¹, V. N. Sidorenko²*

¹*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

²*JSC “Zelenograd Nanotechnology Center”, Moscow, Russia*

vdv.vertyanov@gmail.com

Abstract. Manufacturers of plastic packages use high silica filler epoxy molding compounds to reduce the difference in coefficient of thermal expansion between the die and the encapsulation material. However, in addition to the die, commutation substrate has a significant effect on the thermo-mechanical stresses level in the package. Three-dimensional integration makes it possible to combine several substrates, which can be made from various dielectrics, in a one microassembly with the help of a vertical volume commutation. This work shows that the use of capsulation materials with different thermal expansion coefficient

in the outer and inner parts of the product can reduce the level of temperature stresses in such a structure. The dependences of the thermo-mechanical stress and deformation on the number of levels and the amount of filler in the external compound were established. This study was carried out by means of computer simulation for various designs of microassemblies capsulated with compounds characterized by different values of temperature and mechanical parameters. The dependences obtained in the article allow us to establish optimal values of filler content in the external and internal compounds to ensure minimal thermal and mechanical (under the influence of acceleration) deformation of microassemblies with different levels.

Keywords: packaging, epoxy molded compound, three-dimensional integration, three-dimensional package

Funding: the work has been supported by Russian Foundation for Basic Research grant (project № 20-37-90096).

For citation: Vertyanov D. V., Belyakov I. A., Pogudkin A. V., Timoshenkov S. P., Sidorenko V. N. Investigation of the influence of mechanical and thermal effects on the level of stresses and deformations in three-dimensional microassemblies sealed with two types of compounds. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 28–40. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-28-40>

Введение. Эпоксидные монолитизирующие компаунды (Epoxy Mold Compound, EMC) традиционно используются для корпусирования микросхем и дискретных полупроводниковых компонентов потребительской электроники. С развитием технологий дву- и трехмерной интеграции, а также технологий группового корпусирования на уровне пластины применение подобных материалов расширяется. Так, компания 3D PLUS (Франция, США) при герметизации микросборок видеокамер и преобразователей напряжения для космических аппаратов использует эпоксидный компаунд HYSOL FP4450 [1, 2]. Компания Irvine Sensors (США) создает на основе готовых микросхем в пластиковых корпусах трехмерные микросборки специального назначения [3]. Применение корпусов и трехмерных микросборок, созданных по технологиям «распределенного» корпусирования на уровне пластины (Fan-out WLP), выходит за пределы принятой для них области мобильных устройств. Такие микросборки применяются в телекоммуникационной сфере, медицинской технике, при создании МЭМС и сенсоров [4].

Цель настоящей работы – определение зависимостей деформации и напряжения под действием температуры и ускорения от конструкции уровня микросборки и свойств герметизирующего компаунда в трехмерных сборках с разным числом уровней.

Особенности герметизации микросборок. Рассмотрим особенности герметизации дву- и трехмерных микросборок по сравнению с герметизацией отдельных кристаллов. Большое количество элементов и компонентов микросборки изготовлено из материалов с различными теплофизическими параметрами, например с различным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). В числе таких материалов – полупроводники, из которых изготавливаются кристаллы для ИС, полимеры и композиты, служащие основой подложек для уровней микросборки, керамические и магнитные материалы, применяемые в пассивных компонентах, а также металлы, с помощью которых реализуется коммутация. Приведем значения ТКЛР наиболее известных материалов электронных компонентов и коммутационных подложек / плат:

<i>Материал</i>	<i>ТКЛР, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$</i>
Монокристаллический кремний	2,45
Полиимид.....	~52
СВЧ-ламинат на основе PTFE.....	по осям X, Y от 12 до 48 по оси Z от 30 до 270
СВЧ-ламинат на основе керамики.....	по осям X, Y от 11–16 по оси Z от 35 до 46
Стеклотекстолит FR-406.....	по осям X, Y от 15 до 17 по оси Z до 50
Керамика Al_2O_3	от 6,5 до 10,9
Материалы на основе феррита	от 12 до 16
TiO_2	от 7,2 до 10

Одно из отличий трехмерной микросборки от дискретного корпуса заключается в доступности подложки с компонентами / элементами для герметизации. В традиционном корпусе кристалл расположен на выводной рамке или коммутационной плате, поэтому для герметизации доступна верхняя плоскость и торцы изделия. При трехмерной

микросборке уровни с компонентами / элементами расположены друг над другом, поэтому герметизация может быть реализована либо путем заполнения компаундом межуровневого пространства после соединения уровней, либо в результате герметизации уровней до их монтажа друг на друга. В технологиях трехмерной интеграции с торцевыми коммутационными дорожками, в микросборках на основе интерпозеров, а также в трехмерных ИС (3D ИС), где кристаллы со сквозными металлизированными отверстиями в кремнии (TSV) монтируют друг на друга с помощью бампов [5, с. 359–362] (рис. 1, *а–г*), межуровневое пространство заполняется компаундом после соединения уровней. Заранее герметизированные уровни применяют в микросборках корпус на корпусе [6, 7] (рис. 1, *д*) и микросборках, создаваемых по технологиям внутреннего монтажа (рис. 1, *з*). Следует отметить, что в микросборках корпус на корпусе вместе с заранее герметизированными уровнями может применяться и заполнение компаундом с низкой вязкостью (материалом подкристалльной заливки) пространства между соединяющимися уровни шариковыми выводами. Сборки на основе соединенных разваркой кристаллов, как правило, герметизируют путем опрессовки, формируя аналоги традиционных пластиковых монокристаллических корпусов (рис. 1, *е*). Монокристаллические сборки получают и в случае использования торцевой коммутации, однако при этом герметизация может осуществляться как опрессовкой уровней до их соединения в сборку, так и путем заливки компаундом межуровневого пространства для всей сборки сразу (рис. 1, *жс*).

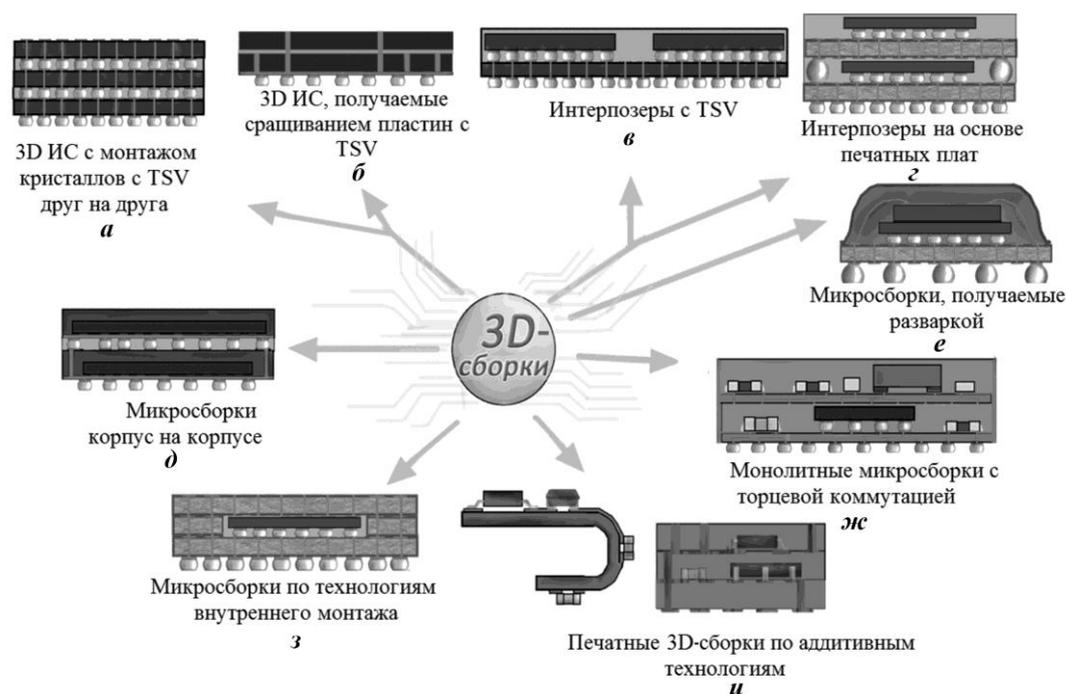


Рис. 1. Технологии создания трехмерных микросборок с разными подходами к герметизации: *а–г* – компаунд заполняет межуровневое пространство; *д–з* – герметизация отдельных уровней методом опрессовки или сочетание опрессовки уровней с заполнением межуровневого пространства жидкими компаундами; *и* – используются корпусированные компоненты, герметизация осуществляется методом послойной печати диэлектриком

Fig. 1. Various technologies for manufacturing three-dimensional micro-assemblies with different approaches to encapsulation: in micro-assemblies under (*a–d*) encapsulation is realized by sealing the interlevel space with a compound; in assemblies under (*e–h*) levels are encapsulated by compression molding or by combination of molding and filling; in micro-assemblies under (*i*) packaged components are used, encapsulation can be carried out by the layer-by-layer dielectric printing

Еще одно отличие трехмерных микросборок от дискретных корпусов – распределение материалов. Так, в центре дискретного корпуса, как правило, располагается единственный кристалл, тогда как на уровне микросборки может быть смонтировано одновременно несколько кристаллов и пассивных компонентов из разных материалов. Кроме того, из-за расположения уровней трехмерной микросборки друг над другом по ее высоте чередуются материалы подложек, компаундов, а также материалы подкристальной заливки (в микросборках, где уровни соединяются посредством шариковых выводов). К этому прибавляется вертикальная коммутация, которая в отличие от коммутации в плоскости подложки корпуса проходит через различные материалы и может быть реализована одновременно несколькими способами межсоединений, например путем соединения шариковых выводов и металлизированных отверстий в компаунде, как в микросборках корпус на корпусе.

Таким образом, результат приложения внешних воздействий к микросборке может значительно отличаться от результата приложения этих же воздействий к одиночному кристаллу в корпусе. Из-за этого будут различаться и оптимальные подходы к герметизации, которые будут зависеть от технологии изготовления микросборки, числа уровней, типа вертикальных соединений и материалов подложек.

Рассмотрим влияние на трехмерную монолитную микросборку с уровнями из стеклопластика таких воздействий, как перепад температуры (от 0 до 100 °С) и ускорение (750 м/с^2) при разном числе уровней и разных вариантах герметизации. Значение воздействующей на микросборку температуры подобрано исходя из параметров технологических процессов: при температуре порядка 100–120 °С проводится сушка жидких и нанесение пленочных фоторезистов, отверждение жидких эпоксидных смол, формовка сухих эпоксидных монолитизирующих композиций [8]. Значение воздействующего удара выбрано согласно требованиям ГОСТ 30631-99 для носимой аппаратуры.

Описание исследуемой модели. В качестве объекта исследования рассмотрим упрощенную модель трехмерной микросборки, которая состоит из набора одинаковых уровней без соединяющих их шариковых выводов. Прототипом данной конструкции стали микросборки с торцевой коммутацией.

Уровни модели представляют собой подложки квадратной формы толщиной 0,5 мм и размером сторон 20 мм, в центре которых размещается кристалл толщиной 0,48 мм и габаритами $7,5 \times 7,5$ мм (рис. 2, а). Кристалл охватывает две области герметизации. Внутренняя область, соответствующая компаунду № 1 с 80%-ным содержанием наполнителя, прилегает к кристаллу и имеет высоту 1,13 мм и габариты $13,5 \times 13,5$ мм. Внешняя область соответствует компаунду № 2 и занимает оставшееся пространство подложки. В работе рассмотрены два варианта уровней. В первом варианте компаунд № 2 покрывает область компаунда № 1 только по торцам (рис. 2, б). Во втором варианте компаунд № 2 охватывает область первого компаунда как сверху, так и по торцам (рис. 2, в). Второй вариант также отличается общей высотой уровня (1,63 мм против 1,13 мм), так как область внешнего компаунда выступает на 0,5 мм над областью компаунда № 1. В обоих вариантах уровней содержание наполнителя в компаунде № 2 при моделировании варьировалось в пределах 0–80 %.

При моделировании учитывали слой материала подкристальной заливки (underfill) толщиной 0,15 мм, используемый для фиксации кристаллов. Вертикальную коммутацию, а также коммутацию подложек и шариковые выводы кристаллов в модели не учитывали.

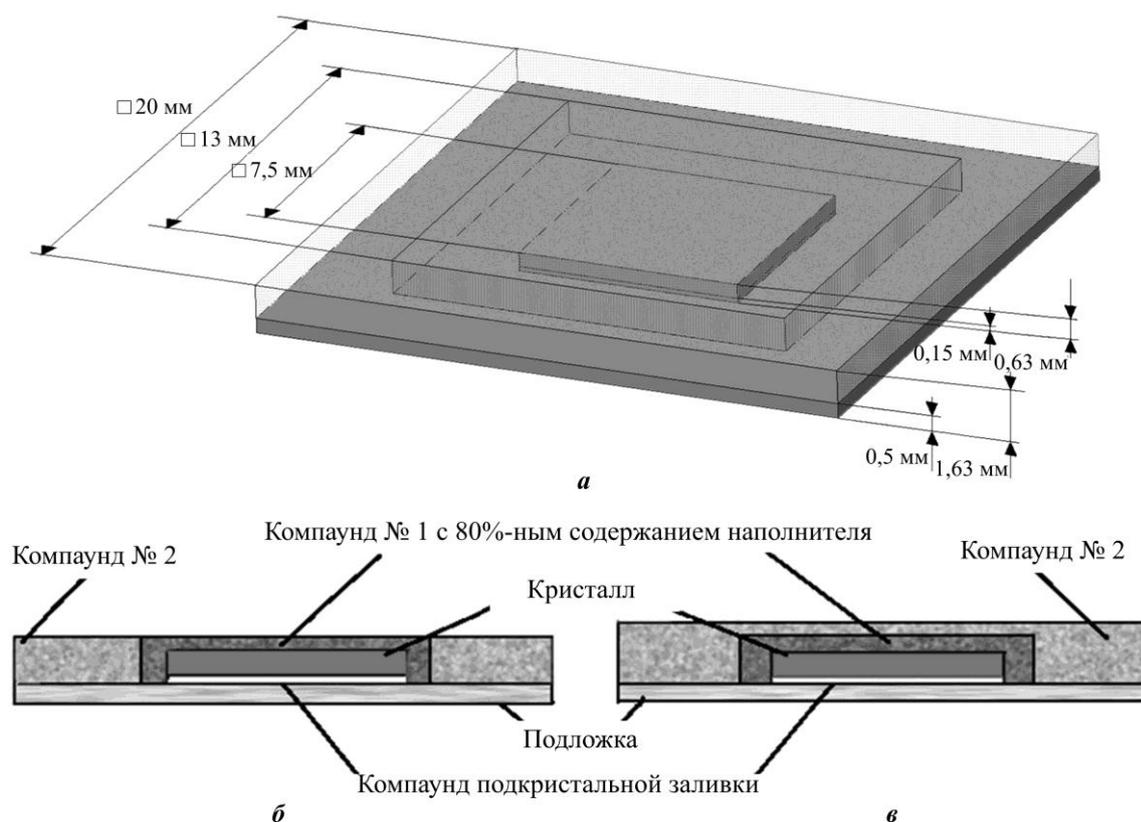


Рис. 2. Размеры составных частей модели уровня (а) и конструкции уровня с компаундом № 2 только по контуру уровня (б) и уровня с компаундом № 2, покрывающим кристалл и компаунд № 1 (в)
 Fig. 2. Dimensions of the component parts of the level model (a) and the design of two levels considered in the model: a level with compound No. 2 only along the level contour (b) and a level with compound No. 2 covering the crystal and compound No. 1 (c)

Описание материалов модели. Для исследуемой модели учитывали такие термо-механические параметры материалов, как модуль упругости, коэффициент Пуассона и ТКЛР. В качестве материала кристаллов использовали кремний, материала подложек – стеклопластик FR-406, материала подкристальной заливки (underfill) – герметик серии HYSOL UF3800. Для компаундов с разным количеством наполнителя применяли приближенные параметры монолитизирующего компаунда, полученные в работах [9–13]. Данные параметры соответствуют композициям с наполнителем в виде разного процента (по массе) микрочастиц оксида кремния диаметром 0,5–10 мкм. Рассматривали компаунды с 50, 60, 70, 80%-ным содержанием наполнителя, а также ненаполненный компаунд (0 % наполнителя).

Наполнитель на основе оксида кремния характеризуется минимальным ТКЛР, имеет низкую стоимость и оптимален для корпусирования одиночных кристаллов, не требующих значительного теплоотвода. Наполнители на основе нитрида кремния, нитрида бора и графена [14, 15] исследованы недостаточно (в литературных источниках приводятся данные по теплопроводности, тогда как данные по ТКЛР композитов отсутствуют). Полимерная основа у всех монолитизирующих композиций одинаковая. Как правило, она представляет собой смесь эпоксидно-диановых (5–10 %) и фенол-новолачных (5 %) смол [7, с. 376–377], позволяющих получать прочные и термостойкие композиты с достаточно низкой стоимостью. Кроме того, в состав могут входить усилитель адгезии, антипирены, красители, поверхностно-активные вещества и другие добавки.

Поскольку исследуются зависимости деформации микросборки от числа уровней и количества наполнителя во внешнем компаунде, шариковые выводы вместе с торцевой коммутацией исключены из модели. Одна из причин данного решения – многократное снижение затрат ресурсов на моделирование, а также установление причин наблюдаемых эффектов при снижении количества переменных, влияющих на деформацию и термомеханические напряжения в микросборке. Например, снижение уровня температурной деформации для модели микросборки с торцевой коммутацией может наблюдаться ввиду близких значений ТКЛР компаунда и медной коммутации, а также ТКЛР подложки и герметизирующего материала. В случае с подложками из стеклопластика ситуация еще более усложняется, поскольку значения ТКЛР меди и подложек тоже близки. Тем не менее изучить, как шариковые выводы и коммутация влияют на деформацию и уровень термомеханических напряжений по сравнению с остальной структурой микросборки, важно для практического применения полученных результатов. Если влияние какой-либо из приведенных структур окажется сравнимым с влиянием общей конструкции микросборки, имеет смысл оптимизировать герметизацию именно под эту структуру.

Поскольку шарики и торцевые дорожки имеют достаточно малые размеры по сравнению с остальными конструктивными элементами микросборки, их предполагаемое влияние на деформацию и механические напряжения незначительно. Это подтверждается предварительным моделированием воздействия температуры и удара на один уровень микросборки, полностью герметизированный компаундом с 80%-ным содержанием наполнителя (исследовали уровень с компаундом № 2, расположенным по торцу) в модели с бампами кристалла и без них. Бампы в модели представлены цилиндрами диаметром 0,2 мм и высотой 0,15 мм. В качестве материала бампов применяли бессвинцовый припой ПСР 3,5.

Термомеханические параметры материалов, использованных в заключительном и предварительном моделировании, приведены в таблице.

Механические и тепловые параметры материалов, используемых при моделировании
Mechanical and thermal parameters of materials used in modeling

Материал	ТКЛР, 10 ⁻⁶ 1/°С	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	
Кремний (100)	2,6	170	0,28	
Компаунд подкристалльной заливки (на основе параметров HYSOL UF3800)	52	5,06	0,33	
Припой бессвинцовый ПСР 3,5 (бампы)	21,85	51	0,36	
Компаунд	Ненаполненный	70	2,5	0,4
	80 % наполнителя	7,5	21	0,222
	70 % наполнителя	15	18,5	0,238
	60 % наполнителя	20	16,5	0,254
	50 % наполнителя	35	12,5	0,27

Результаты исследования. Перед проведением основной части исследования моделировали уровень микросборки при воздействии на него ускорения 75 g и температуры 100 °С. Рассматривали уровни с шариковыми выводами кристалла и без них. Цель моделирования – определить, можно ли пренебречь влиянием шариковых выводов при оценке деформации и механических напряжений в микросборке.

По результатам моделирования максимальная деформация под действием температуры при добавлении в модель уровня из 196 бампов с шагом 0,5 мм увеличилась всего на 0,6 % (от 0,2514 до 0,2530 мм) по сравнению с моделью, где бампы не учитывали (вместо них в модели располагался сплошной слой материала подкристалльной заливки). На распределение механических напряжений шариковые выводы повлияли более значительно, поскольку именно в них концентрируется основная часть напряжений. По этой причине максимальное значение термомеханического напряжения в микросборке увеличилось с $1,72 \cdot 10^8$ до $2,468 \cdot 10^8$ Н/м². Однако в верхней части кристалла в плоскости, параллельной подложке (рис. 3, а, б), значения напряжения увеличилось всего на 8–10 %. То же самое наблюдается и в сечении, перпендикулярном подложке (см. рис. 3, в, г). Это говорит о том, что шариковые выводы и вертикальную коммутацию можно исключить из модели для выявления общих зависимостей деформации и напряжения от числа уровней микросборки (от одного до четырех) и процента наполнителя во внешнем компаунде уровней.

Моделирование воздействия температуры на микросборки с разным числом уровней показало, что значения максимальной термической деформации и максимального термомеханического напряжения в значительной степени зависят не только от материала и способа герметизации, но и от количества уровней микросборки. Так, для одиночного уровня с герметизацией компаундом №2 по контуру минимальная деформация наблюдается при 60%-ном содержании наполнителя. Еще более низкая деформация имеет место для варианта с компаундом №2, покрывающим кристалл при 70%-ном содержании наполнителя. Также в случае одиночного уровня наблюдается быстрый рост максимальной деформации по мере удаления от оптимального содержания наполнителя.

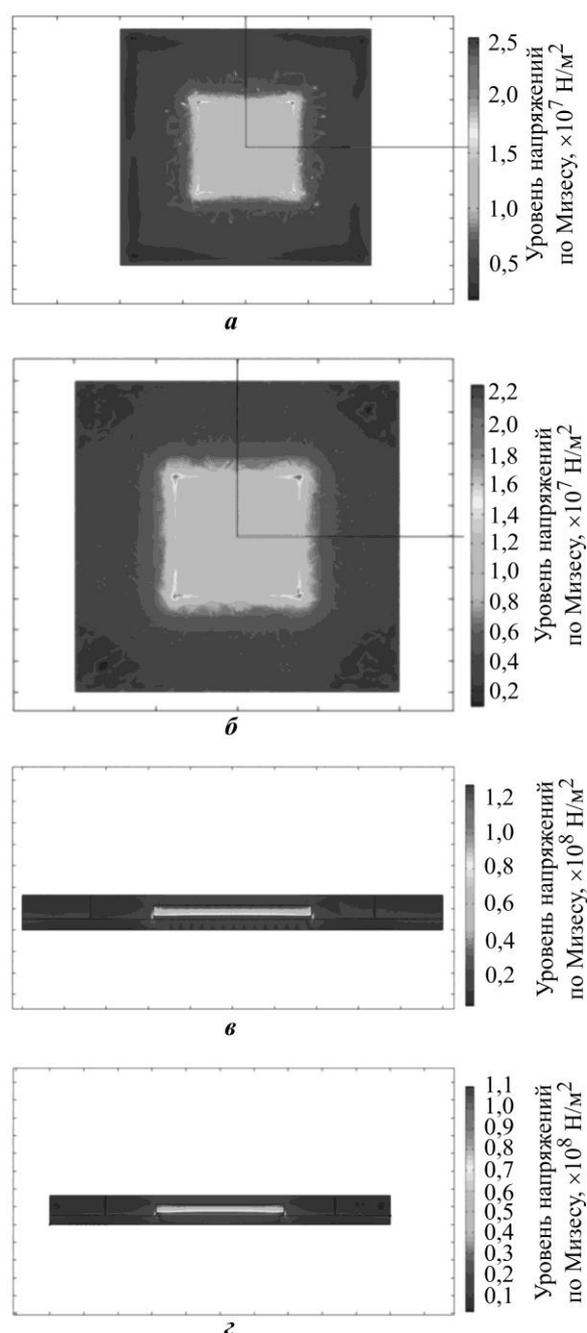


Рис. 3. Распределение механических напряжений под действием температуры 100 °С в горизонтальной плоскости для модели с бампами (а) и без бампов (б) и в вертикальной плоскости в центральной части микросборки для модели с бампами (в) и без бампов (г)

Fig. 3. Distribution of mechanical stresses under the action of a temperature of 100 °С in the horizontal plane for the model with bumpers (a) and without bumpers (б), as well as mechanical stress in the vertical plane in the central part of the microassembly for the model version with bumpers (в) and without bumpers (г)

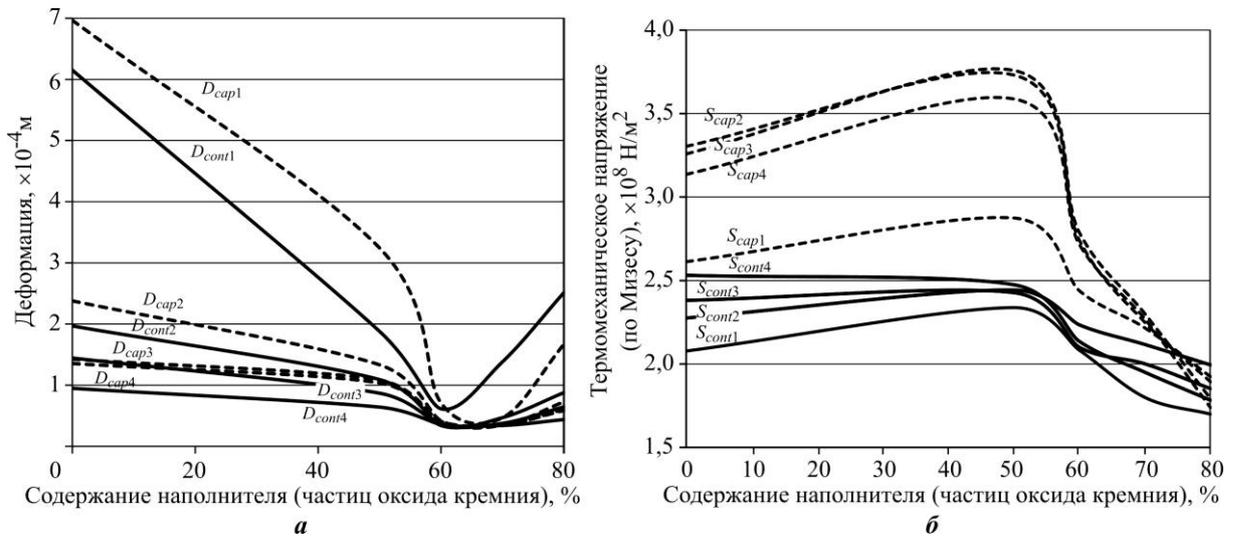


Рис. 4. Зависимости деформации D (а) и внутреннего напряжения (по Мизесу) S (б) под действием температуры от количества наполнителя во внешнем компаунде: D_{cap} – компаунд, покрывающий кристалл; D_{cont} – компаунд по контуру кристалла; S_{cap} – компаунд, покрывающий кристалл; S_{cont} – компаунд по контуру кристалла (цифра обозначает количество уровней микросборки)

Fig. 4. Dependences of the deformation D (a) and thermomechanical stress (according to Von Mises) S (b) under the action of a temperature on the amount of filler in the external compound for two types of sealing: D_{cap} – the compound covering the die; D_{cont} – the compound along the die contour; S_{cap} – the compound covering the crystal; S_{cont} – the compound along the crystal contour (the numeral indicates the number of microassembly levels)

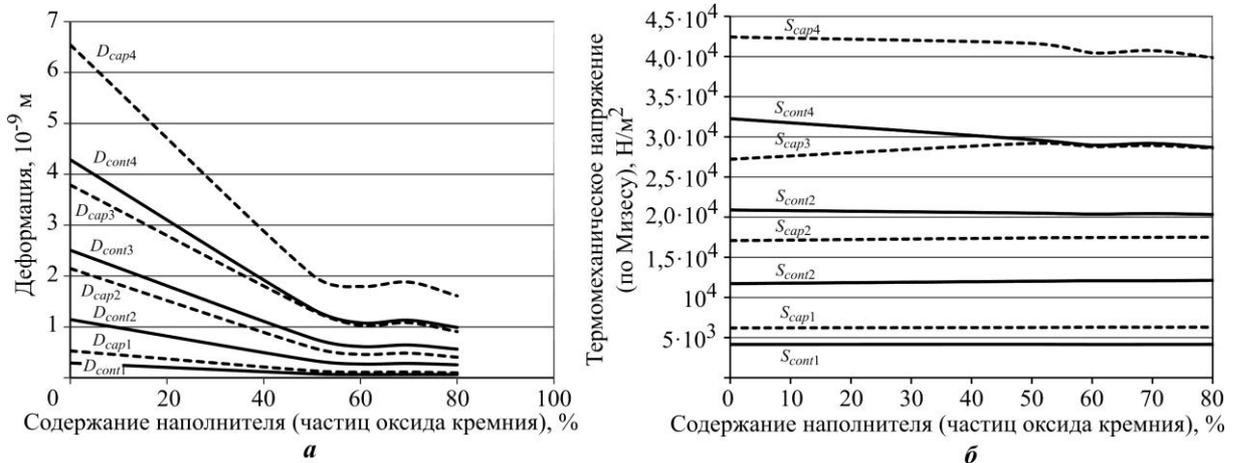


Рис. 5. Зависимости деформации D (а) и внутреннего напряжения (по Мизесу) S (б) под действием ускорения от количества наполнителя во внешнем компаунде: D_{cap} – компаунд, покрывающий кристалл; D_{cont} – компаунд по контуру кристалла; S_{cap} – компаунд, покрывающий кристалл; S_{cont} – компаунд по контуру кристалла (цифра обозначает количество уровней микросборки)

Fig. 5. Dependences of the deformation D (a) and thermomechanical stress (according to Von Mises) S (b) under the action of acceleration on the amount of filler in the external compound for two types of sealing: D_{cap} – the compound covering the die; D_{cont} – the compound along the die contour; S_{cap} – the compound covering the die; S_{cont} – the compound along the die contour (the numeral indicates the number of microassembly levels)

С увеличением числа уровней зависимость деформации от количества наполнителя во внешнем компаунде становится менее выраженной. Также с увеличением числа уровней до четырех герметизация компаундом № 2 только по контуру обеспечивает минимальную деформацию в случае использования внешнего компаунда с 70%-ным содержанием наполнителя (рис. 4, а).

Уровень механических напряжений при воздействии температуры возрастает с увеличением количества уровней. Также термомеханические напряжения возрастают с приближением количества наполнителя к 50 % и незначительно снижаются при последующем уменьшении доли наполнителя до нуля. Однако рост напряжений при переходе от 80 к 70%-ному содержанию наполнителя более пологий и составляет порядка 10–15 % (рис. 4, б).

Моделирование деформации под действием ускорения 75 g показало ее незначительную роль по сравнению с деформацией от температурного воздействия – первая почти на четыре порядка ниже последней. При этом характер зависимости уровня деформации, вызванной ускорением, от количества наполнителя во внешнем компаунде отличается от зависимостей, полученных для температурной деформации. Обусловленная ускорением деформация стабильно растет с увеличением числа уровней. При этом минимум деформации наблюдается для компаунда с 80%-ным содержанием наполнителя, хотя для 70 и 60%-ного содержания значения деформации различаются незначительно (рис. 5, а).

Механические напряжения, вызванные ускорением, также незначительны по сравнению с напряжениями, вызванными воздействием температуры (на четыре порядка ниже). При этом значение вызванных ускорением напряжений повышается с увеличением количества уровней и практически не зависит от количества наполнителя во внешней части уровня. Так же как и возникающая под действием ускорения деформация, механические напряжения, обусловленные ускорением, ниже для герметизации микросборки, когда внешний компаунд расположен только по периметру уровней (рис. 5, б).

Заключение. Результаты моделирования показали, что использование двух типов компаунда позволяет значительно снизить уровень температурной деформации в микросборке (в 1,5–2 раза), если для герметизации кристалла использовать компаунд с высоким содержанием наполнителя, а для герметизации внешнего контура микросборки – компаунд, приближенный по свойствам к материалу подложек. Кроме того, компаунд с меньшим количеством наполнителя менее вязкий и может быть использован для герметизации путем заливки, а не опрессовки. При этом полностью покрывать уровень микросборки компаундом с количеством наполнителя менее 80 % не имеет смысла. Данный подход эффективен только при малом числе уровней, к тому же увеличиваются габариты микросборки. Гораздо эффективнее применять менее наполненный компаунд только на периферии уровня. Однако при использовании во внешней части микросборки менее наполненного компаунда следует также учитывать требования к механическим напряжениям, поскольку уменьшение количества наполнителя ведет к увеличению термических напряжений. Отметим, что на напряжения, вызванные ускорением, уменьшение количества наполнителя до 60 % практически не влияет.

Таким образом, температурные и вызванные ускорением деформации и напряжения по-разному зависят от числа уровней и количества наполнителя, поэтому при проектировании конкретной трехмерной микросборки следует, прежде всего, исходить из предъявляемых к ней требований. Для подтверждения результатов теоретических исследований и представленных рекомендаций коллектив авторов планирует провести ряд экспериментов.

Литература

1. **Plante J., Shaw H.** Evaluation of 3D Plus packaging test structures for NASA Goddard Space Flight Center // Proceedings of the European Space Components Conference, ESCCON 2002 (24–27 September 2002, Toulouse, France). Noordwijk: ESA Publ. Div., 2002. P. 213.
2. **Федоров М.** Высокотехнологичные микросхемы памяти 3D Plus // Компоненты и технологии. 2006. № 9 (62). С. 72–75.
3. US Patent US20020100600A1. Stackable microcircuit layer formed from a plastic encapsulated microcircuit and method of making the same / **D. Albert, K. Gann**; assignees: Irvine Sensors Corporation, Nytell Software LLC; filed: 26.01.2001; publ.: 01.08.2002.
4. Wafer Level Packaging reaches new heights...: Press release // Yole Développement: [электронный ресурс]. 2020. URL: http://www.yole.fr/Advanced_Packaging_Monitor_Q1.aspx (дата обращения: 24.11.2021).
5. Materials for advanced packaging / ed.: **D. Lu, C. P. Wong**. 2nd ed. Cham: Springer, 2017. 974 p.
6. Development of Via in Mold (ViM) for embedded wafer level package (EWMLP) / **Soon Wee Ho, Myo Ei Pa Pa, M. D. Fernandez et al.** // 2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE, 2011. P. 417–422. doi: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2011.6184457>
7. Opportunities of Fan-out Wafer Level Packaging (FOWLP) for RF applications / **T. Braun, M. Töpfer, K.-F. Becker et al.** // 2016 IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). Austin, TX: IEEE, 2016. P. 35–37. doi: <https://doi.org/10.1109/SIRF.2016.7445461>
8. **Gotro J.** Polymers in electronic packaging. Part 4: Molding process for epoxy mold compounds for fan-out wafer level packaging // Polymer Innovation Blog: [электронный ресурс] / Jeffrey Gotro. 17.04.2017. URL: <https://polymerinnovationblog.com/polymers-electronic-packaging-part-four-molding-process-epoxy-mold-compounds-fan-wafer-level-packaging/> (дата обращения: 24.11.2021).
9. Effects of high-temperature storage on the elasticity modulus of an epoxy molding compound / **R. Li, D. Yang, P. Zhang et al.** // Materials. 2019. Vol. 12 (4). Art. No. 684. doi: <https://doi.org/10.3390/ma12040684>
10. High thermal conductive epoxy molding compound with thermal conductive pathway / **J. Zeng, R. Fu, Yu. Shen et al.** // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 113. Iss. 4. P. 2117–2125. doi: <https://doi.org/10.1002/app.30045>
11. **Курин С. В., Шафигуллин Л. Н., Лахно А. В., Бобрышев А. А.** Полимерные композиты с высокими упруго-прочностными характеристиками. Пенза: ПГУАС, 2016. 124 с.
12. **Chao S., Liaw Y., Chou J.-H.** The effects of filler shape, type, and size on the properties of encapsulation molding components // Electronics. 2021. Vol. 10 (2). Art. No. 98. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10020098>
13. Development of mold compounds with ultralow coefficient of thermal expansion and high glass transition temperature for fan-out wafer-level packaging / **V. Carias, J. Thompson, Ph. Myers, Jr. et al.** // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2015. Vol. 5. No. 7. P. 921–929. doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2443072>
14. **Chung S.-L., Lin J.-S.** Thermal conductivity of epoxy resin composites filled with combustion synthesized h-BN particles // Molecules. 2016. Vol. 21 (5). Art. ID: 670. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules21050670>
15. **Shibuya M., Nguyen L.** High thermal conductivity mold compounds for advanced packaging applications // 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, FL: IEEE, 2017. P. 1334–1339. doi: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2017.296>

Статья поступила в редакцию 02.07.2021 г.; одобрена после рецензирования 02.07.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Вертянов Денис Васильевич – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vdv.vertyanov@gmail.com

Беляков Игорь Андреевич – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), igor-terra@yandex.ru

Погудкин Антон Владимирович – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), a.pogudkin@mail.ru

Тимошенко 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), spt111@mail.ru

Сидоренко Виталий Николаевич – руководитель сборочного производства АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, 6), sidorenko@zntc.ru

References

1. Plante J., Shaw H. Evaluation of 3D plus packaging test structures for NASA Goddard Space Flight Center. *Proceedings of the European Space Components Conference, ESCCON 2002 (24–27 September 2002, Toulouse, France)*. Noordwijk, ESA Publ. Div., 2002, p. 213.
2. Fedorov M. Technology-packed 3D Plus memory chips. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2006, no. 9 (62), pp. 72–75. (In Russian).
3. Albert D., Gann K. *Stackable microcircuit layer formed from a plastic encapsulated microcircuit and method of making the same*. Patent US20020100600A1 United States, filed 26.01.2001, publ. 01.08.2002.
4. Wafer Level Packaging reaches new heights... Press release. *Yole Développement*. Available at: http://www.yole.fr/Advanced_Packaging_Monitor_Q1.aspx (accessed: 24.11.2021).
5. Lu D., Wong C. P. (eds.). *Materials for advanced packaging*. 2nd ed. Cham, Springer, 2017. 974 p.
6. Soon Wee Ho, Myo Ei Pa Pa, Fernandez M. D., Wen Sheng Lee, Ser Choong Chong, Hyoung Joon Kim, Damaruganath P., Shan G. Development of Via in Mold (ViM) for embedded wafer level package (EWMLP). *2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference*. Singapore, IEEE, 2011, pp. 417–422. doi: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2011.6184457>
7. Braun T., Töpfer M., Becker K.-F., Wilke M., Huhn M., Maass U., Ndip I., Aschenbrenner R., Lang K.-D. Opportunities of Fan-out Wafer Level Packaging (FOWLP) for RF applications. *2016 IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*. Austin, TX, IEEE, 2016, pp. 35–37. doi: <https://doi.org/10.1109/SIRF.2016.7445461>
8. Gotro J. Polymers in electronic packaging, part 4: Molding process for epoxy mold compounds for fan-out wafer level packaging. *Polymer Innovation Blog*. Available at: <https://polymerinnovationblog.com/polymers-electronic-packaging-part-four-molding-process-epoxy-mold-compounds-fan-wafer-level-packaging/> (accessed: 24.11.2021).
9. Li R., Yang D., Zhang P., Niu F., Cai M., Zhan G. Effects of high-temperature storage on the elasticity modulus of an epoxy molding compound. *Materials*, 2019, vol. 12 (4), art. no. 684. doi: <https://doi.org/10.3390/ma12040684>
10. Zeng J., Fu R., Shen Yu., He H., Song X. High thermal conductive epoxy molding compound with thermal conductive pathway. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 113, iss. 4, pp. 2117–2125. doi: <https://doi.org/10.1002/app.30045>
11. Kurin S. V., Shafigullin L. N., Lakhno A. V., Bobryshev A. A. *Polymer composites with high elastic-strength characteristics*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2016. 124 p. (In Russian).
12. Chao S., Liaw Y., Chou J.-H. The effects of filler shape, type, and size on the properties of encapsulation molding components. *Electronics*, 2021, vol. 10 (2), art. no. 98. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10020098>
13. Carias V., Thompson J., Myers Ph., Jr, Racz L. M., Toomey R., Wang J. Development of mold compounds with ultralow coefficient of thermal expansion and high glass transition temperature for fan-out wafer-level packaging. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, vol. 5, no. 7, pp. 921–929. doi: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2443072>
14. Chung S.-L., Lin J.-S. Thermal conductivity of epoxy resin composites filled with combustion synthesized h-BN particles. *Molecules*, 2016, vol. 21 (5), art. ID: 670. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules21050670>

15. Shibuya M., Nguyen L. High thermal conductivity mold compounds for advanced packaging applications. *2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. Orlando, FL, IEEE, 2017, pp. 1334–1339. doi: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2017.296>

The article was submitted 02.07.2021; approved after reviewing 02.07.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Denis V. Vertyanov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vdv.ertyanov@gmail.com

Igor A. Belyakov – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), igor-terra@yandex.ru

Anton V. Pogudkin – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), a.pogudkin@mail.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt111@mail.ru

Vitaly N. Sidorenko – Mounting Production Manager, JSC “Zelenograd Nanotechnology Center” (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), sidorenko@zntc.ru

Внимание 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 «Урал-Пресс Округ»: www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: www.ivis.ru

Отсекающий УФ-светофильтр для предотвращения отрицательного наклона стенок мастер-штампа мягкой литографии

Т. А. Радзиевская^{1,2}, Н. Н. Иванов³, С. А. Тарасов²

¹ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
г. Санкт-Петербург, Россия

tamaramanvelova239@mail.ru

Аннотация. Для решения проблемы формообразования неспециализированных полимеров применяются микро- и нанoeлектронные технологии нового поколения, например наноимпринтная литография. Частный случай наноимпринтной литографии – мягкая литография, которая включает в себя формирование топологии с использованием мягкого штампа, изготовленного путем оттиска (импринта) жесткого мастер-штампа. Следовательно, проработка возможности самостоятельного изготовления мастер-штампов для формирования оптоэлектронных шин печатных плат нового поколения из неспециализированных полимерных материалов общего применения является актуальной задачей. В работе для рационализации затрат на приобретение дорогостоящего жесткого мастер-штампа мягкой литографии разработан и реализован оригинальный технологический процесс изготовления мастер-штампа на основе фоторезиста SU-8. В ходе отработки предложенного технологического процесса определена причина формирования отрицательного наклона (T-topping) стенок мастер-штампа мягкой литографии. С целью исключения отрицательного наклона разработана и изготовлена серия отсекающих УФ-светофильтров для длин волн оптического излучения менее 350 нм. По экспериментальным данным измерений интенсивности УФ-излучения ртутной лампы *i*-линии автоматизированной установки совмещения и экспонирования EVG620 NIL построены зависимости ослабления интенсивности УФ-излучения от толщины функционального слоя разработанного УФ-светофильтра для длин волн оптического излучения 365 и 400 нм. Доказана эффективность применения разработанных УФ-светофильтров за счет устранения отрицательного наклона при проведении технологического процесса изготовления тестовой топологии мастер-штампа мягкой литографии. Мягкая литография позволит в перспективе создать печатные платы со встроенной оптоэлектронной шиной передачи данных в виде массива поли-

мерных планарных оптических волноводов и элементов ввода-вывода оптического излучения.

Ключевые слова: полимерный планарный оптический волновод, мастер-штамп мягкой литографии, фоторезист SU-8, отрицательный наклон стенок фоторезиста (T-topping), отсекающий УФ-светофильтр

Для цитирования: Радзиевская Т. А., Иванов Н. Н., Тарасов С. А. Отсекающий УФ-светофильтр для предотвращения отрицательного наклона стенок мастер-штампа мягкой литографии // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 41–49. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-41-49>

Original article

Cut-off UV light filter to prevent negative slope of the soft lithography hard mold walls

T. A. Radzievskaya^{1,2}, N. N. Ivanov³, S. A. Tarasov²

¹*JSC “Avangard”, Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russia*

³*Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia*

tamaramanvelova239@mail.ru

Abstract. The general-purpose polymers formation issues are solved using micro- and nanoelectronic technologies of new generation, for example a nanoimprint lithography. One of its subspecies, soft lithography, includes topology formation using soft master die fabricated by hard mold imprint. Therefore, engineering study of possibility of hard molds self-dependent fabrication for the purposes of optoelectronic data bus formation for new generation printed circuit boards using general-purpose polymer materials is a priority. In this work, to rationalize the purchasing cost of an expensive hard mold of soft lithography, an original technological process for a hard mold fabrication based on the SU-8 photoresist has been developed and implemented. During the performing of the proposed technological process, the reason for the negative slope (T-topping) formation of soft lithography hard mold walls made of SU-8 photoresist was determined. A series of cut-off UV filters for optical wavelengths less than 350 nm has been developed and fabricated to eliminate T-topping. Based on the UV radiation intensity experimental measurements data from the *i*-line mercury lamp of the automated alignment and exposure system EVG620 NT, the UV radiation intensity attenuation dependences on the functional layer thickness of the developed optical UV filter for 365 and 400 nm wavelengths are plotted. The developed UV filters application effectiveness has been proven due to T-topping elimination during the technological process of producing the soft lithography hard mold test topology. The use of soft lithography will make it possible in the future to create a new generation printed circuit boards with a built-in optoelectronic data bus in the form of a polymer planar optical waveguides array and optical input / output elements.

Keywords: polymer planar optical waveguide, soft lithography hard mold, photoresist SU-8, photoresist negative slope (T-topping), cut-off UV filter

For citation: Radzievskaya T. A., Ivanov N. N., Tarasov S. A. Cut-off UV light filter to prevent negative slope of the soft lithography hard mold walls. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 41–49. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-41-49>

Введение. Рост объемов данных, передаваемых в высокопроизводительных вычислительных комплексах, создает условия для развития новых систем передачи данных, например печатных плат нового поколения с внедренными оптоэлектронными шинами передачи данных [1]. Предполагается, что базовыми компонентами такой оптоэлектронной шины будут массив полимерных планарных оптических волноводов и элементы ввода-вывода излучения [2].

Одна из основных задач при создании коммутационной среды нового поколения – разработка технологии формирования встроенных оптических компонентов с учетом соответствия условиям производства традиционных печатных плат. Полимерные материалы [3–6], характеризующиеся высокой оптической прозрачностью на длинах волн 850, 1330, 1500 нм, могут заменить традиционные полупроводниковые или диэлектрические материалы [2, 3] при изготовлении оптических волноводов оптоэлектронной шины. Отдельный интерес представляет использование неспециализированных полимеров общего применения при формировании оптоэлектронной шины печатной платы, так как они имеют сравнительно низкую стоимость. Основным недостатком неспециализированных полимеров заключается в отсутствие возможности УФ-отверждения.

Решением проблемы формообразования неспециализированных полимеров является применение микро- и нанoeлектронных технологий нового поколения, например наномпринтной литографии. Частный случай наномпринтной литографии – мягкая литография [7], которая включает в себя формирование топологии с использованием мягкого штампа, изготовленного путем оттиска (импринта) жесткого мастер-штампа. Однако стоимость мастер-штампов высокая, поэтому проработка возможности их изготовления для формирования оптоэлектронных шин печатных плат из неспециализированных полимерных материалов общего применения актуальна.

Особенности изготовления мастер-штампа мягкой литографии. Схема разработанного технологического процесса изготовления мастер-штампа приведена на рис. 1. Для создания топологии жесткого мастер-штампа широко применяется фоторезист SU-8 с учетом последующих этапов формирования полимерных планарных оптических волноводов из полимера полидиметилсилоксана [8, 9].

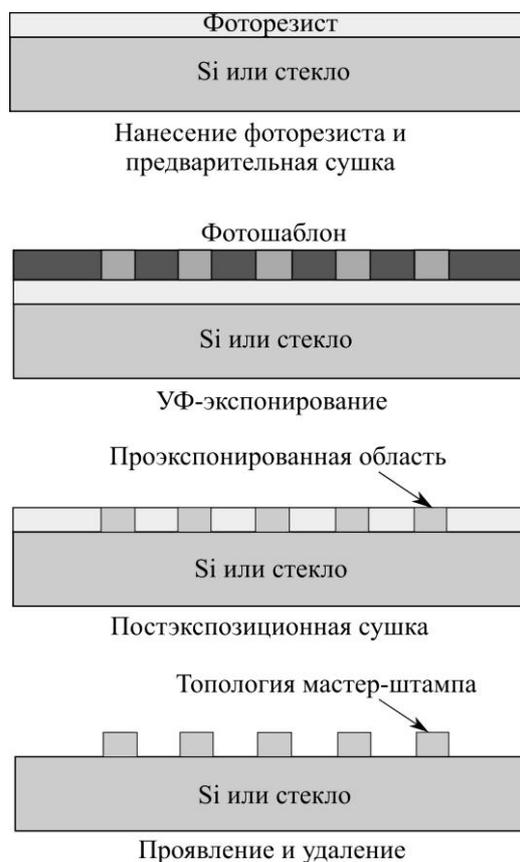


Рис. 1. Схема изготовления мастер-штампа
Fig. 1. Hard mold fabrication scheme

В ходе отработки технологического процесса формирования мастер-штампа отмечено возникновение на этапе УФ-экспонирования отрицательного наклона вертикальных стенок фоторезистивной маски. Данный негативный эффект называется «T-topping» в соответствии с формой образования «наростов» в приповерхностном слое фоторезиста (рис. 2) [10]. На рис. 2 ФКГ – фотокислотный генератор фоторезиста SU-8 (соль триарилсульфония гексафторантимоната) [11, 12].

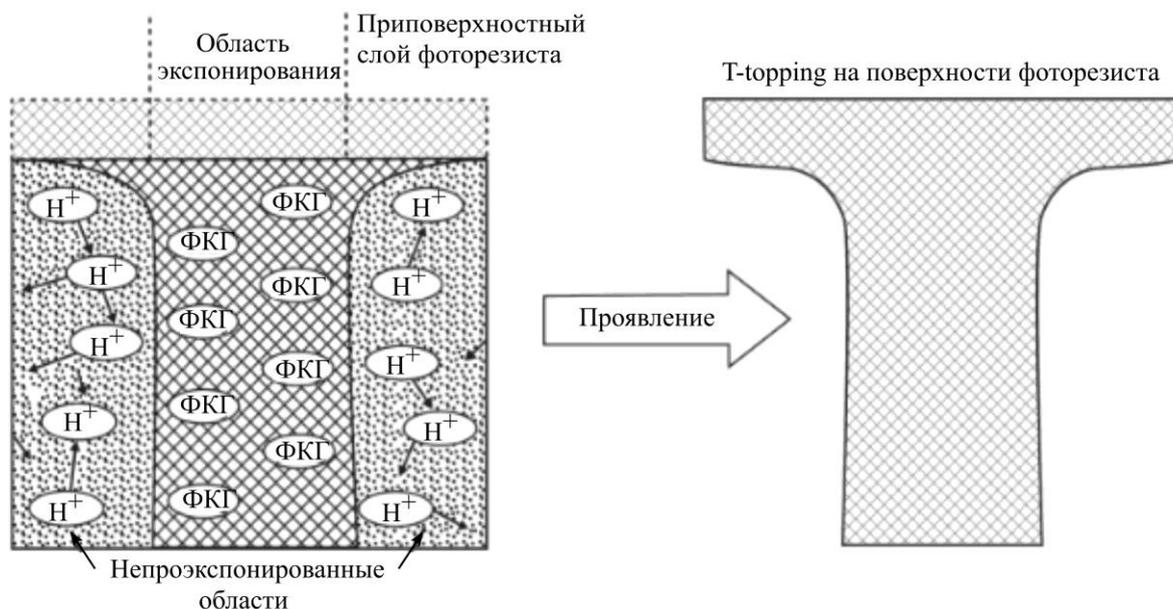


Рис. 2. Схема возникновения отрицательного наклона стенок фоторезистивной маски
 Fig. 2. Masking photoresist walls T-topping occurrence scheme

Причина возникновения отрицательного наклона заключается в избыточном поглощении широкополосного УФ-излучения с длиной волны менее 350 нм при экспонировании топологии мастер-штампа [11]. Из-за протекающих фотохимических реакций при избыточном поглощении оптического излучения в приповерхностном слое происходит локальное переэкспонирование фоторезиста [10, 12]. Согласно технологической документации на фоторезист SU-8, с целью исключения условий возникновения отрицательного наклона рекомендуется проводить экспонирование фоторезиста через отсекающие УФ-светофильтры [11, 12]. Принцип работы УФ-светофильтров основан на избирательной фильтрации спектра ртутной лампы и исключении длин волн менее 350 нм. Отметим, что такие отсекающие УФ-светофильтры имеют высокую стоимость.

Разработка светофильтра оригинальной конструкции. Для минимизации затрат в ходе исследования разработан УФ-светофильтр оригинальной конструкции, обеспечивающий отсеечение длин волн менее 350 нм УФ-спектра ртутной лампы *i*-линии, которая используется при экспонировании фоторезиста SU-8 [13]. Конструкция разработанного УФ-светофильтра включает в себя стеклянное основание из кварцевого стекла с нанесенным функциональным слоем фоторезиста SU-8 определенной толщины.

Для экспериментальной оценки зависимости ослабления интенсивности УФ-излучения от толщины функционального слоя отсекающего УФ-светофильтра оригинальной конструкции созданы светофильтры с различными толщинами функционального слоя фоторезиста SU-8. Затем с помощью двухканального измерителя интенсивности АВМ Model 150 определены интенсивности излучения УФ-лампы автоматизированной установки совмещения и экспонирования EVG620 NIL на длинах волн 365 и 400 нм

без светофильтра через УФ-светофильтры оригинальной конструкции, а также через стеклозаготовку УФ-светофильтра без слоя фоторезиста SU-8. Результаты измерений представлены в таблице.

Результаты измерений интенсивности УФ-излучения, мВт/см²
UV intensity measurement results, mW/cm²

№ п/п	Толщина слоя фоторезиста SU-8, мкм									
	Без светофильтра		25		60		40		0	
	Длина волны λ, нм									
	365	400	365	400	365	400	365	400	365	400
1	31,29	75,31	21,05	62,8	–	–	–	–	–	–
2	31,23	75,22	20,13	61,44	17,09	58,92	–	–	–	–
3	31,09	75,13	19,86	60,26	16,88	58,68	18,18	59,24	–	–
4	31,08	74,82	19,18	60,92	16,61	58,72	17,52	58,82	27,04	68,49

Из таблицы следует, что для каждой длины волны наибольшая интенсивность УФ-излучения детектируется при отсутствии светофильтра, а затем при увеличении толщины функционального слоя УФ-светофильтра интенсивность убывает.

Пусть зависимость ослабления интенсивности УФ-излучения от толщины функционального слоя УФ-светофильтра имеет вид функции $f(x, \lambda)$, где x – толщина функционального слоя УФ-светофильтра, λ – длина волны УФ-излучения. Тогда

$$f(x, \lambda) = \frac{I_{\text{сф}}(x, \lambda)}{I_{\text{сф}}(0, \lambda)},$$

где $I_{\text{сф}}(x, \lambda)$ – измеренная интенсивность УФ-излучения, мВт/см², с длиной волны λ , которая проходит через УФ-светофильтр с толщиной x функционального слоя; $I_{\text{сф}}(0, \lambda)$ – измеренная интенсивность УФ-излучения, мВт/см², с длиной волны λ , которая проходит через стеклозаготовку УФ-светофильтра без функционального слоя.

Далее для длин волн 365 и 400 нм построены отдельные точечные зависимости $f(x, \lambda)$ по ранее измеренным данным из таблицы (рис. 3). Эти зависимости аппроксимированы логарифмической функцией вида:

$$f(x, \lambda) = C_1(\lambda) \cdot \ln(x) + C_2(\lambda),$$

где $C_1(\lambda)$ и $C_2(\lambda)$ – коэффициенты, зависящие от длины волны УФ-излучения.

Из построенных логарифмических аппроксимационных зависимостей следует, что для длины волны 365 нм коэффициенты $C_1(\lambda)$ и $C_2(\lambda)$ равны 0,2501 и 0,6099, а для 400 нм – 0,0491 и 0,9716 соответственно. Таким образом, для длины волны 365 нм и отсекающего УФ-светофильтра с толщиной функционального слоя 25 мкм величина ослабления интенсивности УФ-излучения составит 1,4149.

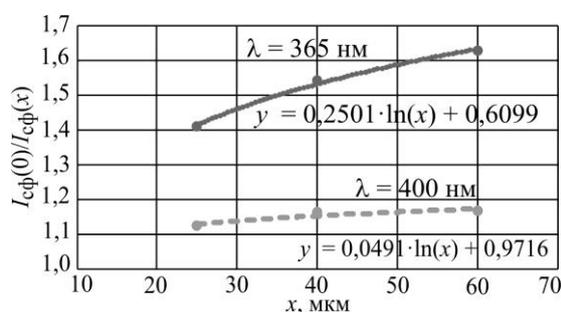


Рис. 3. Зависимость ослабления интенсивности УФ-излучения от толщины функционального слоя УФ-светофильтра

Fig. 3. Dependence of the UV intensity attenuation on the UV filter functional layer thickness

Проверка эффективности отсекающего УФ-светофильтра. Для проверки эффективности применения отсекающего УФ-светофильтра оригинальной конструкции изготовлен тестовый образец мастер-штампа из фоторезиста SU-8. С целью отработки различных условий и режимов на этапе УФ-экспонирования пластина мастер-штампа разделена на четыре сектора, два из которых проэкспонированы через УФ-светофильтр оригинальной конструкции при различных значениях интенсивности УФ-излучения, а другие два – без использования УФ-светофильтра при ранее экспериментально подобранной оптимальной интенсивности излучения. На рис. 4 представлен процесс автоматизированного совмещения перед экспонированием мастер-штампа через УФ-светофильтр с использованием секторной заслонки на 1/4 подложки на автоматизированной установке совмещения и экспонирования EVG 620 NIL. В результате проведения последующих операций изготовлены тестовые топологии мастер-штампа, увеличенные изображения которых представлены на рис. 5.

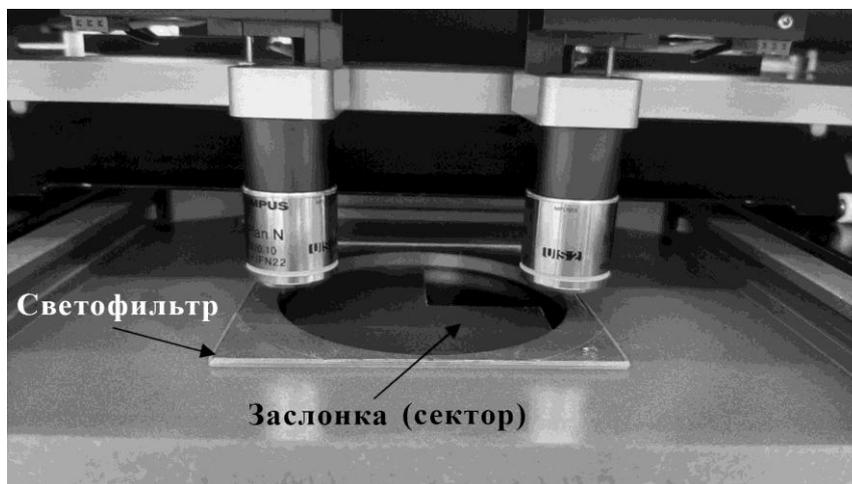


Рис. 4. Процесс экспонирования сектора мастер-штампа с использованием УФ-светофильтра

Fig. 4. The hard mold sector exposing process using the UV light filter

Тестовая топология мастер-штампа на рис. 5, а в отличие от топологии на рис. 5, б сформирована при экспонировании широкополосным УФ-излучением без использования отсекающего УФ-светофильтра оригинальной конструкции, что привело к возникновению отрицательного наклона в виде «наростов» в приповерхностном слое фоторезиста. При этом на рис. 5, б отсутствует отрицательный наклон в тестовой топологии мастер-штампа, проэкспонированной через УФ-светофильтр, что подтверждает эффективность применения разработанного светофильтра. Кроме того, интенсивность излучения для приведенного на рис. 5, б сектора топологии мастер-штампа в 1,4 раза больше по сравнению с ранее определенной оптимальной интенсивностью излучения. Следовательно, для разработанного УФ-светофильтра с функциональным слоем толщиной 25 мкм подтверждена обоснованность определенной аппроксимационной зависимости.

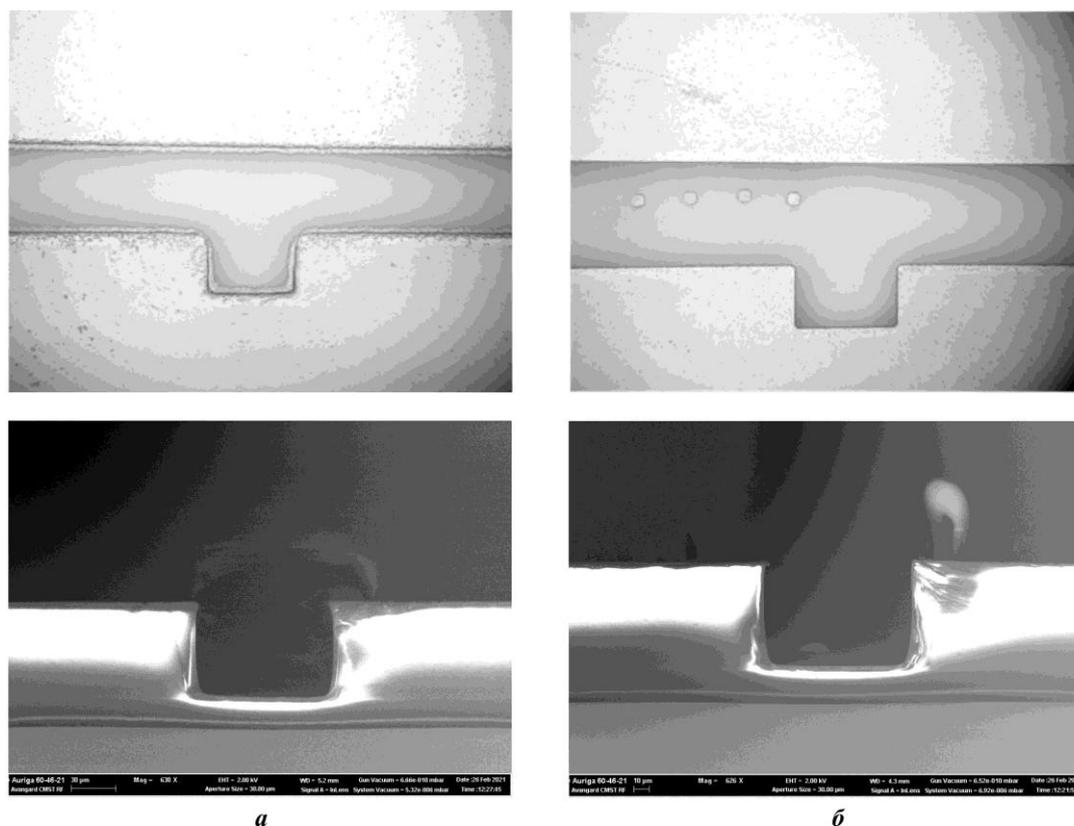


Рис. 5. Вид сверху и РЭМ-изображения поперечного сечения тестовых топологий мастер-штампа, сформированных при ранее определенной оптимальной мощности экспонирования (а) и с применением УФ-светофильтра (б)

Fig. 5. Top view and cross-sectional SEM images of hard mold test topologies: *a* – formed at the previously determined optimal exposure power; *b* – formed using the UV light filter

Заключение. В результате проведенных исследований выявлено, что при изготовлении мастер-штампа мягкой литографии из фоторезиста SU-8 для формирования полимерных планарных оптических волноводов необходимо исключить факторы возникновения отрицательного наклона стенок фоторезистивной маски. Установлена основная причина возникновения отрицательного наклона – это экспонирование фоторезиста SU-8 с применением широкополосного УФ-излучения ртутной лампы *i*-линии. УФ-спектр такой ртутной лампы включает в себя длины волн менее 350 нм, которые провоцируют появление отрицательного наклона стенок фоторезистивной маски.

Разработанный отсекающий УФ-светофильтр оригинальной конструкции доказал свою эффективность. При использовании данного светофильтра исключается отрицательный наклон в отдельных секторах тестового образца мастер-штампа, которые проэкспонированы широкополосным УФ-излучением ртутной лампы *i*-линии. Кроме того, экспериментально подтверждено рассчитанное теоретически значение ослабления УФ-излучения при прохождении через УФ-светофильтр с толщиной функционального слоя 25 мкм.

Полученные результаты имеют решающее значение для рационализации процесса изготовления полимерных планарных оптических волноводов с пониженным уровнем потерь для оптоэлектронных шин печатных плат нового поколения. Затраты на их изготовление минимизируются за счет применения неспециализированных полимерных материалов и технологии мягкой литографии с самостоятельным изготовлением мастер-штампов.

Литература

1. **Ахманов А. С., Наний О. Е., Панченко В. Я.** Оптическая передача информации в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах. Ч. 1 // *Lightwave Russian Ed.* 2008. № 3. С. 46–53.
2. **Miller S. E.** Integrated optics: An introduction // *The Bell System Technical Journal.* 1969. Vol. 48. No. 7. P. 2059–2069. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x>
3. **Cai D.** Optical and mechanical aspects on polysiloxane based electrical-optical-circuits-board: Dr. Sci. (Eng.) diss. Dortmund, 2008. 129 p. doi: <https://doi.org/10.17877/DE290R-8242>
4. **Cai D., Neyer A.** Polydimethylsiloxane (PDMS) based optical interconnect with copper-clad FR4 substrates // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2011. Vol. 160. Iss. 1. P. 777–783. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.08.062>
5. **Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P., Mikulik P.** Properties of multimode optical epoxy polymer waveguides deposited on silicon and TOPAS substrate // *Radioengineering.* 2017. Vol. 26. No. 1. P. 10–15. doi: <https://doi.org/10.13164/re.2017.0010>
6. **Immonen M., Karppinen M., Kivilahti J. K.** Fabrication and characterization of polymer optical waveguides with integrated micromirrors for three-dimensional board-level optical interconnects // *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing.* 2005. Vol. 28. No. 4. P. 304–311. doi: <https://doi.org/10.1109/TEPM.2005.856538>
7. **Zhou W.** Nanoimprint lithography: An enabling process for nanofabrication. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. XIII, 249 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34428-2>
8. **Cai Z., Qiu W., Shao G., Wang W.** A new fabrication method for all-PDMS waveguides // *Sensors and Actuators A: Physical.* 2013. Vol. 204. P. 44–47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.019>
9. **Manvelova T. A., Tarasov S. A., Ivanov N. N.** Polymer optoelectronic bus for high-speed data transmission systems // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1400. Iss. 6. Art. No. 066051. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066051>
10. **Радзиевская Т. А., Ламкин И. А., Тарасов С. А., Иванов Н. Н.** Технологические способы снижения факторов роста поверхностных дефектов полимерных планарных оптических волноводов // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2021. Т. 64. № 6. С. 469–476. doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476>
11. **Madou M. J.** Fundamentals of microfabrication and nanotechnology. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 1992 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315274164>
12. *Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications / ed. S. K. Mitra, S. Chakraborty.* Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 624 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b11188>
13. **Радзиевская Т. А., Иванов Н. Н., Тарасов С. А.** Подходы к снижению потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах // *Труды учебных заведений связи.* 2021. Т. 7. № 1. С. 31–40. doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40>

Статья поступила в редакцию 30.09.2021 г.; одобрена после рецензирования 30.09.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Радзиевская Тамара Александровна – ведущий инженер-технолог ОАО «Авангард» (Россия, 195271, г. Санкт-Петербург, Кондратьевский пр-т, 72), аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), tamaramanvelova239@mail.ru

Иванов Николай Николаевич – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (Россия, 193232, г. Санкт-Петербург, пр-т Большевиков, 22/1), ivanov.2nik@yandex.ru

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук, директор департамента науки, заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), satarasov@mail.ru

References

1. Akhmanov A. S., Naniy O. E., Panchenko V. Ya. Optical transmission of information in supercomputers and microprocessor systems. Part 1. *Lightwave Russian Ed.*, 2008, no. 3, pp. 46–53. (In Russian).
2. Miller S. E. Integrated optics: An introduction. *The Bell System Technical Journal*, 1969, vol. 48, no. 7, pp. 2059–2069. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x>
3. Cai D. *Optical and mechanical aspects on polysiloxane based electrical-optical-circuits-board*. Dr. Sci. (Eng.) diss. Dortmund, 2008. 129 p. doi: <https://doi.org/10.17877/DE290R-8242>
4. Cai D., Neyer A. Polydimethylsiloxane (PDMS) based optical interconnect with copper-clad FR4 substrate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, vol. 160, iss. 1, pp. 777–783. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.08.062>
5. Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P., Mikulik P. Properties of multimode optical epoxy polymer waveguides deposited on silicon and TOPAS substrate. *Radioengineering*, 2017, vol. 26, no. 1, pp. 10–15. doi: <https://doi.org/10.13164/re.2017.0010>
6. Immonen M., Karppinen M., Kivilahti J. K. Fabrication and characterization of polymer optical waveguides with integrated micromirrors for three-dimensional board-level optical interconnects. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2005, vol. 28, iss. 4, pp. 304–311. doi: <https://doi.org/10.1109/TEPM.2005.856538>
7. Zhou W. *Nanoimprint lithography: An enabling process for nanofabrication*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013. xiii, 249 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34428-2>
8. Cai Z., Qiu W., Shao G., Wang W. A new fabrication method for all-PDMS waveguides. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 204, pp. 44–47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.019>
9. Manvelova T. A., Tarasov S. A., Ivanov N. N. Polymer optoelectronic bus for high-speed data transmission systems. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1400, iss. 6, art. no. 066051. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066051>
10. Radzievskaya T. A., Lamkin I. A., Tarasov S. A., Ivanov N. N. Technological methods for reducing the growth factors of surface defects in polymer planar optical waveguides. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 469–476. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476>
11. Madou M. J. *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology*. 3rd ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011. 1992 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315274164>
12. Mitra S. K., Chakraborty S. (eds.) *Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011. 624 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b11188>
13. Radzievskaya T., Ivanov N., Tarasov S. The reducing approaches of scattering losses in polymer planar optical waveguides. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi = Proc. of Telecom. Universities*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 31–40. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2021-7-1-31-40>

The article was submitted 30.09.2021; approved after reviewing 30.09.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Tamara A. Radzievskaya – Leading Process Engineer of the JSC “Avangard” (Russia, 195271, Saint Petersburg, Kondratievskiy ave., 72), PhD student Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), tamaramanvelova239@mail.ru

Nikolay N. Ivanov – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research of the Institute of Magistracy, Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (Russia, 193232, Saint Petersburg, Bolshevnikov ave., 22/1), ivanov.2nik@yandex.ru

Sergey A. Tarasov – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Science Department, Head of Photonics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), satarasov@mail.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья

УДК [621.383.292:546.28]:535.12:535.23

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58

Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя

*В. Б. Залесский¹, И. Р. Гулаков², А. О. Зеневич²,
О. В. Кочергина², В. С. Цымбал³*

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск,
Республика Беларусь

²Белорусская государственная академия связи, г. Минск,
Республика Беларусь

³ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
г. Минск, Республика Беларусь

o.kochergina@bsac.by

Аннотация. При реализации такой технологии передачи данных, как Li-Fi, требуются фотоприемники, чувствительные к оптическому излучению в видимом диапазоне длин волн. Лучшую чувствительность в этом диапазоне длин волн проявляют вакуумные фотоэлектронные умножители. Однако они имеют большие габариты, высокие напряжения питания и являются достаточно хрупкими. Альтернатива вакуумным фотоэлектронным умножителям – кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ), характеризующиеся хорошей чувствительностью в видимом диапазоне длин волн. В работе исследована пропускная способность оптического канала связи с приемником информации в виде Si-ФЭУ. Получено, что наибольшее значение пропускной способности соответствует значению напряжения питания, равному напряжению пробоя Si-ФЭУ и длине волны оптического излучения 470 нм. Установлено, что повышение температуры приводит к уменьшению пропускной способности фотоприемника, а увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов – к росту пропускной способности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических систем связи.

Ключевые слова: пропускная способность, кремниевый фотоэлектронный умножитель, длина волны оптического излучения, температура, энергетическая экспозиция регистрируемого оптического излучения

Для цитирования: Исследование пропускной способности оптического канала с приемником информации в виде кремниевого фотоэлектронного умножителя / В. Б. Залесский, И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 50–58. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58>

Original article

Investigation of the optical communication channel throughput with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier

V. B. Zalessky¹, I. R. Gulakov², A. O. Zenevich²,
O. V. Kochergina², V. S. Tsymbal³

¹SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, Belarus

²Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

³JSC “Integral” – “Integral” Holding Management Company, Minsk, Belarus

o.kochergina@bsac.by

Abstract. The implementation of such technology of data transmission as Li-Fi requires photodetectors that are optically sensitive in the visible range of wavelengths. The photomultiplier tubes are characterized by highest sensibility in this wavelength range, but also by large size, higher power supply voltage, and frangibility. An alternative to the mentioned type of photodetectors is a silicon photomultiplier tube (Si-PMT) characterized by good sensibility in the visible range of wavelengths. In this work, the throughput of an optical communication channel with an information receiver in the form of a Si-PMT is investigated. As a result, it was found that the highest throughput value corresponded to the supply voltage value equal to the breakdown voltage of the Si-PMT, and to the optical radiation wavelengths of 470 nm. It has been established that an increase in temperature causes a decrease in the transmission capacity of the photodetector, and an increase in the optical pulses’ radiant exposure leads to an increase in the transmission capacity. The results obtained can be used in the development of optical communication systems.

Keywords: bandwidth throughput, silicon photomultiplier, optical radiation wavelength, temperature, registered light emission radiant exposure

For citation: Zalessky V. B., Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Tsymbal V. S. Investigation of the optical communication channel throughput with an information receiver in the form of a silicon photomultiplier. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 50–58. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-50-58>

Введение. Технология Li-Fi [1–3] использует для передачи данных оптическое излучение видимого диапазона с длинами волн от 380 до 780 нм [3]. В связи с этим при реализации данной технологии требуются фотоприемники, чувствительные к оптическому излучению в видимом диапазоне длин волн. Лучшую чувствительность в этом диапазоне длин волн имеют вакуумные фотоэлектронные умножители. Однако эти фотоприемники характеризуются большими габаритами, высокими напряжениями пита-

ния и хрупкостью. В качестве альтернативы вакуумным фотоэлектронным умножителям применяются многоэлементные лавинные фотоприемники – кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ), которые не имеют указанных недостатков [4–6].

Современные технологии изготовления Si-ФЭУ позволяют реализовать следующие конструкции: 1) состоящие из набора $p-n$ -переходов с индивидуальными поверхностными резисторами; 2) с поверхностным переносом умножителей заряда от рабочих ячеек к индивидуальным стоковым контактам; 3) с общим $p-n$ -переходом и однородной чувствительной поверхностью [7–9]. Наиболее перспективной и освоенной промышленностью является первая из перечисленных конструкций, позволяющая обеспечивать большую площадь фоточувствительной поверхности, достаточно высокую чувствительность и большой динамический диапазон. Дальнейшее развитие технологии производства Si-ФЭУ направлено на повышение их быстродействия.

Одна из основных характеристик любой системы передачи информации – ее пропускная способность, которая определяется шириной полосы частот ΔF и отношением сигнал / шум ρ . В современных оптических системах передачи информации величины ΔF и ρ в основном определяются типом используемых в них фотоприемников, а также эксплуатационными параметрами этих фотоприемников [10]. На сегодняшний день отсутствуют сведения о том, каким образом влияют на пропускную способность оптического канала связи следующие эксплуатационные параметры Si-ФЭУ: напряжение питания; длина волны регистрируемого оптического излучения; энергетическая экспозиция оптических импульсов, применяемых для передачи данных.

Цель настоящей работы – определение зависимости пропускной способности оптического канала передачи информации на основе Si-ФЭУ от его напряжения питания, температуры окружающей среды, длины волны и энергетической экспозиция оптических импульсов.

Экспериментальная установка и методика исследования. В качестве объектов сравнения с Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) выбраны фотоприемники Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Данные фотоприемники имеют одинаковую конструкцию и аналогичные параметры (табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры исследуемых фотоприемников при температуре 293 К

Table 1

The main parameters of the studied photodetectors at a temperature of 293 K

Параметр	Ketek PM 3325	ON Semi FC 30035	Si-ФЭУ ОАО «Интеграл»
Размер активной области, мм ²	3 × 3	3 × 3	1,25 × 1,25
Длина волны для максимальной чувствительности λ_{\max} , нм	440–470	440–470	470
Напряжение пробоя, В	27,0	24,7	37,5
Коэффициент усиления	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁵ –10 ⁶
Максимальная чувствительность к излучению, А/Вт	1,1 · 10 ⁶	1,1 · 10 ⁶	1,5 · 10 ⁶

На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки для проведения исследований. В качестве источника оптического излучения используется светодиод с длиной волны $\lambda_{\max} = 470$ нм, соответствующей максимальной чувствительности Si-ФЭУ [11]. Питание светодиода осуществляется от источника постоянного напряжения ИП1. Оптическое излучение от светодиода поступает на модулятор, где

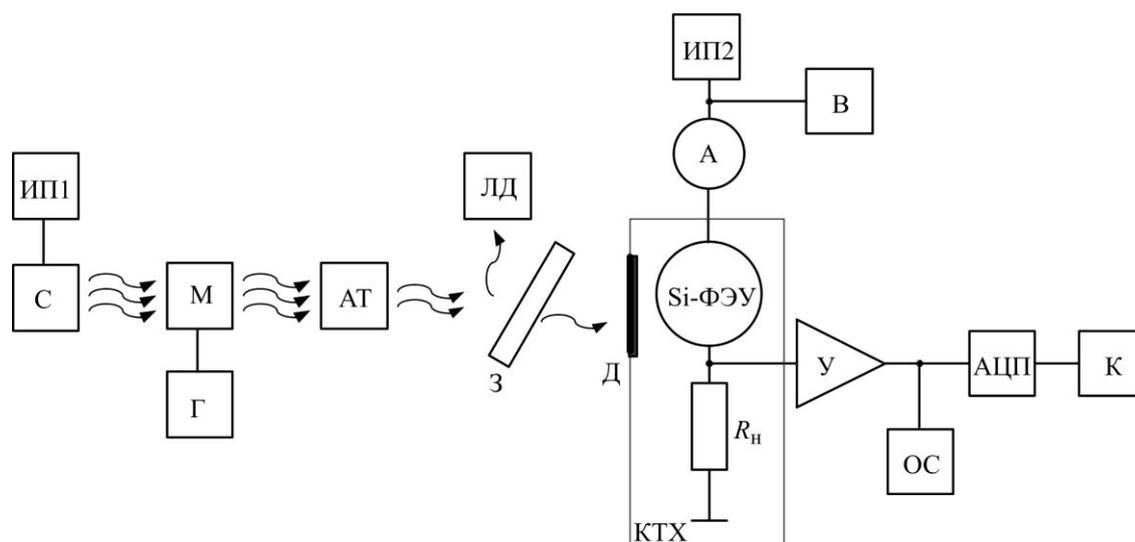


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: С – белый светодиод; М – модулятор; Г – генератор прямоугольных импульсов; СФ – светофильтр; АТ – аттенюатор; ЛД – лазерный дозиметр; Д – диафрагма; ИП1 и ИП2 – источники питания; А – амперметр; В – вольтметр; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер; КТХ – камера тепла и холода; ОС – осциллограф

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup: С – white LED; М – modulator; Г – generator of rectangular pulses; СФ – light filter; АТ – attenuator; ЛД – laser dosimeter; Д – diaphragm; ИП1 and ИП2 – power supplies; А – ammeter; В – voltmeter; У – amplifier; АЦП – analog-to-digital converter; К – computer; Si-ФЭУ – silicon photodetector; КТХ – heat and cold chamber; ОС – oscilloscope

модулируется путем подачи на его управляющий вход прямоугольных электрических импульсов, длительность которых изменяется от 50 до 1000 нс, а частота следования составляет 10^4 – 10^7 Гц. Во время электрического импульса на управляющем входе модулятора оптическое излучение поступает на вход аттенюатора, который позволяет ослабить мощность оптического излучения от 1 до 10^5 раз. С выхода аттенюатора излучение подается на полупрозрачное зеркало, пропускающее 50 % излучения, которое поступает через диафрагму на Si-ФЭУ. 50 % излучения зеркало отражает на лазерный дозиметр, который измеряет энергетическую экспозицию оптического сигнала. На Si-ФЭУ от источника питания ИП2 подается напряжение питания $U_{\text{пит}}$, которое контролируется вольтметром. Протекающий через Si-ФЭУ электрический ток измеряется амперметром.

Последовательно с Si-ФЭУ включен резистор нагрузки R_n . При регистрации оптических импульсов изменяется протекающий через Si-ФЭУ электрический ток, в результате чего на резисторе нагрузки формируются импульсы напряжения. Эти импульсы усиливаются усилителем и поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Вид электрических импульсов на выходе усилителя контролируется осциллографом. С помощью АЦП электрические импульсы оцифровываются и передаются в компьютер. С помощью программного обеспечения вычисляются средняя амплитуда пиковых значений электрических импульсов U_n , их среднее квадратичное отклонение σ и величина шума на выходе усилителя.

Диафрагма контролирует поступление импульсов на фотоприемник. Если диафрагма закрыта, то амперметр регистрирует темновой ток I_t . Если диафрагма открыта, то амперметр регистрирует общий ток $I_{t,ф}$, т. е. ток, протекающий через Si-ФЭУ и со-

стоящий из темнового тока и фототока. В процессе измерений определяли фототок: $I_{\text{ф}} = I_{\text{т.ф}} - I_{\text{т}}$.

Камера тепла и холода используется для изменения рабочей температуры Si-ФЭУ, а также для исключения их фоновой засветки. Рабочая температура Si-ФЭУ изменяется в диапазоне 233–313 К, так как в данном температурном диапазоне часто эксплуатируются приборы, созданные на основе Si-ФЭУ.

Пропускная способность S – максимальная скорость передачи информации по каналу связи – вычисляется согласно теореме Шеннона [11]:

$$S = \Delta F \log_2(1 + \rho) = \Delta F \log_2\left(1 + \frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma^2}\right),$$

где ΔF – ширина полосы частот; $\rho = U_{\text{п}}^2/2\sigma^2$ – отношение сигнал / шум; $U_{\text{п}}$ – среднее значение пикового напряжения сигнала; σ – среднее квадратичное отклонение напряжения шума.

Ширина полосы частот равна:

$$\Delta F = 1/(2\pi RC),$$

где R – последовательное сопротивление Si-ФЭУ; C – емкость Si-ФЭУ.

Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имеют разные напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$, то для сравнения их характеристик используется перенапряжение, определяемое как $\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}}$. Напряжение пробоя определяется по ВАХ Si-ФЭУ при закрытой диафрагме по методике, описанной в работе [12].

Результаты и их обсуждение. Напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ при температуре $T = 313$ К следующие: 27,3; 25,1; 37,7 В для Ketek PM 3325; ON Semi FC 30035; Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» соответственно. Уменьшение температуры приводит к снижению напряжения пробоя. Данная зависимость линейная. Коэффициент линейной зависимости k между $U_{\text{пр}}$ и T определяется как отношение изменения напряжения $\Delta U_{\text{пр}}$ к изменению температуры ΔT и равен 0,010; 0,014; 0,017 В/К для Ketek PM 3325; ON Semi FC 30035; Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» соответственно.

Минимальное значение резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 50$ Ом. При меньших значениях сопротивления для $\Delta U > 0$ В протекающий через Si-ФЭУ ток становится достаточно большим (≥ 10 мкА), что при длительной работе фотоэлектронного умножителя может привести к его тепловому пробоя. При $R_{\text{н}} < 50$ Ом пиковое напряжение сигнала, формируемого на резисторе нагрузки, меньше или сравнимо со средним квадратичным отклонением напряжения шума.

Емкость исследуемых Si-ФЭУ при напряжениях питания, близких или превышающих их напряжение пробоя, остается постоянной величиной и равна приблизительно 100 пФ. Изменение температуры в исследуемом диапазоне не приводит к изменению емкости Si-ФЭУ. Ширина полосы частот остается приблизительно 32 МГц во всем исследуемом диапазоне температур и интервале перенапряжений.

На рис. 2 представлена зависимость пропускной способности канала связи с Si-ФЭУ от перенапряжения при $T = 293$ К и энергетической экспозиции оптического импульса $H = 10^{-11}$ Дж/см². Как видно из полученных зависимостей, наибольшее значение пропускная способность имеет при $\Delta U = 0$ и равна 40; 59; 72 Мбит/с для Ketek PM 3325; ON Semi FC 30035; Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» соответственно. Отметим, что для других длин волн оптического излучения и температур фотоприемников положение максимума зависимости S от ΔU не изменяется для всех исследуемых Si-ФЭУ. Наибольшее значение пропускной способности для всех исследуемых перенапряжений наблюдается

для Si-ФЭУ ОАО «Интеграл», а наименьшее – для Ketek PM 3325. Полученный результат объясняется тем, что значения пикового напряжения импульсов и шумов на выходе Ketek PM 3325 наибольшие, а для Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» – наименьшие. Наибольшее значение пропускной способности соответствует максимальному отношению сигнал / шум, которое получено при $\Delta U = 0$ [13]. Аналогичная зависимость сохраняется для других температур, длин волн излучения и энергетических экспозиций.

Получена зависимость пропускной способности от энергетической экспозиции при $\Delta U = 0$ и $T = 293$ К (рис. 3, а). Видно, что рост S от H наблюдается во всем диапазоне исследуемых энергетических экспозиций. Однако в интервале от 0 до $H = 0,4 \cdot 10^{-11}$ Дж/см² зависимость становится линейной. Отсутствие линейной зависимости при дальнейшем увеличении H объясняется зависимостью $U_{\text{п}}$ от H . При увеличении H напряжение $U_{\text{п}}$ уменьшается, в результате чего уменьшается пропускная способность. Для других температур и перенапряжений вид зависимости сохраняется. На рис. 3, б представлена зависимость пропускной способности фотоприемников от температуры при $\Delta U = 0$ и $H = 10^{-11}$ Дж/см². Видно, что повышение температуры приводит к уменьшению пропускной способности канала связи с Si-ФЭУ. Наибольшая пропускная способность во всем исследуемом диапазоне температур наблюдается для каналов связи с Si-ФЭУ Ketek PM 3325, а наименьшая – с Si-ФЭУ ОАО «Интеграл». Данная зависимость близка к линейной. Характер представленной зависимости для других экспозиций и перенапряжений аналогичен. Такое поведение зависимости S от T обусловлено тем, что понижение температуры при постоянном значении энергетической экспозиции приводит к увеличению пикового напряжения сигнала и уменьшению среднего квадратичного отклонения напряжения шума. Результаты исследования пропускной способности от температуры приведены в табл. 2.

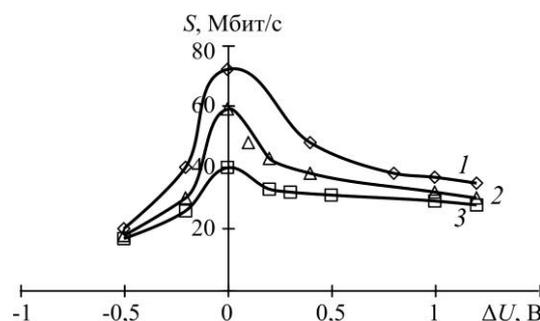


Рис. 2. Зависимость пропускной способности канала связи с Si-ФЭУ от перенапряжения: 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Si-ФЭУ ОАО «Интеграл»

Fig. 2. Dependence of throughput on overvoltage: 1 – Ketek RM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Si-PMT JSC “Integral”

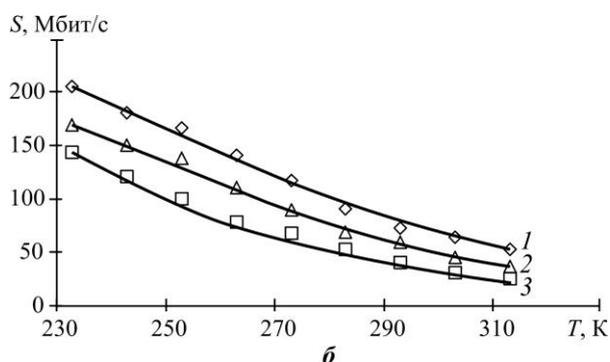
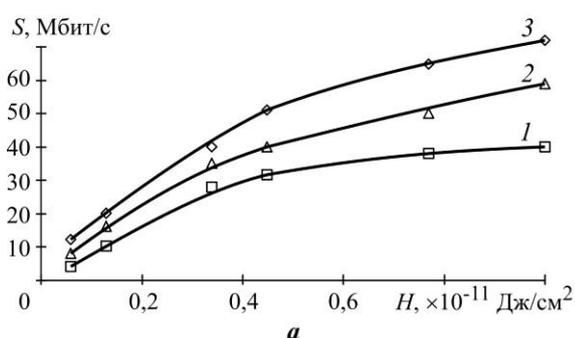


Рис. 3. Зависимости пропускной способности фотоприемника от энергетической экспозиции (а) и температуры (б): 1 – Ketek PM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Si-ФЭУ ОАО «Интеграл»

Fig. 3. Dependences of the throughput of the photodetector on the energy exposure (a) and temperature (b): 1 – Ketek RM 3325; 2 – ON Semi FC 30035; 3 – Si-PMT JSC “Integral”

Таблица 2

Результаты исследования зависимости пропускной способности фотоприемников от температуры при $\Delta U = 0$

Table 2

Results of the study of the dependence of the photodetector throughput on temperature at $\Delta U = 0$

Фотоприемник	T , К	U_n , мВ	σ , мВ
Ketek PM 3325	233	99	15
	313	51	36
ON Semi FC 30035	233	61	7
	313	28	22
Si-ФЭУ ОАО «Интеграл»	233	52	4
	313	25	13

Рост пикового напряжения сигнальных импульсов связан с увеличением коэффициента усиления Si-ФЭУ при понижении температуры [14]. Уменьшение среднего квадратичного отклонения напряжения шума вызвано снижением тепловой составляющей шума [15]. Все это приводит к увеличению отношения сигнал / шум. При этом полоса частот практически не изменяется с понижением температуры.

Таким образом, наибольшее значение пропускной способности получено для перенапряжении $\Delta U = 0$ и температуры 233 К и равно 144; 168; 204 Мбит/с для Ketek PM 3325; ON Semi FC 30035; Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» соответственно.

Заключение. Исследование пропускной способности оптического канала связи с приемником информации в виде Si-ФЭУ показало, что для всех рассмотренных фотоприемников характерен рост пропускной способности при увеличении энергетической экспозиции оптических импульсов во всем диапазоне исследуемых энергетических экспозиций $0-1,0 \cdot 10^{-11}$ Дж/см². Повышение температуры приводит к линейному уменьшению пропускной способности исследованных фотоприемников.

Наибольшую пропускную способность в диапазоне температур 233–313 К демонстрируют Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл», а наименьшую – Ketek PM 3325. Это связано с тем, что Si-ФЭУ ОАО «Интеграл» характеризуются наименьшим значением среднего квадратичного отклонения напряжения шума по сравнению с Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Наибольшие значения пропускной способности для исследуемых Si-ФЭУ при воздействии оптическим излучением с длиной волны 470 нм получены при $\Delta U = 0$ и $T = 233$ К.

Представленные результаты могут быть использованы при разработке оптических систем связи.

Литература

1. Arya V., Priya P., Omanakuttan R., Baby S. LiFi: The future technology in wireless communication // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2015. Vol. 4. Iss. 4. P. 2340–2343.
2. Sarkar A., Agarwal S., Nath A. Li-Fi technology: Data transmission through visible light // International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies. 2015. Vol. 3. Iss. 6. P. 1–12.
3. Макаренко В. Технология LI-FI как альтернатива WI-FI // ЭКиС. 2020. № 1 (229). С. 46–51.
4. A comprehensive model of the response of silicon photomultipliers / H. T. van Dam, S. Seifert, R. Vinke et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Vol. 57. No. 4. P. 2254–2266. doi: <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>

5. **Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K.** Two-photon imaging with silicon photomultipliers // *Optics Express*. 2019. Vol. 27. Iss. 24. P. 35830–35841. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
6. Кремниевый фотоэлектронный умножитель: новые возможности / **С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов и др.** // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2007. № 8 (82). С. 80–86.
7. **Sadygov Z., Sadygov A., Khorev S.** Silicon photomultipliers: status and prospects // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2020. Т. 17. № 2 (227). С. 132.
8. Пат. 2650417 РФ. Полупроводниковый лавинный фотоприемник / **З. Я. Садыгов, А. З. Садыгов**. Заявл.: 25.04.2017; опубл.: 13.04.2018, Бюл. № 11. 9 с.
9. Технология изготовления микропиксельных лавинных фотодиодов и компактной матрицы на их основе / **З. Садыгов, А. Ариффин, Ф. Ахмедов и др.** // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2014. Т. 10. № 7 (184). С. 1268–1273.
10. **Шубин В. В.** Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 258 с.
11. **Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.** Спектральные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // *Успехи прикладной физики*. 2021. Т. 9. № 2. С. 164–171.
12. **Гулаков И. Р., Зеневич А. О.** Фотоприемники квантовых систем. Минск: ВГКС, 2012. 276 с.
13. **Yao M., Shah G., Fang J.** Highly sensitive and miniaturized fluorescence detection system with an autonomous capillary fluid manipulation chip // *Micromachines*. 2012. Vol. 3 (2). P. 462–479. doi: <https://doi.org/10.3390/mi3020462>
14. **Асаёнок М. А., Горбадей О. Ю., Зеневич А. О.** Температурные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2018. № 2 (112). С. 54–58.
15. **Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Кочергина О. В., Новиков Е. В.** Исследование шумовых характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей при регистрации оптических импульсов // *Проблемы инфокоммуникаций*. 2020. № 2-2 (12). С. 41–46.

Статья поступила в редакцию 29.10.2021 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Залесский Валерий Борисович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (Республика Беларусь, 220090, г. Минск, Логойский тракт, 22) oelt@oelt.basnet.by

Гулаков Иван Романович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи (Республика Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2), gulakov@bsu.by

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи (Республика Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2) a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна – аспирант кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи (Республика Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2), o.kochergina@bsac.by

Цымбал Владимир Сергеевич – заместитель главного инженера Филиала научно-технического центра «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл» (Республика Беларусь, 220108, г. Минск, ул. Казинца И. П., 121А/2), office@bms.by

References

1. Arya V., Priya P., Omanakuttan R., Baby S. LiFi: The future technology in wireless communication. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015, vol. 4, iss. 4, pp. 2340–2343.
2. Sarkar A., Agarwal S., Nath A. Li-Fi technology: Data transmission through visible light. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2015, vol. 3, iss. 6, pp. 1–12.

3. Makarenko V. LI-FI technology as an alternative to WI-FI. *EKiS = Electronic Components and Systems*, 2020, no. 1 (229), pp. 46–51. (In Russian).
4. Van Dam H. T., Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., Schaart D. R. A comprehensive model of the response of silicon photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 2254–2266. doi: <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053048>
5. Modi M. N., Daie K., Turner G. C., Podgorski K. Two-photon imaging with silicon photomultipliers. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 24, pp. 35830–35841. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.27.035830>
6. Klemin S., Kuznetsov J., Filatov L., Budjan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Popova E. Silicon photoelectronic multiplier: new opportunity. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8 (82), pp. 80–86. (In Russian).
7. Sadygov Z., Sadigov A., Khorev S. Silicon photomultipliers: status and prospects. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2020, vol. 17, pp. 160–176. doi: <https://doi.org/10.1134/S154747712002017X>
8. Sadygov Z. Ya., Sadygov A. Z. *Semiconductor avalanche photodetector*. Patent 2650417 RF, publ. 04.13.2018, Bul. No. 11. (In Russian).
9. Sadygov Z., Ariffin A., Akhmedov F., Anfimov N., Bokova T., Dovlatov A. et al. Technology of manufacturing micropixel avalanche photodiodes and a compact matrix on their basis. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2014, vol. 10, iss. 7, pp. 780–782. doi: <https://doi.org/10.1134/S154747711401018X>
10. Shubin V. V. *Information security of fiber optic systems*. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2015. 258 p. (In Russian).
11. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Investigation of the spectral characteristics of silicon photomultiplier tubes. *Uspekhi prikladnoy fiziki = Advances in Applied Physics*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 164–171. (In Russian).
12. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photoreceivers of quantum systems*. Minsk, VGKS Publ., 2012. 276 p. (In Russian).
13. Yao M., Shah G., Fang J. Highly sensitive and miniaturized fluorescence detection system with an autonomous capillary fluid manipulation. *Micromachines*, 2012, vol. 3 (2), pp. 462–479. doi: <https://doi.org/10.3390/mi3020462>
14. Asayonak M. A., Gorbadey O. Yu., Zenevich A. O. Temperature characteristics of silicon photoelectronic multipliers. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2018, no. 2 (112), pp. 54–58. (In Russian).
15. Asayonak M. A., Zianeovich A. A., Kochergina O. V., Novikau Y. U. Investigation of noise characteristics of silicon photoelectronic multipliers when registering optical pulses. *Problemy infokommunikatsiy*, 2020, no. 2-2 (12), pp. 41–46. (In Russian).

The article was submitted 29.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Valery B. Zalesskiy – Can. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of the SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (Republic of Belarus, 220090, Minsk, Logoisk tract, 22), oelt@oelt.basnet.by

Ivan R. Gulakov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (Republic of Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), gulakov@bsu.by

Andrey O. Zenevich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Rector, Belarusian State Academy of Communications (Republic of Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), a.zenevich@bsac.by

Olga V. Kochergina – PhD student of the Mathematics and Physics Department, Belarusian State Academy of Communications (Republic of Belarus, 220114, Minsk, F. Skorina st., 8/2), o.kochergina@bsac.by

Vladimir S. Tsymbal – Deputy Chief Engineer of the Branch of the Scientific and Technical Center “Belmikrosistemy” of JSC “Integral” – “Integral” Holding Management Company (Republic of Belarus, 220108, Minsk, Kazints I. P. st., 121A/2), office@bms.by

Научная статья

УДК 531.768-181.48:681.586.73:004.946

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67

**Разработка чувствительного элемента
микромеханического акселерометра**

*Е. С. Кочурина^{1,2}, С. А. Анчутин^{1,2}, В. В. Калугин², Н. М. Зарянкин¹,
А. С. Тимошенко^{1,2}, И. С. Дернов^{1,2}*

¹ООО «Лаборатория микроприборов», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

ekochurina@mp-lab.ru

Аннотация. Микромеханические акселерометры (ММА) широко применяются в промышленности, а также в робототехнике, так как характеризуются низким энергопотреблением, малыми габаритами и массой, невысокой стоимостью при серийном производстве. Поэтому разработка и исследование ММА является актуальной задачей. В работе при моделировании чувствительного элемента (ЧЭ) ММА использована программная система конечно-элементного анализа, позволяющая провести статический и модальный анализ. Приведены результаты предварительных расчетов масштабного коэффициента ММА, который может быть собран на основе разработанного ЧЭ и сигма-дельта-преобразователя. Описан технологический процесс изготовления ЧЭ ММА с использованием анизотропного жидкостного химического травления кремния для получения различных профилей соответствующих кристаллографических плоскостей. Представлены результаты исследования влияния технологических погрешностей на геометрические размеры ЧЭ: выявлена зависимость величины бокового подтрав кремния от точности углового совмещения маски с кристаллографической осью пластины (100). Проведенное моделирование подтвердило работоспособность конструкции, расчеты показали изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °С, номинальной емкости и емкости при изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g. При изготовлении ЧЭ на основе проведенных исследований можно получить боковой подтрав не более 5 мкм при глубине анизотропного жидкостного химического травления 250 мкм для пластин КДБ-0,01 с допуском на ориентацию $\pm 30'$ или с разориентацией такой же величины, допущенной во время экспонирования.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, МЭМС, анизотропное жидкостное травление, результаты экспериментальных исследований

Для цитирования: Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра / Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, В. В. Калугин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>

Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer

*E. S. Kochurina^{1,2}, S. A. Anchutin^{1,2}, V. V. Kalugin², N. M. Zaryankin¹,
A. S. Timoshenkov^{1,2}, I. S. Dernov^{1,2}*

¹*“Laboratory of Micro-Devices” Ltd., Moscow, Russia*

²*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

ekochurina@mp-lab.ru

Abstract. Micromechanical accelerometers have wide range of applications in industry and robotechnics due to the main advantages such like low power consumption, small dimensions and weight, low cost in serial production. Therefore, micromechanical accelerometers research and development received priority. In this work, finite element analysis software was used for modeling the sensitive element, for this method allows providing static and modal analysis. The results of preliminary calculations of the scale factor of the accelerometer that can be assembled based on the developed sensor and sigma-delta transducer, are provided. The article describes the technological process of manufacturing sensitive elements of micromechanical accelerometers. In this case, anisotropic liquid chemical etching of silicon was used, which makes it possible to obtain different profiles of the corresponding crystallographic planes. The results of a study of the influence of technological errors on the geometric dimensions of sensitive elements are provided: the dependence of the value of the lateral undercut of silicon on the accuracy of the angular alignment of the mask with the crystallographic axis of the plate (100) was revealed. The design of the sensitive element of the micromechanical accelerometer has been developed. The performed simulations have proved out the performance of the structure, the calculations have shown the change in the scale factor in the temperature range from -60 to $+125$ °C, the value of the nominal capacity and capacity with a change in linear acceleration in the range of ± 60 g. In the manufacture of a sensitive element on the basis of the studies carried out, it is possible to obtain a lateral undercut of no more than 5 microns at a depth of anisotropic liquid chemical etching of 250 microns for KDB-0,01 plates with an orientation tolerance of ± 30 arc minutes or with a misorientation of the same magnitude allowed during exposure.

Keywords: MEMS, micromechanical accelerometer, sensing element, anisotropic liquid etching, experimental research results

For citation: Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalugin V. V., Zaryankin N. M., Timoshenkov A. S., Dernov I. S. Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 59–67. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>

Введение. Микромеханические акселерометры (ММА) применяются для измерения проекции линейного ускорения на ось чувствительности, они могут использоваться в датчиках и приборах для определения скорости, вибрации, наклона объекта и т. д. Спектр областей применения данных датчиков широкий – от промышленности до робототехники, что обусловлено их низким энергопотреблением, малыми габаритами, небольшой массой, невысокой стоимостью при серийном производстве [1–4].

Цель настоящей работы – разработка и исследование чувствительного элемента (ЧЭ) ММА.

Описание конструкции и результаты моделирования чувствительного элемента ММА. ООО «Лаборатория Микроприборов» (г. Москва, Россия) совместно с Институтом нано- и микросистемной техники МИЭТ разработали ММА, ЧЭ которого схематично представлен на рис. 1.

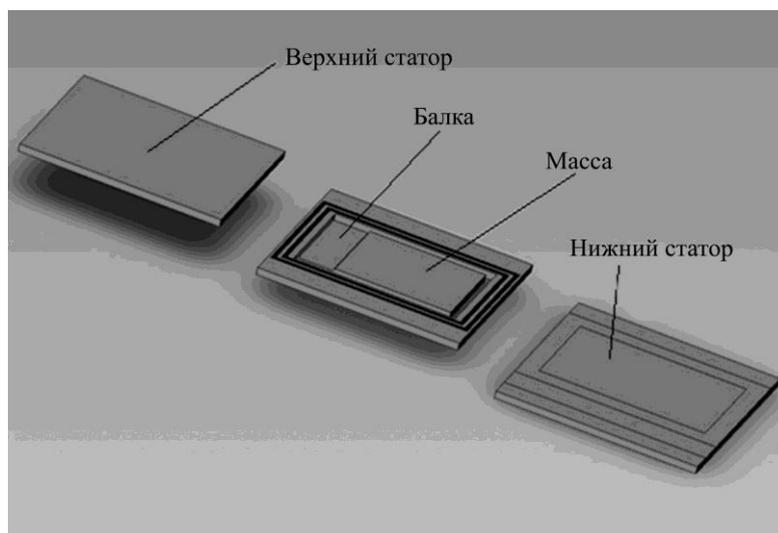


Рис. 1. Схематичное изображение ЧЭ ММА
Fig. 1. Schematic representation MMA sensing element

Инерциальная масса с помощью упругого подвеса (балки) подвешена к основанию. Под воздействием линейного ускорения за счет изгиба балки масса смещается относительно основания на величину, прямо пропорциональную проекции линейного ускорения на ось чувствительности акселерометра. В ЧЭ использована емкостная система съема сигнала: дифференциальная емкость – верхний статор – подвижная масса – нижний статор. Разницу сформированных емкостей в выходной цифровой код можно преобразовать, например, с помощью сигма-дельта-преобразователя.

Оценить работоспособность конструкции ЧЭ ММА можно на основе моделирования с использованием конечно-элементного анализа – численного метода решения задач с частными производными, а также интегральных уравнений. Область, в которой ищутся решения дифференциальных уравнений, разбивают на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирают вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций, как правило, находят из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Эти коэффициенты выражают через значения функций в узлах элементов. Далее составляют систему линейных ал-

гебраических уравнений, количество которых равно количеству неизвестных значений в узлах, где ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями компьютера. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних элементов, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает ее решение [5–7].

Геометрия модели ЧЭ должна удовлетворять следующим требованиям:

- максимальное измеряемое линейное ускорение не менее $\pm 50 g$;
- дифференциальная емкость должна формироваться с учетом указанных ограничений и возможности изготовления (допуски на совмещение, погрешности травления, минимальный поясок для срачивания статоров и основания массы) и обеспечивать максимальный коэффициент преобразования линейного ускорения;
- изменение емкости не более $\pm 4,096$ пФ;
- внешние габаритные размеры элемента не более 8×8 мм.

Моделирование конструкции ЧЭ проведено при действии линейного ускорения в диапазоне $\pm 60 g$ (запас относительно исходных данных составляет не менее 20 %) [8, 9].

При моделировании выбраны следующие исходные данные: материал элемента – кремний; плотность 2328 кг/м^3 ; коэффициент Пуассона 0,28; модуль Юнга 169 ГПа. Параметры модели (использован метод конечных элементов): число узлов 96 656; число элементов 59 941.

Под воздействием линейного ускорения $60 g$ вдоль измерительной оси ЧЭ деформируется (рис. 2).

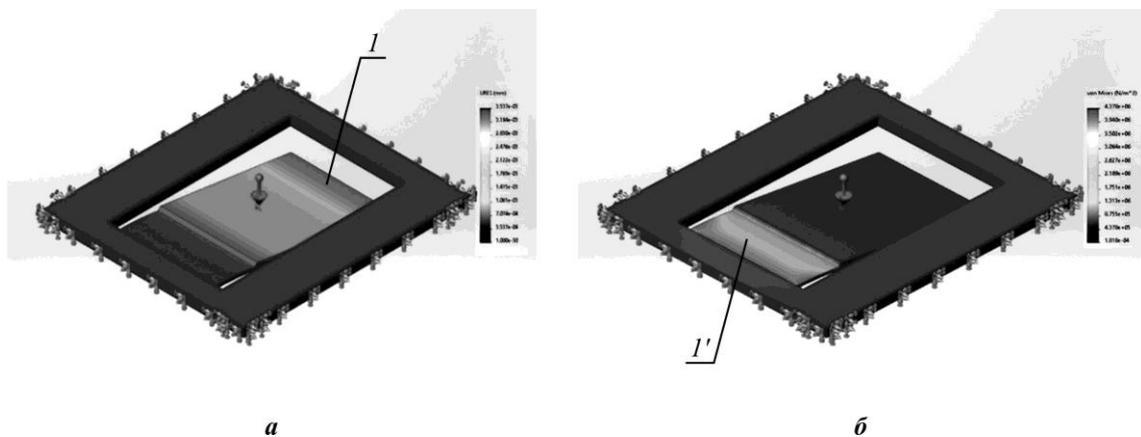


Рис. 2. Деформация элемента (а) и напряжение в материале элемента (б) при действии линейного ускорения $60 g$ (I, I' – соответственно максимальное и минимальное смещение или деформация)
Fig. 2. Deformation of the sensing element (a) and stresses in the sensing element material (b) under the action of linear acceleration $60 g$ (I, I' – maximum and minimum displacement or deformation respectively)

Расчетное максимальное напряжение в материале составило 4,378 МПа, максимальное перемещение кромки подвижной массы – 3,537 мкм. В результате проведенного модального анализа получены значения четырех собственных частот: 2527, 19 504, 38 533, 65 231 Гц. Минимальное значение резонансной частоты равно 2527 Гц. Это позволяет утверждать, что при действии внешних воздействий (вибрации) в диапазоне до 2000 Гц не будет возникать резонанс ЧЭ. Вторая собственная частота примерно в семь раз превышает значение первой собственной частоты.

Проведены предварительные расчеты основных характеристик ММА, который может быть собран на основе разработанного ЧЭ и сигма-дельта-преобразователя. Расчетное изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °C показано на рис. 3.

При зазоре 13 мкм номинальная емкость составляет 10,64 пФ. При изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g изменение емкости составляет $\pm 3,46$ пФ.

Особенности технологического процесса изготовления ММА. ММА изготовлены по МЭМС-технологии. Для получения

кремниевых элементов МЭМС используют процессы травления, которые условно можно разделить на две группы – жидкостные и газофазные (сухие). Жидкостные процессы основаны на химической реакции, поэтому они более изотропные, чем газофазные, имеют большую скорость травления и могут быть более селективными [9, 10]. В настоящей работе для изготовления ЧЭ применяется анизотропное жидкостное химическое травление (АЖХТ) кремния, которое позволяет получать различные профили соответствующих кристаллографических плоскостей. Профиль травления зависит от кристаллографической ориентации поверхности кристалла, от ориентации фотошаблона в плоскости пластины относительно основания базового среза, типа и состава травителя, условий травления и параметров пластины. Для АЖХТ кремния в качестве маскирующих покрытий используются слой нитрида кремния Si_3N_4 и слой оксида кремния SiO_2 . Низкая скорость травления кристаллографических плоскостей (111) обуславливает, как правило, высокое качество травления фигур, ограниченных этими плоскостями. Фактически в процессе АЖХТ кремния плоскости (111) выполняют функцию стоп-слоя. Вместе с тем неоптимальный выбор состава травителя и режимов травления может привести к дефектам. В то же время значительно сложнее получить высокое качество поверхности дна профиля (плоскость (100)). После глубокого травления (100 мкм и более) на изготовленных образцах могут появляться различные дефекты. Наиболее радикальный способ исключить дефекты – это проектирование конструкций кремниевых элементов на стадии разработки фигур травления, ограниченных плоскостями (111). Несмотря на простоту, скорость и селективность, процесс АЖХТ имеет ряд недостатков. Одна из существенных проблем при производстве МЭМС – слипание и разрушение свободстоящих структур вследствие действия сил поверхностного натяжения жидкости. Данные силы возникают при образовании капель раствора внутри полостей и зазоров структур после извлечения пластины из ванны. На воздухе капли высыхают и уменьшаются в объеме, в результате «слепляются» механические элементы структуры. В некоторых случаях деформационные напряжения могут быть настолько значительными, что происходит механическое повреждение отдельных элементов МЭМС. В предлагаемой конструкции предусмотрены размеры элементов и полостей, исключающие проявление недостатков АЖХТ.

Один из основных факторов, определяющих точностные характеристики ММА, – погрешность изготовления микромеханического элемента, проявляющаяся в отклонении линейных размеров от номинальных, перекосах, несимметричности элементов и т. п. [9]. Возникающие статические и динамические небалансы кремниевых элементов

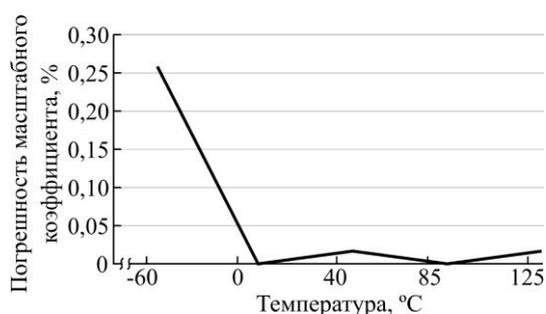


Рис. 3. Погрешность масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °C

Fig. 3. Scale factor accuracy over operating temperature range from -60 to $+125$ °C

приводят к появлению в микромеханических элементах погрешностей от перекрестных угловых и линейных ускорений. Перекосы изготовления микромеханических элементов вызывают паразитные колебания [9].

В ходе исследования влияния технологических погрешностей на форму ЧЭ выявлена зависимость бокового подтравки кремния от точности углового совмещения маски с кристаллографической осью пластины. Исследования проводили на экспериментальных пластинах КЭФ-4,5[100] и КДБ-0,01[100] диаметром 100 мм и толщиной 300 мкм. На них предварительно формировали маску из Si_3N_4 толщиной 0,13 мкм с подслоем SiO_2 толщиной 0,05 мкм. Эти пластины имеют достаточно жесткий допуск ($\pm 20'$) на отклонение базового среза от направления [100].

Для экспонирования разработан фотошаблон для контактной фотолитографии, содержащий шесть прямоугольных блоков топологии. В процессе первого экспонирования один из блоков засвечен при строгой ориентации относительно базового среза. При экспонировании каждого следующего блока пластину разворачивали относительно фотошаблона на разные заданные углы. Остальные блоки при этом были закрыты светонепроницаемым экраном. После формирования маски из Si_3N_4 проведено АЖХТ этих пластин в 30%-ном водном растворе КОН при температуре 95 °С. Глубина травления составила 240–250 мкм.

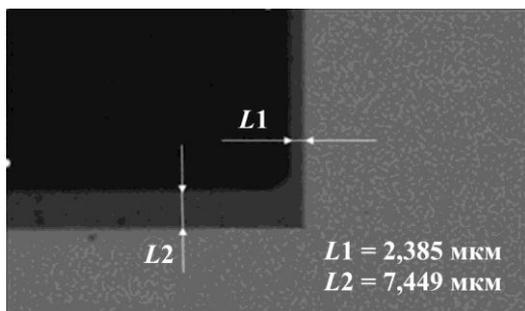


Рис. 4. Углубление прямоугольной формы (разориентация 18')

Fig. 4. Deepening is rectangular (misorientation 18 arc minutes)

Анализ результатов АЖХТ проведен с использованием оптического микроскопа при увеличении 100–500 крат. Как следует из полученных данных, в блоках, которые экспонировались при развороте пластины относительно фотошаблона, линии подтравки под маску имеют клиновидную форму. На рис. 4 показано углубление прямоугольной формы размером 940×1600 мкм в пластине КЭФ-4,5, которое экспонировалось при развороте блока на 18'. Величина подтравки меняется от 2,385 до 7,449 мкм. Для получения прямоугольной формы кремниевого элемента предполагается использование компенсаторов

ров углов подтравок из материала маски.

Одинаковые симметричные фрагменты топологии, полученные при разной ориентации блоков в процессе экспонирования, показаны на рис. 5. Фрагмент, изображенный на рис. 5, а, проэкспонирован при строгой ориентации блока, а на рис. 5, б – при развороте на 18'. Размер подтравки после АЖХТ пластин КДБ-0,01 составил 7 мкм, т. е. по 3,5 мкм на сторону (см. рис. 5, а), и 9,6 мкм, т. е. в среднем 4,8 мкм на каждую сторону (см. рис. 5, б). Таким образом, разворот на 18' привел к увеличению бокового подтравки на 1,3 мкм на каждую сторону.

Как следует из рис. 5, б, в пластинах, обработанных АЖХТ, ориентация базового среза действительно строго совпадает с направлением кристаллографической оси, так как укладывается в допуск $\pm 20'$, указанный в паспорте. При строгой ориентации фотошаблона и пластины во время экспонирования величина бокового подтравки была ожидаемо минимальна и составила 2 мкм для пластин КЭФ-4,5 и 2,3–3,5 мкм для пластин КДБ-0,01. Разброс в величинах подтравки на пластине КДБ-0,01 объясняется, очевидно, наличием большего числа дефектов кристаллической решетки в сильнолегированном кремнии КДБ-0,01.

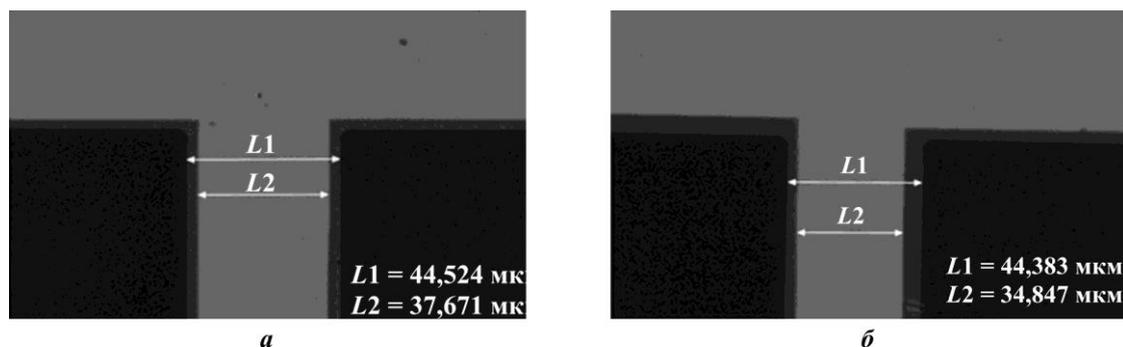


Рис. 5. Фрагмент топологии: *a* – строгая ориентация; *b* – разориентация на 18'
 Fig. 5. Fragment of the topology: *a* – strict orientation; *b* – misorientation 18 arc minutes

Аналогично проведено измерение бокового подтрав кремния под маску из Si_3N_4 на каждом из блоков топологии. Результаты измерений представлены на рис. 6.

Угловая разориентация при экспонировании приводит к увеличению подтрав. Но по результатам проведенных измерений можно сделать вывод, что заранее точно рассчитать увеличение подтрав при разориентации блоков сложно, даже если известны угол разориентации и размеры элементов топологии. При АЖХТ пластин КЭФ-4,5 и КДБ-0,01 величина подтрав может меняться от пластины к пластине в небольших пределах.

Заключение. Проведенное моделирование свидетельствует о работоспособности конструкции, расчеты показывают изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °С. Получена номинальная емкость, равная 10,64 пФ. При изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g изменение емкости составляет $\pm 3,46$ пФ. При изготовлении ЧЭ на основе проведенных исследований можно получить боковой подтрав не более 5 мкм при глубине АЖХТ 250 мкм для пластин с допуском на ориентацию $\pm 20'$ или с такой же разориентацией, допущенной во время экспонирования. Таким образом, при строгой ориентации пластины относительно фотошаблона при экспонировании боковой подтрав минимален, но может колебаться в небольших пределах.

Материалы статьи доложены на 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2021» (3–9 февраля 2021 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакиеева А. Г. Микроэлектромеханические системы: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2016. 141 с.
2. Дюжнев Н. А., Киреев В. Ю. Элементный базис нано- и микросистемной техники: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2019. 140 с.

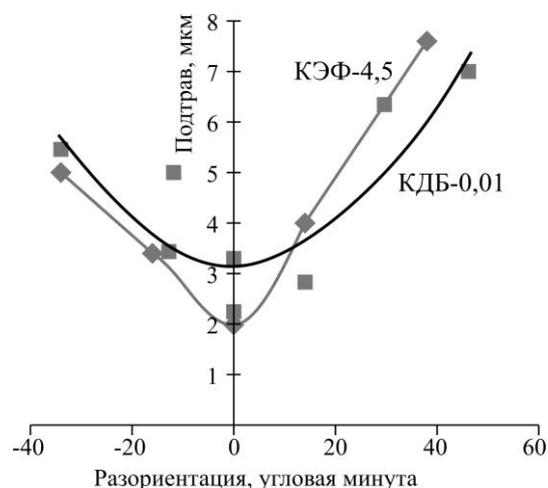


Рис. 6. Зависимость бокового подтрав от угловой разориентации блоков топологии относительно базового среза кремниевых пластин
 Fig. 6. Dependence of the lateral undercut on the angular misorientation of topology blocks relative to the base cut of silicon wafers

3. *Шерстобитова А. С.* Датчики физических величин: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 57 с.
4. *Тимошенков А. С.* Тенденции в развитии современных инерциальных микромеханических датчиков // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 579–581. doi: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.579.581>
5. *Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.* ANSYS в руках инженера: практ. рук. / предисл. А. С. Шадского. 4-е изд., стер. М.: URSS: ЛИБРОКОМ, 2015. 272 с.
6. *Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С.* ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. Изд. стер. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2016. 456 с.
7. *Амеличев В. В., Григорьев Д. М., Резнев А. А.* Конечно-элементное моделирование мембранного модуля // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 3. С. 277–284. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284>
8. *Тимошенков С. П., Калугин В. В., Анчутин С. А., Кочурина Е. С.* Разработка конструкции сенсора линейного ускорения // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: науч.-практ. конф.: сб. трудов. М.: МИЭТ, 2019. С. 151–156.
9. Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра / *С. П. Тимошенков, С. А. Анчутин, Н. М. Зарянкин и др.* // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 2. С. 63–67. doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>
10. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review / *P. Pal, V. Swarnalatha, A. V. N. Rao et al.* // Micro and Nano Syst. Lett. 2021. Vol. 9. Art. No. 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>

Статья поступила в редакцию 25.05.2021 г.; одобрена после рецензирования 07.09.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Кочурина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, главный метролог ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), инженер-конструктор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), ekochurina@mp-lab.ru

Анчутин Степан Александрович – ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), step@mail.ru

Калугин Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), viktor118@mail.ru

Зарянкин Николай Михайлович – кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), n.zaryankin@mail.ru

Тимошенков Алексей Сергеевич – доктор технических наук, генеральный директор ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), at@mp-lab.ru

Дернов Илья Сергеевич – инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина,1), i.s.dernov@yandex.ru

References

1. Gurtov V. A., Belyaev M. A., Baksheeva A. G. *Microelectromechanical systems*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2016. 141 p. (In Russian).
2. Dyuzhev N. A., Kireev V. Yu. *Element basis of nano- and microsystem engineering*. Moscow, MIET Publ., 2019. 140 p. (In Russian).
3. Sherstobitova A. S. *Physical quantities' data units*. St. Petersburg, ITMO University, 2017. 57 p. (In Russian).
4. Timoshenkov A. S. Trends in modern inertial micromechanical sensors development. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2019, no. S (89), pp. 579–581. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.579.581>
5. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olf'er'yeva M. A. *ANSYS in hands of an engineer*. 4th ed., ster. Moscow, URSS, LIBROKOM, 2015. 272 p. (In Russian).
6. Morozov E. M., Muzyemnek A. Yu., Shadskiy A. S. *ANSYS in hands of an engineer: Fracture mechanics*. Ster. ed. Moscow, URSS, LENAND, 2016. 456 p. (In Russian).
7. Amelichev V. V., Grigoryev D. M., Reznov A. A. Finite element modeling of membrane module. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 277–284. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284>
8. Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S. Sensor of linear acceleration development. *Intellektual'nye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika = Intelligent Systems and Microsystems Engineering, Research and Practice Conference Proceedings*. Moscow, MIET Publ., 2019, pp. 151–156. (In Russian).
9. Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Zarjankin N. M., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Boev L. R. Research and development of MEMS accelerometer's sensor. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63–67. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>
10. Pal P., Swarnalatha V., Rao A. V. N., Pandey A. K., Tanaka H., Sato K. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review. *Micro and Nano Syst. Lett.*, 2021, vol. 9, art. no. 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>

The article was submitted 25.05.2021; approved after reviewing 07.09.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Elena S. Kochurina – Cand. Sci. (Eng.), Chief Metrologist, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Design Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ekochurina@mp-lab.ru

Stepan A. Anchutin – Leading Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), step@mail.ru

Viktor V. Kalugin – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), viktor118@mail.ru

Nikolay M. Zaryankin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), n.zaryankin@mail.ru

Alexey S. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), General Director, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), at@mp-lab.ru

Ilya S. Dernov – Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), i.s.dernov@yandex.ru

Исследование функционирования чувствительного элемента микромеханического акселерометра сэндвич-конструкции емкостного типа в условиях паразитных воздействий по нерабочим осям и случайной вибрации

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

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

Yeokooung64675@gmail.com

Аннотация. Для обеспечения надежной работы и стабильности параметров микромеханических акселерометров (ММА) необходимо учитывать различные виды паразитных воздействий на этапе проектирования структуры чувствительного элемента (ЧЭ) и конструкции датчика в целом, а также на этапах их жизненного цикла. Учет реальных условий эксплуатации датчиков является одной из основных проблем разработчиков. В работе исследовано влияние случайной вибрации на функционирование двухэлектродного ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа, принцип работы которого основан на изменении относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора при воздействии ускорения. В рассматриваемом ЧЭ ММА с одной осью чувствительности инерционная масса подвешена на складчатых пружинах и находится между двумя фиксированными электродами. С использованием программы Ansys рассчитаны деформации инерционной массы и изменения емкости в ЧЭ ММА, возникающие при воздействии на него ускорения до 5 g по рабочей оси и до 50 g по нерабочим осям, а также случайной вибрации по рабочей оси X и по нерабочим осям Y и Z. Воздействующая на ЧЭ ММА случайная вибрация имеет профиль, частота которого составляет 20 Гц при 0,01 g²/Гц, от 80 до 350 Гц при 0,04 g²/Гц, 2000 Гц при 0,01 g²/Гц. Рассчитаны изменения емкости в ЧЭ ММА в условиях воздействия на него случайной вибрации. Полученные результаты подтверждают работоспособность ЧЭ ММА в условиях значительных воздействий по нерабочим осям. Для использования в условиях воздействия случайной вибрации исследованная модель ЧЭ ММА требует дальнейшей доработки.

Ключевые слова: чувствительный элемент, микромеханический акселерометр, случайная вибрация, остаточное механическое напряжение

Для цитирования: Йе Ко Ко Аунг, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. Исследование функционирования чувствительного элемента микромеханического акселерометра сэндвич-конструкции емкостного типа в условиях паразитных воздействий по нерабочим осям и случайной вибрации // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 68–79. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-68-79>

Original article

Study of the functioning of the sensitive element of a micromechanical capacitive accelerometer with a sandwich structure under the conditions of parasitic influences along non-working axes and random vibration

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

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Yekokoang64675@gmail.com

Abstract. Various types of parasitic influences must be considered at the stage of designing sensitive element of a micromechanical capacitive accelerometer (MMA) and the whole MMA construction, and throughout its lifecycle stages, to ensure consistent performance and parameter stability of MMA. Due regard to actual operating conditions is a primary consideration for designers. In this work, the influence of random vibration on the functioning of a 2-electrode sensitive element of an MMA with a sandwich construction using the principle of operation based on a change in the relative dielectric constant of a capacitor dielectric under acceleration was investigated. In the structure of the investigated sensitive element with one axis of sensitivity, the inertial mass is suspended on folded springs and is located between two fixed electrodes. Using the Ansys program, the deformations of the inertial mass of the sensitive element and the change in the capacity in the sensitive element were calculated, which occur when it is exposed to acceleration up to 5 g along the working axis and up to 50 g along the non-working axes and random vibration along the working axis X and along the non-working axes Y and Z. The random vibration affecting the sensitive element had a profile, the frequency of which was 20 Hz at 0.01 g²/Hz, the frequency from 80 to 350 Hz at 0.04 g²/Hz, 2000 Hz at 0.01 g²/Hz. The changes in the capacity in the sensitive element of MMA under the influence of random vibration on it were calculated. Results have been obtained that confirm the performance of the sensitive element of MMA under conditions of significant impacts along non-working axes. The investigated sensitive element model requires further refinement to be used under conditions of exposure to random vibration.

Keywords: sensitive element, micromechanical accelerometer, random vibration, residual mechanical stress

For citation: Ye Ko Ko Aung, Simonov B. M., Timoshenkov S. P. Study of the functioning of the sensitive element of a micromechanical capacitive accelerometer with a sandwich structure under the conditions of parasitic influences along non-working axes and random vibration. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 68–79. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-68-79>

Введение. В микромеханических акселерометрах (ММА) неисправности возникают вследствие усталости материалов, трения, влияния остаточного механического напряжения в конструктивах и деталях, а также по причинам, связанным с взаимодействием ММА с окружающей средой (удары, случайные вибрации, температурные

перепады, влажность, загрязнения механическими частицами, воздействие электрического разряда и др.) [1, 2]. Например, механические напряжения в местах соединений чувствительного элемента (ЧЭ) и корпуса, монтажа компонентов на многослойной печатной плате приводят к расслаиванию платы или появлению других дефектов конструкции, на плате электронной схемы управления и съема выделяемого информационного сигнала могут возникать короткие замыкания или обрывы в электропроводящих элементах. Для обеспечения надежной работы и стабильности параметров ММА необходимо учитывать все эти факторы как на этапе проектирования структуры ЧЭ и конструкции датчика в целом, так и на последующих этапах их жизненного цикла.

В настоящей работе исследуется ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа, функционирующий на основе изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсаторов. Рассматривается влияние на его работу воздействия случайной вибрации [3]. В условиях случайной вибрации амплитуда и фаза изменяются случайным образом в отличие от синусоидальной вибрации, которая имеет постоянную амплитуду и фазу [4]. Воздействие случайной вибрации с той или иной резонирующей частотой может не вызывать какого-либо сбоя, но если две (или большее число) резонирующие частоты в устройстве возбуждаются одновременно, то повышается вероятность сбоя устройства. При испытаниях на воздействие случайной вибрации создаются условия, когда все резонансы в отдельных конструктивах испытуемого изделия могут происходить одновременно [5]. С использованием программы Ansys рассчитываются деформации, изменения емкостей, механические напряжения в ЧЭ ММА, выполненном из кремния с различной кристаллографической ориентацией поверхности.

Объект исследования. 3D-изображение ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа, выполненное в редакторе SOLIDWORKS, представлено на рис. 1. Подвижная масса подвешена между двумя стационарными электродами с помощью механических складчатых пружин, прикрепленных к рамке. Геометрические параметры конструкции ЧЭ ММА: подвижная инерционная масса из кремния $2450 \times 2450 \times 30$ мкм (ширина, длина, толщина); одно звено складчатой пружины $10 \times 1000 \times 30$ мкм; зазоры между подвижным и неподвижными электродами 10 мкм; неподвижные электроды на стеклянных пластинах $2500 \times 2350 \times 30$ мкм.

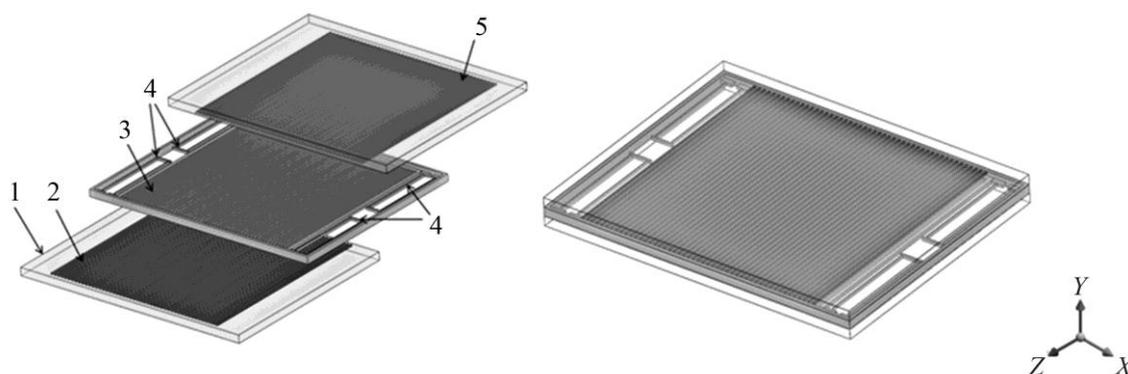


Рис. 1. 3D-изображение ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа: 1 – стекло; 2 – нижний электрод; 3 – подвижная инерционная масса; 4 – складчатые пружины; 5 – верхний электрод
 Fig. 1. 3D image of the sensitive element of a capacitive MMA with a sandwich structure: 1 – glass; 2 – lower electrode; 3 – movable inertial mass; 4 – folded springs; 5 – upper electrode

В работе [6] представлены результаты разработки и исследования модели ЧЭ ММА емкостного типа с одной осью чувствительности (ось Z). Работа такого ЧЭ ММА основана на изменении зазоров между подвижной инерционной массой и фиксированными электродами под действием ускорения. В данном случае используется принцип определения дифференциальной емкости между электродами. Практическое применение этого принципа требует учета возможных помех от сигналов по другим осям, когда на измеряемое ускорение по оси Z влияют сигналы от осей Y и X . Поэтому на практике возможно возникновение погрешности определения ускорения в ЧЭ ММА.

Рассмотрим ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа с одной осью чувствительности (ось X), работа которого основана на принципе изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора под действием ускорения. В сэндвич-конструкции данный принцип реализуется за счет введения (перемещения) в зазор между стационарными емкостными электродами подвижной инерционной массы из кремния (относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon = 12$). Ее перемещение происходит под действием ускорения. В результате меняется относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора, которая и определяет изменение емкости в выходной измерительной цепи. Использование этого принципа имеет преимущества. Например, если ускорение воздействует на ЧЭ по осям Z или Y , то оно вызывает перемещение ЧЭ ММА, но изменения емкости между электродами не произойдет или оно будет крайне незначительным, что можно подтвердить с помощью программы моделирования Ansys Maxwell.

Анализ принципа работы ЧЭ ММА и моделирование механических свойств элементов конструкции. Рабочая ось акселерометра – X . Перемещение инерционной массы ЧЭ ММА по оси X под воздействием ускорения и случайной вибрации по осям X, Y, Z рассчитано в программе Ansys. В данном исследовании регламентированный диапазон значений воздействующего ускорения тестируемого акселерометра составляет до $5 g$ по оси чувствительности X , по двум другим осям паразитные воздействия не регламентированы, поэтому они взяты достаточно большими – до $50 g$ (в 10 раз больше максимального регламентированного значения ускорения по рабочей оси), как это обычно принято в подобных исследованиях.

При загрузке параметров случайной вибрации в программу Ansys использовали коэффициент демпфирования $0,001$, встроенный в программу (т. е. для случая, когда ЧЭ ММА функционирует в вакууме) [7]. Воздействие случайной вибрации учитывали по трем осям и снова вычисляли изменения емкостей. Чтобы получить значения изменения емкостей, необходимо рассчитать перемещения инерционной массы ЧЭ ММА. В табл. 1 представлены значения отклонений инерционной массы ЧЭ ММА из кремния различной кристаллографической ориентации при воздействии ускорения по осям X, Y, Z .

Согласно данным табл. 1, отклонения ЧЭ ММА по осям чувствительности X и Y несущественно отличаются друг от друга для всех кристаллографических ориентаций кремния. Ускорение по оси чувствительности X в 10 раз меньше ускорения, воздействующего на ЧЭ ММА по нерабочим осям Y и Z . Однако, как показали результаты расчета, значения перемещения ЧЭ ММА по оси чувствительности X различаются незначительно при отсутствии и наличии воздействий по нерабочим осям Y и Z . Это означает, что ММА стабильно работает в условиях паразитных воздействий по нерабочим осям. Результат моделирования воздействия ускорения на ЧЭ ММА, механическая часть которого рассчитана для работы в диапазоне измерений до $5 g$, представлен на рис. 2. Моделирование выполнено в программе Ansys, учтено влияние случайной вибрации на ЧЭ ММА.

Таблица 1

Отклонения, мкм, инерционной массы ЧЭ ММА при воздействии ускорения по осям X, Y, Z

Table 1

Deformations, μm , of the inertial mass of the sensitive element of a capacitive MMA made of silicon when exposed to acceleration up to 5 g along the X axis and up to 50 g along the Z, Y axes

Ускорение	Кристаллографическая ориентация кремния		
	(100)	(110)	(111)
5 g по оси X	1,5501	1,1991	1,0768
5 g по оси X и 50 g по оси Y	1,4902	1,1501	1,0349
5 g по оси X и 50 g по оси Z	4,5624	3,3043	3,1542

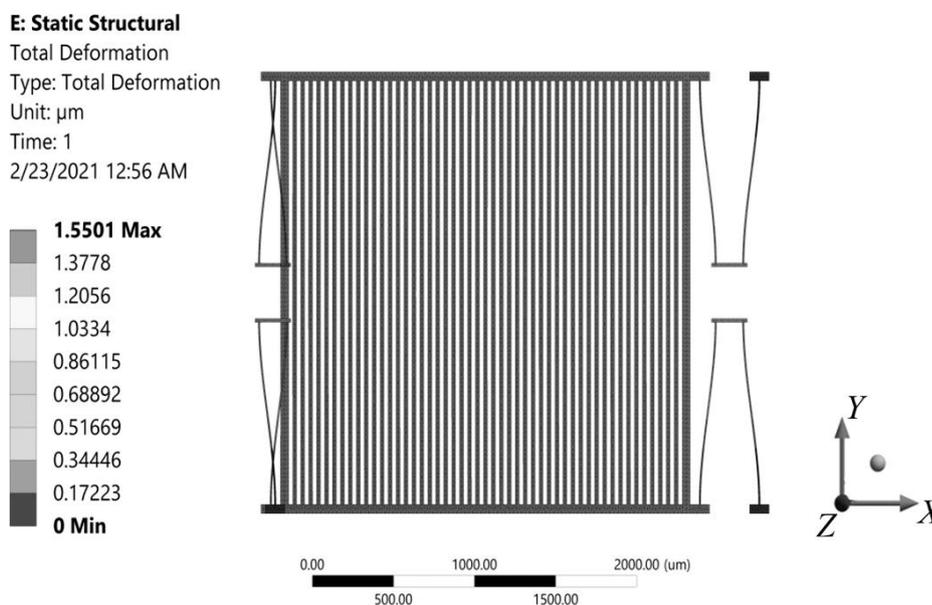


Рис. 2. Результат моделирования отклонения инерционной массы по оси чувствительности X при воздействии ускорения на ЧЭ ММА в диапазоне измерений до 5 g

Fig. 2. The simulation result of the deformation of the inertial mass along the axis of sensitivity X under the action of acceleration on the sensitive element of a capacitive MMA in the measurement range up to 5 g

Исследованы отклонения инерционной массы ЧЭ ММА при воздействии на него случайной вибрации с использованием функции спектральной плотности мощности PSD (Power Spectral Density). Функция PSD представляет собой зависимость плотности виброускорения шума (квадрата ускорения на единицу ширины полосы частот, $g^2/\text{Гц}$) от частоты и должна быть определена при задании воздействия случайной вибрации [7]. Исследовано воздействие случайной вибрации по рабочей оси X на ЧЭ ММА в диапазоне 20–2000 Гц. Профиль воздействующего на ЧЭ ММА случайного вибрационного спектра отображается графиком PSD (рис. 3), который характеризует параметры вибрационного воздействия и является одним из показателей стойкости и прочности приборов.

Рассчитаны отклонения инерционной массы ЧЭ ММА по рабочей оси X при воздействии случайной вибрации по осям X , Y и Z . Полученные результаты представлены в табл. 2. При моделировании в программе Ansys уровень напряжения принят равным 3σ при анализе влияния случайной вибрации на функционирование ЧЭ ММА [8]. Это означает, что максимальное отклонение, допускаемое случайной вибрацией, в 3 раза превышает стандартное отклонение ЧЭ ММА.

Полученные результаты (см. табл. 2) показывают, что наиболее значительные отклонения ЧЭ ММА при случайной вибрации имеют место по оси чувствительности X , для кристаллографической ориентации кремния (100) эти отклонения оказались максимальными.

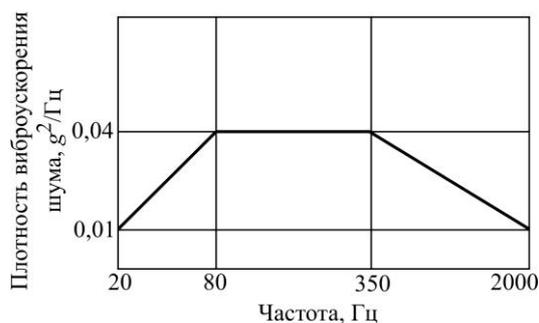


Рис. 3. Профиль спектральной плотности мощности виброускорения шума, воздействующего на ЧЭ ММА

Fig. 3. Power spectral density profile of vibration acceleration of noise affecting the sensitive element of a capacitive MMA

Таблица 2

Отклонения, мкм, инерционной массы ЧЭ ММА при воздействии случайной вибрации по осям X , Y , Z

Table 2

Deformations, μm , of the inertial mass of the sensitive element of a capacitive MMA when exposed to random vibration along the X , Y , Z axes

Ось	Кристаллографическая ориентация кремния		
	(100)	(110)	(111)
X	11,18	8,7831	7,9359
Y	0,2168	0,1604	0,1425
Z	3,6524	1,0078	0,7836

Отметим, что на отклонение инерционной массы ЧЭ ММА существенно влияет жесткость торсионов, которая определяется их геометрическими размерами, формой сечения и кристаллографической ориентацией кремния. С повышением жесткости подвесов отклонения ЧЭ ММА уменьшаются. Несоответствие выходного сигнала образца ЧЭ ММА профилю спектральной плотности мощности при воздействии случайной вибрации может быть связано с очень большой амплитудой колебаний ЧЭ ММА. На рис. 4 представлен результат моделирования: отклонения инерционной массы из кремния с ориентацией (100). Результаты сравнения данных табл. 1 и 2 показывают, что отклонения инерционной массы по оси чувствительности X под влиянием воздействия случайной вибрации и под воздействием ускорения 5 g заметно различаются (более чем на порядок), что говорит о неустойчивости исследованной модели ЧЭ ММА.

Двухэлектродная система ЧЭ ММА сэндвич-конструкции емкостного типа, работающего по принципу изменения относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсаторов под действием ускорения, в статическом состоянии (при отсутствии ускорения) показана на рис. 5, а.

Емкость между электродами в статическом состоянии определяется следующим выражением:

$$C_{\text{ст}} = \frac{Q}{|\Delta V|} = \frac{\epsilon_0 A}{(d-t) + \left(\frac{t}{\epsilon}\right)},$$

где Q – индуцированный заряд, Кл; $\Delta V = V_0$ – разность потенциалов, В; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума; A – площадь перекрытия обкладок, м²; d – расстояние между подвижным и неподвижными электродами, м; t – толщина подвижного электрода, м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала подвижного электрода (в рассматриваемом случае подвижный электрод – инерционная масса, выполненная из кремния).

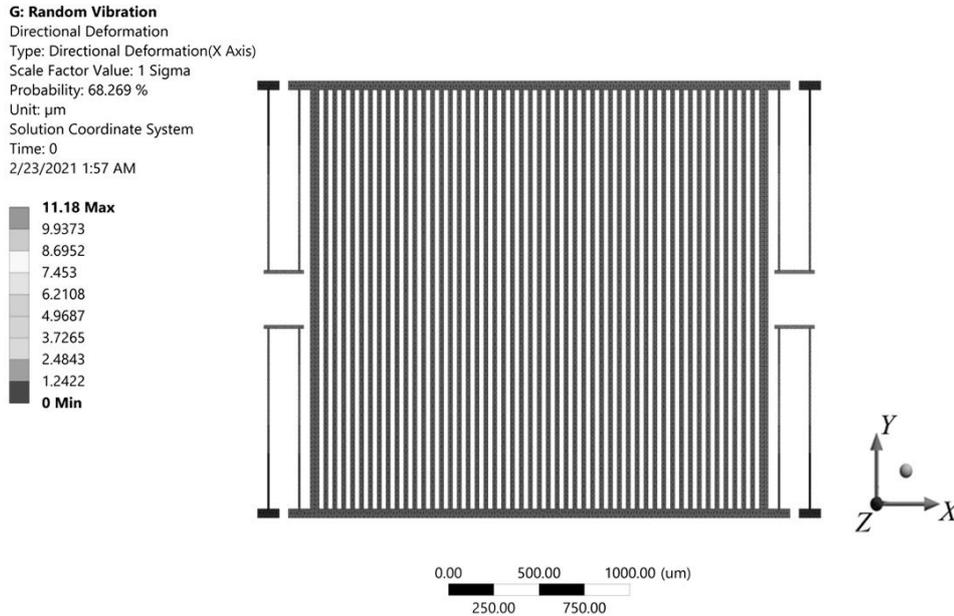


Рис. 4. Результат моделирования отклонения инерционной массы ЧЭ ММА при воздействии случайной вибрации

Fig. 4. The simulation result of the inertial mass of the sensitive element of a capacitive MMA when exposed to random vibration

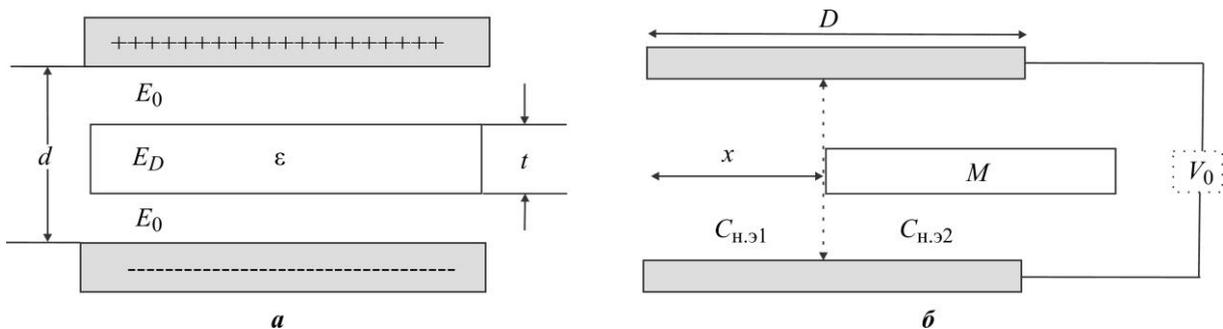


Рис. 5. Двухэлектродная система ЧЭ ММА емкостного типа в статическом состоянии (а) и со смещением инерционной массы при воздействии ускорения (б) (E_0 – напряженность электрического поля между неподвижным электродом и диэлектрическим материалом; E_D – напряженность электрического поля в материале подвижного электрода; D – длина неподвижного электрода; M – инерционная масса)

Fig. 5. Two-electrode system of the sensitive element of a capacitive MMA in a static state (a) and under the influence of acceleration with a displacement of the inertial mass by the value x (b) (E_0 is the intensity of the electric field between the fixed electrode and the dielectric material; E_D is the intensity of the electric field in the material of the moving electrode; D – is the length of the fixed electrode; M – is the inertial mass)

При смещении подвижного электрода по оси чувствительности на величину x емкость между неподвижными электродами $C_{н.э}$ определяется выражением (рис. 5, б)

$$C_{н.э} = C_{н.э1} + C_{н.э2}$$

или

$$C_{н.э} = \frac{\varepsilon_0 A}{D-x} + \frac{\varepsilon_0 A}{(d-t) + \left(\frac{t}{\varepsilon}\right)}$$

Здесь $C_{н.э1}$, $C_{н.э2}$ – емкости между неподвижными электродами в пределах участков, на которых между этими электродами нет подвижной инерционной массы и она есть соответственно. Разность этих емкостей равна:

$$\Delta C = C_{ст} - C_{н.э}$$

Изменения емкости при отклонении инерционной массы ЧЭ ММА рассчитаны в программе Ansys. В табл. 3 представлены результаты расчетов изменения емкости ΔC между электродами ЧЭ ММА при воздействии ускорения 5 g, в табл. 4 – изменения емкости ΔC между электродами при воздействии случайной вибрации по осям X, Y, Z. Емкость между электродами ЧЭ ММА в статическом состоянии $C_{ст} = 1,32815$ пФ.

Таблица 3

Результаты расчетов изменения емкости, пФ, между электродами ЧЭ ММА при воздействии ускорения 5 g по осям X, Y, Z

Table 3

Calculated results of the capacitance, pF, changes between the electrodes under the influence of 5 g acceleration along the X, Y, Z axes

Кристаллографическая ориентация кремния	Ось X	ΔC	Ось Y	ΔC	Ось Z	ΔC
(100)	1,3105	0,017	1,3281	0,00005	1,32815	0
(110)	1,31865	0,009	1,32805	0,0001	1,32815	0
(111)	1,3207	0,0075	1,3281	0,00005	1,32815	0

Таблица 4

Результаты расчетов изменения емкости, пФ, между электродами ЧЭ ММА при воздействии случайной вибрации по осям X, Y, Z

Table 4

Calculated results of the capacitance, pF, changes between the electrodes of the sensitive element of a capacitive MMA when exposed to random vibration along the X, Y, Z axes

Кристаллографическая ориентация кремния	Ось X		Ось Y		Ось Z	
	C	ΔC	C	ΔC	C	ΔC
(100)	0,5804	0,74	1,328	0,00015	1,328	0
(110)	0,9026	0,42	1,328	0,00015	1,328	0
(111)	1,0583	0,26	1,328	0,00015	1,328	0

Из сравнения результатов, приведенных в табл. 3 и 4, следует, что при воздействии по основной оси X ускорения 5 g изменение емкости составило 0,017 пФ (см. табл. 3), а при воздействии случайной вибрации это изменение равно 0,74 пФ (см. табл. 4) для ЧЭ ММА из кремния с кристаллографической ориентацией (100).

При моделировании в программе Ansys для случайных вибраций использовали уровень напряженности 1σ . Значение емкости, равное 0,74 пФ, получено за счет уменьшения отклонения подвижной инерционной массы. Выходной сигнал ЧЭ ММА,

предназначенного для измерения ускорения в диапазоне до $\pm 5 g$, при колебаниях воздействующего ускорения с амплитудой $\pm 5 g$ хорошо согласуется с профилем спектральной плотности мощности, и ММА адекватно функционирует. При воздействии на ЧЭ ММА случайной вибрации возникающие отклонения инерционной массы и изменения емкостей таковы, что на их фоне теряется полезный измерительный сигнал. Поэтому исследованная модель ЧЭ ММА может функционировать только при отсутствии случайной вибрации. На рис. 6 представлены результаты моделирования изменения емкости между подвижным и неподвижным электродами ЧЭ ММА при воздействии случайной вибрации. На рисунке схематично изображены два неподвижных электрода и подвижный электрод между ними. При воздействии случайной вибрации по оси X происходит изменение положения подвижного электрода между неподвижными, что влияет на емкость между неподвижными электродами.

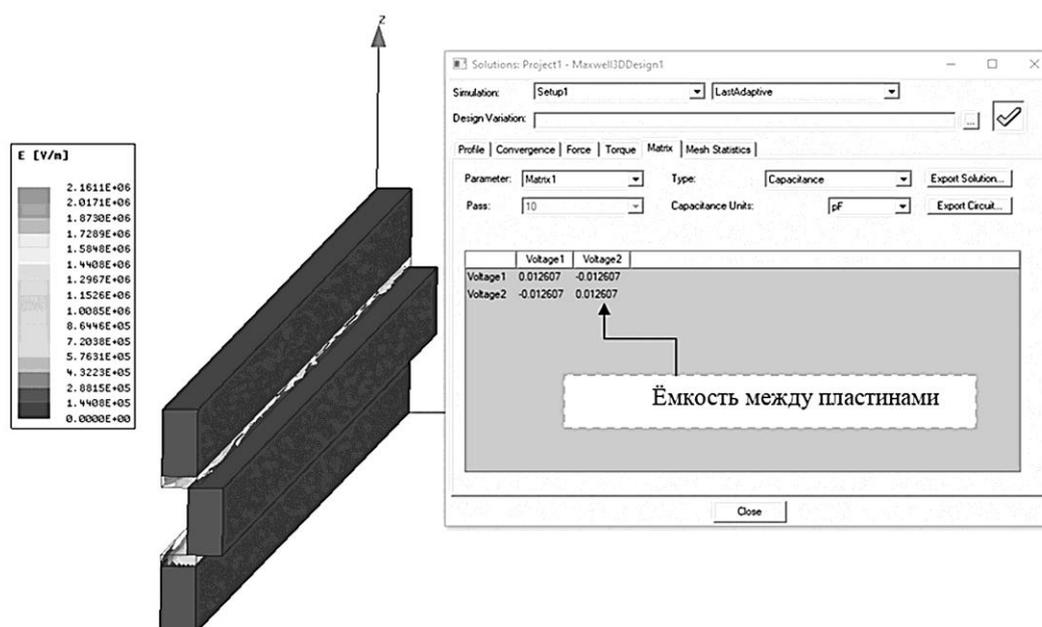


Рис. 6. Результаты моделирования изменения емкости в ЧЭ ММА с кристаллографической ориентацией кремния (100) при воздействии случайной вибрации по оси X

Fig. 6. The simulation results of the capacitance change in the sensitive element of a capacitive MMA made of silicon with orientation (100) when exposed to random vibration along the X axis

Исследование остаточного механического напряжения в ЧЭ ММА при воздействии на него случайной вибрации. Проведены расчеты остаточных механических напряжений в ЧЭ ММА из кремния при воздействии случайной вибрации с учетом кристаллографической ориентации поверхности конструктивов ЧЭ ММА. Результаты показаны на рис. 7 и приведены в табл. 5.

Из полученных данных следует, что максимальное остаточное механическое напряжение возникает в ЧЭ ММА с кристаллографической ориентацией кремния (110) при воздействии случайной вибрации на ЧЭ по оси чувствительности X . Для кристаллографических ориентаций (110) и (111) при воздействии случайной вибрации остаточные механические напряжения в ЧЭ ММА ненамного больше. Полученные результаты расчета показали, что для всех исследованных ЧЭ с разными кристаллографическими ориентациями поверхности остаточное механическое напряжение в ЧЭ ММА значительно меньше предела прочности кремния, равного 440 МПа [8].

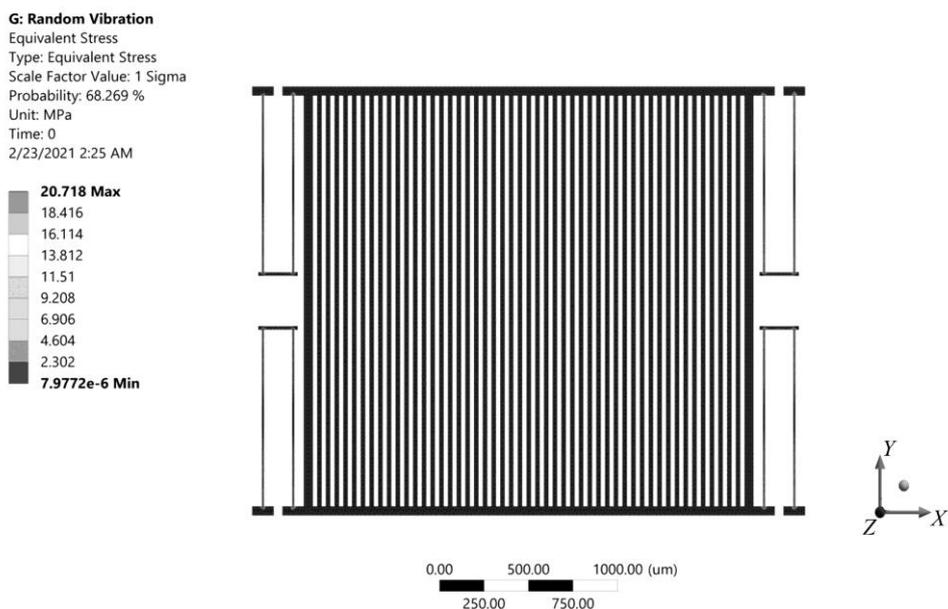


Рис. 7. Результат моделирования остаточного механического напряжения в ЧЭ ММА с кристаллографической ориентацией кремния (110) при воздействии случайной вибрации по оси X

Fig. 7. The simulation result of the residual mechanical stress in the sensitive element of a capacitive MMA made of silicon with a crystallographic orientation of the surface (110) when exposed to random vibrations along the X axis

Таблица 5

Результаты расчетов остаточного механического напряжения, МПа, в ЧЭ ММА при воздействии случайной вибрации по осям X, Y, Z

Table 5

Calculated results of the residual mechanical stress, MPa, in the sensitive element of a capacitive MMA when exposed to random vibration along the X, Y, Z axes

Ось	Кристаллографическая ориентация кремния		
	(100)	(110)	(111)
X	20,718	21,23	21,183
Y	0,813	0,783	0,7705
Z	10,17	4,044	1,2892

Заключение. Исследования показали работоспособность рассмотренной конструкции ЧЭ ММА в условиях значительных паразитных воздействий по нерабочим осям. Однако в условиях воздействия случайной вибрации исследованная модель ЧЭ ММА не подходит для применения. Данный вопрос требует дальнейшей проработки.

Исследование механического напряжения, возникающего в элементах конструкции ЧЭ ММА, показало, что оно незначительно и не влияет на работоспособность ЧЭ ММА. Установлено, что максимальное механическое напряжение возникает на стыке складчатой пружины и подвижной инерционной массы.

Литература

1. MEMS reliability in shock environments / *D. M. Tanner, J. A. Walraven, K. Helgesen et al.* // 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 38th Annual. San Jose, CA: IEEE, 2000. P. 129–138. doi: <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2000.843903>
2. MEMS reliability in vibration environments / *D. M. Tanner, J. A. Walraven, K. S. Helgesen et al.* // 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 38th Annual. San Jose, CA: IEEE, 2000. P. 139–145. doi: <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2000.843904>
3. Влияние внешней воздействующей вибрации на микроэлектромеханические системы-акселерометры / *А. С. Афанасьев, В. М. Полушкин, В. А. Соболев и др.* // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 5. С. 138–141. doi: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-138-143>
4. *Полушкин В. М., Сирыченко Н. А.* Вопросы контроля функциональных параметров микроэлектромеханических преобразователей параметров движения // Научно-технический сборник. Мытищи: 22 ЦНИИ МО РФ, 2008. № 60. С. 23–28.
5. *Liang Z., Lee G. C.* Random vibration: Mechanical, structural, and earthquake engineering applications. Boca Raton, FL; London; New York: CRC Press, 2015. XXVIII, 630 p.
6. *Йе Ко Ко Аунг, Аунг Тхура, Симонов Б. М., Тимошенко С. П.* Параметры чувствительного элемента сэндвич-конструкции емкостного микромеханического акселерометра // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 3. С. 257–266. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-3-257-266>
7. *Aung Thura, Simonov B. M.* Influence of random vibration on MEMS capacitive accelerometer // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Moscow: IEEE, 2018. P. 1595–1598. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317405>
8. *Вавилов В. Д., Тимошенко С. П., Тимошенко А. С.* Микросистемные датчики физических величин: монография: в 2 ч. М.: Техносфера, 2018. 549 с.

Статья поступила в редакцию 01.07.2021 г.; одобрена после рецензирования 01.07.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Йе Ко Ко Аунг – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yekokoagung64675@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

Тимошенко 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. Tanner D. M., Walraven J. A., Helgesen K., Irwin L. W., Brown F., Smith N. F., Masters N. MEMS reliability in shock environments. 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 38th Annual. San Jose, CA, IEEE, 2000, pp. 129–138. doi: <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2000.843903>
2. Tanner D. M., Walraven J. A., Helgesen K. S., Irwin L. W., Gregory D. L., Stake J. R., Smith N. F. MEMS reliability in vibration environments. 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 38th Annual. San Jose, CA, IEEE, 2000, pp. 139–145. doi: <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2000.843904>
3. Afanasyev A. S., Polushkin V. M., Sobolev V. A., Suslov V. M., Kotov Yu. T., Znamenskaya T. D. Influence of external vibration on microelectromechanical converters of linear acceleration. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 138–141. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-138-143>

4. Polushkin V. M., Siryachenko N. A. Questions of control of functional parameters of microelectromechanical converters of motion parameters. *Scientific and Technical Collection Book*. Mytishchi, 22 TsNII MO RF Publ., 2008, no. 60, pp. 23–28. (In Russian).

5. Liang Z., Lee G. C. *Random vibration: Mechanical, structural, and earthquake engineering applications*. Boca Raton, FL, London, New York, CRC Press, 2015. xxviii, 630 p.

6. Ye Ko Ko Aung, Aung Thura, Simonov B. M., Timoshenkov S. P. Parameters of sensitive element of capacitive micromechanical accelerometer with sandwich construction. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 257–266. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-3-257-266>

7. Aung Thura, Simonov B. M. Influence of random vibration on MEMS capacitive accelerometer. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. Moscow, IEEE, 2018, pp. 1595–1598. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317405>

8. Vavilov V. D., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. *Microsystem sensors of physical quantities*, monograph in 2 parts. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 549 p. (In Russian).

The article was submitted 01.07.2021; approved after reviewing 01.07.2021; accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

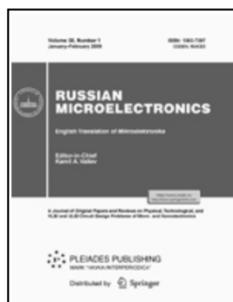
Ye Ko Ko Aung – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yekokoang64675@gmail.com

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

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

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 50, No. 7, 2021. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

<http://pleiades.online>

<http://link.springer.com>

Феррозондовые преобразователи слабого магнитного поля на основе стержневых сердечников из аморфных сплавов

Н. А. Соколов, А. И. Баяндин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Центральный научно-исследовательский испытательный
институт инженерных войск» Министерства обороны
Российской Федерации, р. п. Нахабино, Россия*

sniii_iv@mail.ru

Аннотация. Феррозондовые преобразователи магнитного поля (ПМП) применяются в ходе геофизических и радиофизических исследований, при разработке гражданской и специальной техники. ПМП является основным элементом магнитометрических сенсорных систем. Принцип действия феррозондовых ПМП основан на преобразовании напряженности внешнего постоянного поля в ЭДС, кратную по частоте питающему его переменному току. Преобразование оказывается возможным благодаря нелинейности магнитных характеристик его сердечников. В работе представлены основные результаты экспериментальных исследований разработанного феррозондового ПМП. Конструкция ПМП реализована на основе применения сердечников из аморфных сплавов с высокой магнитной проницаемостью. Исследованы конструктивно-схемотехнические решения, обеспечивающие повышение передаточной функции феррозондового ПМП при работе на более высокой частоте возбуждения сердечников. Выяснено, что рабочая частота возбуждения сердечников феррозондового ПМП определяется магнитными свойствами материала, из которого они изготовлены. Установлено, что для создания высокочувствительных феррозондовых ПМП целесообразно применять сердечники из аморфных сплавов типа АМАГ-170, обеспечивающих работу в полосе частот до 100 кГц, а значит имеющих возможность потенциального повышения коэффициента преобразования феррозондового ПМП за счет увеличения частоты возбуждения сердечника. Высокочувствительные феррозондовые ПМП перспективны для создания сенсорных систем.

Ключевые слова: магнитометрия, феррозонд, феррозондовые преобразователи магнитного поля, аморфные сплавы, магнитометр

Для цитирования: Соколов Н. А., Баяндин А. И. Феррозондовые преобразователи слабого магнитного поля на основе стержневых сердечников из аморфных сплавов // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 80–88. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-80-88>

Original article

Ferroprobe converters of a weak magnetic field based on rod cores made of amorphous alloys

N. A. Sokolov, A. I. Bayandin

FGBU "CRTI ET" of Ministry of Defense of the Russian Federation,
Nakhabino, Russia

cniii_iv@mail.ru

Abstract. Ferroprobe magnetic field converters (MFC) are used in the tasks of geophysical and radiophysical research, in the development of civil and special equipment. The MFC is the main element of magnetometric sensor systems. The principle of operation of ferroprobe MFC is based on the transformation of the external constant field strength into an EMF with frequency multiple of the frequency of the alternating current feeding it. The transformation is possible due to the non-linearity of the magnetic characteristics of its cores. In this work, the main results of experimental studies of the developed ferroprobe MFC are presented. This MFC design was implemented based on the use of cores made of amorphous alloys with high magnetic permeability. Structural and circuit design solutions that provide an increase in the transfer function of a ferroprobe MFC when operating at a higher core excitation frequency were investigated. It was stated that the operating frequency of excitation of the cores of the ferroprobe MFC is determined by the magnetic properties of the material from which they are made. It has been established that for sensitive ferroprobe MFC creation, it is advisable to use cores made of amorphous alloys of the AMAG-170 type, which provide operation in the frequency band up to 100 kHz, and therefore have the possibility of potentially increasing the conversion coefficient of the ferroprobe MFC by increasing the core excitation frequency. The highly sensitive ferroprobe MFCs are promising for sensor systems creation.

Keywords: magnetometry, ferroprobe, ferroprobe magnetic field converters, amorphous alloys, magnetometer

For citation: Sokolov N. A., Bayandin A. I. Ferroprobe converters of a weak magnetic field based on rod cores made of amorphous alloys. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 80–88. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-80-88>

Введение. В задачах геофизических и радиофизических исследований широко применяются методы измерений магнитных аномалий естественного магнитного поля Земли. Эти физические методы используются средствами обнаружения скрытых объектов. Прецизионные измерения слабых магнитных полей – быстро развивающийся раздел метрологии, они находят множество применений в геофизических, радиофизических, океанологических исследованиях [1, 2]. В настоящее время наибольшее распространение получили преобразователи магнитного поля (ПМП) следующих типов: магнитомеханические, магниторезистивные, индукционные, гальваномагнитные, магнитооптические, на основе ядерно-магнитного резонанса, сверхпроводящие квантовые и феррозондовые [3].

Анализ существующих типов ПМП показал, что наиболее подходящими для построения переносных магнитометрических сенсорных систем по совокупности характеристик являются феррозондовые ПМП. Они характеризуются более высокой надежностью и стойкостью к внешним воздействиям, меньшей себестоимостью (по сравнению с другими типами ПМП) ввиду технических и технологических особенностей производства данных изделий [4]. Информационный сигнал феррозондового ПМП содержит данные о величине и направлении действия вектора измеряемого магнитного поля.

Известны общие технические характеристики переносных феррозондовых магнитометров специального назначения, созданных на основе феррозондовых ПМП: чувствительность (коэффициент преобразования) до 0,055 мВ/нТл; разрешающая способность до 0,1 нТл; диапазон измерений порядка ± 100 нТл [5]. При разработке магнитометрических сенсорных систем необходимо обеспечить максимальную дальность действия, которая определяется чувствительностью датчиков. Несмотря на то что в известных феррозондовых ПМП достигнут высокий уровень технических характеристик, еще остаются направления их совершенствования и повышения чувствительности, в частности за счет применения новых магнитных материалов и схемотехнических решений, миниатюризации, снижения энергопотребления и затрат на производство [6].

Цель настоящей работы – исследование разработанного феррозондового ПМП, конструкция которого реализована на основе применения сердечников из аморфных сплавов с высокой магнитной проницаемостью.

Принцип построения преобразователя. Одним из типов феррозондовых ПМП является дифференциальный феррозонд, который содержит два идентичных стержневых сердечника из ферромагнетика и охватывающие их катушки возбуждения, питаемые переменным током, а также измерительные катушки. Принцип действия феррозондовых ПМП основан на преобразовании напряженности внешнего постоянного поля в ЭДС, кратную по частоте питающему его переменному току [7].

Выражение, характеризующее зависимость параметров дифференциального феррозонда от характеристик магнитопровода [8], имеет вид

$$E_2 = 4 \omega S N_2 H_0 \mu_0 \mu_2, \quad (1)$$

где E_2 – амплитуда напряжения в сигнальной обмотке, охватывающей оба сердечника, мВ; ω – циклическая частота возбуждения сердечника ПМП, рад/мс; S – поперечное сечение сердечника, мм²; N_2 – количество витков вторичной обмотки; H_0 – внешнее поле, направленное вдоль сердечников, А/м; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ_2 – относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Из (1) видно, что при прочих равных условиях, например одинаковых конструктивных параметрах феррозонда, всегда имеется резерв повышения его чувствительности (коэффициента преобразования) за счет увеличения частоты возбуждения сердечника. В свою очередь, рабочая частота возбуждения сердечников феррозондового ПМП определяется магнитными свойствами материала, из которого они изготовлены.

Для оценки параметров и определения оптимального материала для изготовления сердечника испытаны образцы пермаллового сплава 80НХС и аморфных сплавов 84КХСР, 82КЗХСР и АМАГ-170 (рис. 1). В процессе измерений проведены парная сортировка и отбор заготовок по два идентичных образца стержневых сердечников с равными значениями относительной магнитной проницаемости. Габаритные размеры образцов миниатюрных стержневых сердечников: длина 20 мм; ширина 2 мм; толщина 25–32 мкм.

Сравнительная оценка зависимости частоты перемагничивания от относительной магнитной проницаемости μ_2 сердечников выполнена методом преобразования параметров LC тестового колебательного контура в период колебаний T и измерения собственной резонансной частоты (периода) колебаний выходного сигнала измерительного генератора и амплитуды напряжения выходного сигнала с сердечником и без него (феррорезонанса) на различных рабочих частотах в диапазоне 100 Гц–500 кГц [9]. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость феррорезонанса (изменение амплитуды напряжения выходного сигнала в тестовом колебательном контуре) от частоты колебаний для стержневых сердечников из различных сплавов. Из рисунка видно, что для создания высокочувствительных феррозондовых ПМП целесообразно применение сердечников из аморфных сплавов типа АМАГ-170, обеспечивающих работу в полосе частот до 100 кГц, а также потенциальную возможность повышения коэффициента преобразования феррозондового ПМП за счет увеличения частоты возбуждения сердечника. Кроме того, применение сплава АМАГ-170 не требует специализированного оборудования и определенных условий для нарезки на полосы требуемого размера (закалка, лазерная резка и т. п.).

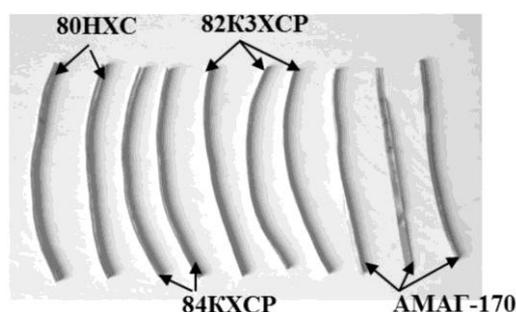


Рис. 1. Образцы стержневых сердечников

Fig. 1. Samples of rod cores

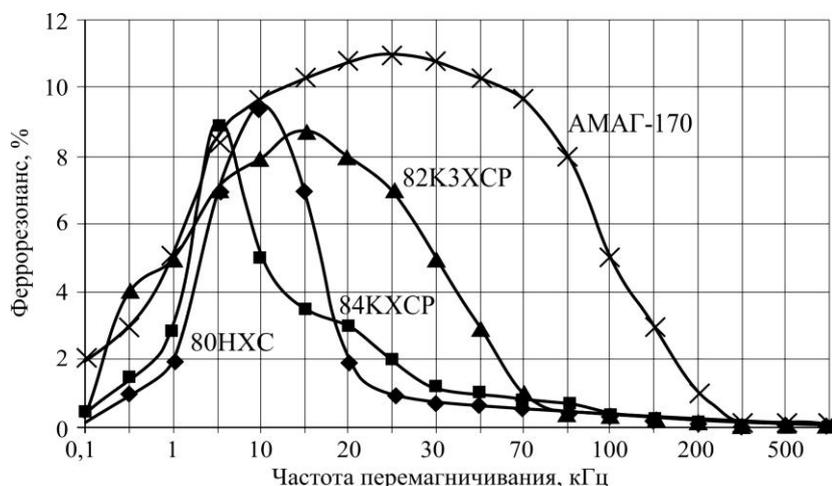


Рис. 2. Экспериментальная зависимость феррорезонанса колебательного контура от частоты перемагничивания стержневых сердечников из различных сплавов

Fig. 2. Experimental dependences of the vibrational circuit ferroresonance on the frequency of magnetization reversal for rod cores made of various alloys

Конструкция феррозондового ПМП. В настоящее время в схемах возбуждения и преобразования сигналов феррозондовых ПМП широко применяются электронные усилители напряжения. Однако применение усилителей сигнала по напряжению в данных электронных схемах имеет недостатки: относительно большое количество витков катушек (от нескольких сотен до тысячи витков), что обуславливает относительно высокое напряжение питания, необходимое для возбуждения феррозонда, а также большую массу и га-

бариты феррозонда. Исключить недостатки, присущие схемам, основанным на усилении напряжения полезного сигнала, и являющиеся существенными при батарейном питании (от 1,5 до 3 В), позволит применение электронных усилителей тока [10]. Функциональная схема разработанного феррозондового ПМП на основе двух стержневых сердечников из аморфного сплава АМАГ-170 приведена на рис. 3.

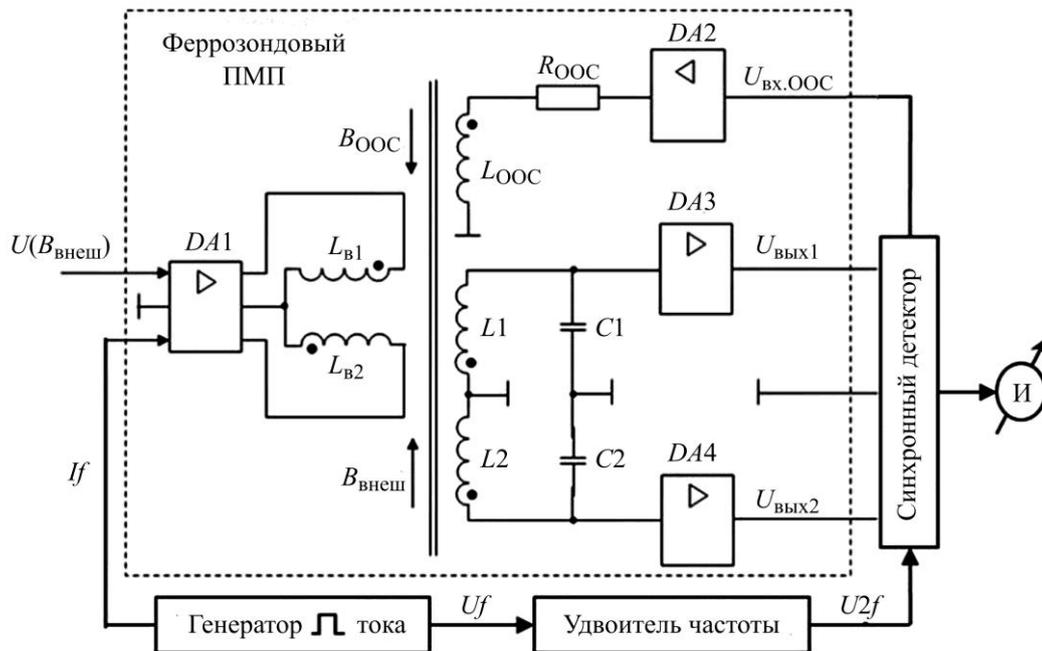


Рис. 3. Функциональная схема разработанного феррозондового ПМП
 Fig. 3. Functional diagram of the developed ferroprobe MFC

Разработанный феррозондовый ПМП состоит из двух сердечников из аморфного ферромагнитного сплава, усилителя $DA1$ импульсного тока возбуждения, катушек возбуждения L_{B1} , L_{B2} , измерительных катушек $L1$, $L2$, конденсаторов $C1$, $C2$, образующих измерительный колебательный контур, усилителей тока $DA3$, $DA4$, включенных в режиме повторителей напряжения, обмотки отрицательной обратной связи (ООС) $L_{ООС}$, резистора отрицательной обратной связи $R_{ООС}$ и усилителя постоянного тока $DA2$ в цепи обратной связи.

Для создания в объеме сердечников магнитного поля обмотки L_{B1} , L_{B2} возбуждаются переменным током через усилитель $DA1$. Протекающий в обмотках возбуждения L_{B1} , L_{B2} ток создает в объеме сердечников поля, равные по величине, но противоположные по направленности, которые вызывают возбуждение вторичных измерительных обмоток $L1$, $L2$ и генерацию переменного тока в колебательном контуре, образованном обмотками $L1$, $L2$ и конденсаторами $C1$, $C2$. Наилучшие результаты можно получить, если возбуждать обмотки L_{B1} , L_{B2} знакопеременными прямоугольными импульсами тока с синхронным детектированием четных гармоник и последующим суммированием результатов. При низковольтном питании переносной аппаратуры (от 1,5 до 3 В) включение усилителей тока $DA3$, $DA4$ в режиме повторителей напряжения по двухтактной схеме усиления ($DA3$ усиливает по положительному полупериоду, а $DA4$ – по отрицательному) позволяет обеспечить снижение потребления мощности за счет повышения

коэффициента полезного действия схемы усиления. Внешнее поле в объеме феррозондового ПМП компенсируется внутренним полем, создаваемым в обмотке отрицательной обратной связи $L_{ООС}$, в которой протекает ток через резистор $R_{ООС}$ и усилитель $DA2$. Основным канал в этом случае выполняет функцию нуля-индикатора, тогда как оценка измеряемого поля проводится по измерению тока в цепи отрицательной обратной связи, а ток компенсации вырабатывается основным каналом с $L1, L2$. Таким образом, погрешность магнитометрического канала уменьшается за счет замены менее стабильной цепи прямого преобразования более стабильной цепью обратного преобразования [7].

Разработанный феррозондовый ПМП отличается от известных конструкций применением сердечника из аморфного сплава АМАГ-170 с заданными расчетными размерами $40 \times 2 \times 0,02$ мм и возбуждением сердечника слабым током с использованием глубокой отрицательной обратной связи. Передаточная характеристика разработанного феррозондового ПМП для различных частот возбуждения сердечников представлена на рис. 4. Видно, что передаточная характеристика феррозондового ПМП возрастает при работе на более высокой частоте возбуждения ($f = 25$ кГц) сердечника.

При сравнении параметров чувствительности ПМП различных конструкций и принципа действия проблемой является создание идентичных условий для измерений как для серийных полевых изделий, так и для исследуемых макетных образцов дискретных феррозондовых ПМП, которые на данном этапе разработки еще не могут быть испытаны в полевых условиях [11, 12]. Экспериментально чувствительность G (коэффициент преобразования) может быть определена с помощью наложения на феррозонд поля, параметры которого заранее известны [13]. Решение данной проблемы осуществляется созданием в лабораторных условиях калиброванных однородных постоянных и низкочастотных переменных магнитных полей одной пространственной ориентации с помощью системы парных катушек Гельмгольца. Принцип действия системы основан на создании однородного магнитного поля необходимой величины в определенном внутреннем объеме трубы для постановки физических экспериментов с помощью круглых соосных идентичных (парных) катушек Гельмгольца и компенсации в этом объеме внешнего магнитного поля с помощью квадратных соосных парных катушек Гельмгольца. Конструктивно система выполнена в виде двух групп идентичных круглых и квадратных катушек Гельмгольца из одинакового числа витков, размещенных на крепежной (направляющей) трубе. Однородное магнитное поле создается во внутреннем объеме крепежной трубы. Испытуемый феррозонд устанавливается в центре колец Гельмгольца таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с осью колец.

Известны исследования дальности обнаружения стандартных ферромагнитных объектов феррозондовыми магнитометрами промышленного производства [14, 15]. Экспериментальные оценки чувствительности разработанного феррозондового ПМП на разных частотах возбуждения сердечников представлены на рис. 5. Видно, что отноше-

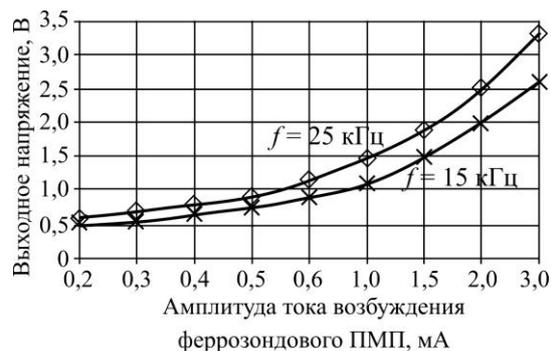


Рис. 4. Передаточная характеристика разработанного феррозондового ПМП для различных частот возбуждения сердечников

Fig. 4. Transfer characteristic of the developed ferroprobe MFC for various core excitation frequencies

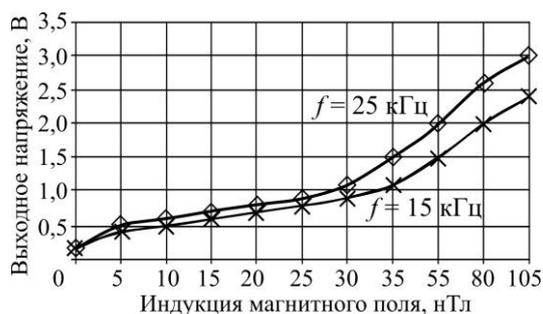


Рис. 5. Экспериментальная зависимость амплитуды выходного сигнала разработанного феррозондового ПМП от воздействующего магнитного поля

Fig. 5. Experimental dependences of the amplitude of the output signal of the developed ferroprobe MFC on the acting magnetic field

$$E_2(B) = -0,0002B^5 + 0,0049B^4 - 0,044B^3 + 0,1484B^2 - 0,026B + 0,0988,$$

$$E_2(B) = -0,0002B^5 + 0,0041B^4 - 0,0241B^3 + 0,0013B^2 + 0,394B - 0,1952,$$

где E_2 – амплитуда напряжения в сигнальной обмотке, В; B – модуль вектора магнитной индукции, нТл, $B \in (0; 105)$.

Заключение. Феррозондовый ПМП, разработанный на основе сердечников из аморфного сплава АМАГ-170, с возбуждением сердечников слабым током с использованием глубокой отрицательной обратной связи имеет следующие преимущества перед известными аналогами: работает на более высокой частоте возбуждения сердечников, что, в свою очередь, обеспечивает повышение передаточной функции (чувствительности) до уровня приблизительно 0,023 и 0,029 В/нТл для частоты возбуждения сердечников 15 и 25 кГц соответственно при сохранении разрешающей способности не хуже 0,1 нТл.

Новизна разработанного феррозондового ПМП подтверждается патентом РФ на изобретение № 2757650 [17].

Литература

1. 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: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-5-432-439>
2. Буслов И., Бауткин В., Дранезо А., Ярмолович В. Датчики слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника. 2011. № 1. С. 12–17.
3. 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.
4. Звездинский С. С., Парфенцев И. В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2008. № 2. С. 8–17.
5. Власкин К. И. Разработка электромагнитных систем малогабаритных первичных преобразователей феррозондового типа: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 155 с.
6. Ferex 4.032: Technical description. Ed. 09/2000. Reutlingen: Institut Dr. Foerster, 2000. 16 p.
7. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 187 с.
8. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. 4-е изд. М.: Едиториал УРСС, 2020. 400 с.
9. Valverde V., Mazón A. J., Zamora I., Buigues G. Ferroresonance in voltage transformers: analysis and simulations // International Conference on Renewable Energy and Power Quality Journal (ICREPQ'13). 2007. Vol. 1. No. 5. P. 465–471. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj05.317>

10. Соколов Н. А., Рычков А. В., Щербаков Г. Н., Ефремов И. А. Многоканальная магнитометрическая система для повышения поисковых возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов // Электричество. 2021. № 7. С. 51–60. doi: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-7-51-60>
11. Звездинский С. С., Парфёнец И. В., Соколов Н. А. Новые модели сигналаобразования в пассивном распределенном магнитометрическом преобразователе // Радиотехника. 2019. № 2. С. 17–20. doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-201902-03>
12. Магнитометрический бомбоискатель МБИ-П: техническое описание и инструкция по эксплуатации БИВР.411172.001 ТО. М., [б. и.]. 71 с.
13. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969. 168 с.
14. Щербаков Г. Н., Анцелевич М. А. Новые методы обнаружения скрытых объектов: борьба с терроризмом, гуманитарное разминирование, защита информации, контроль подземных коммуникаций, археология, экология. М.: Эльф ИПР, 2011. 503 с.
15. The International Mine Action Standards (IMAS): [web]. URL: <https://www.mineactionstandards.org/> (дата обращения: 05.08.2021).
16. Mathcad: математическое ПО для инженерных расчетов: [электронный ресурс]. URL: <https://www.mathcad.com/ru/> (дата обращения: 25.08.2021).
17. Пат. 2757650 РФ. Феррозондовый магнитометрический датчик / Н. А. Соколов. Заявл. 13.04.2021; опубл. 19.10.2021, Бюл. № 29. 9 с.

Статья поступила в редакцию 27.09.2021 г.; одобрена после рецензирования 27.09.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Соколов Николай Александрович – старший научный сотрудник ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 143432, Московская обл., Нахабино, ул. Карбышева, 2), sniii_iv@mail.ru

Баяндин Алексей Иванович – старший научный сотрудник ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 143432, Московская обл., Нахабино, ул. Карбышева, 2), sniii_iv@mail.ru

References

1. Amelichev V. V., Reznev A. A., Saurov A. N. Microsystems with high conversion coefficient of a weak magnetic field based on magnetoresistive nanostructures. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 432–439. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2020-25-5-432-439>
2. Buslov I., Bautkin V., Drapezo A., Yarmolovich V. Hall-effect sensors of weak magnetic fields. *Sovremennaya elektronika*, 2011, no. 1, pp. 12–17. (In Russian).
3. Amelichev V. V., Abanin I. E., Aravin V. V., Kostyuk D. V., Kasatkin S. I., Reznev A. A., Saurov A. N. Development of magneto-semiconductor microsystems technology. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 505–510. (In Russian).
4. Zvezhinskiy S. S., Parfentsev I. V. Magnetometric method of explosive ordnance reconnaissance. *Spetstekhnika i svyaz*, 2008, no. 2, pp. 8–17. (In Russian).
5. Vlaskin K. I. *Development of electromagnetic systems of small-sized primary ferrosonde type converters*. Cand. Sci. (Eng.) diss. Ufa, 2016. 155 p. (In Russian).
6. *Ferex 4.032: Technical description*. Ed. 09/2000. Reutlingen, Institut Dr. Foerster, 2000. 16 p.
7. Afanas'yev Yu. V. *Ferrosonde instruments*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 187 p. (In Russian).
8. Nikol'skiy V. V. *Electromagnetic field theory*. 4th ed. Moscow, Editorial URSS, 2020. 400 p. (In Russian).
9. Valverde V., Mazón A. J., Zamora I., Buigues G. Ferroresonance in voltage transformers: analysis and simulations. *International Conference on Renewable Energy and Power Quality Journal (ICREPQ'13)*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 465–471. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj05.317>

10. Sokolov N. A., Rychkov A. V., Shcherbakov G. N., Efremov I. A. Multichannel magnetometric system for increasing the search capabilities of autonomous uninhabited underwater vehicles. *Elektrichestvo*, 2021, no. 7, pp. 51–60. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-7-51-60>
11. Zwierzynski S. S., Parfentsev I. V., Sokolov N. A. New signal formation models for passive distributed magnetometer. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2019, no. 2, pp. 17–20. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-201902-03>
12. *Magnetometric bomb detector MBI-P: technical description and operating instructions BIVR.411172.001 TO*. Moscow, s. n. 71 p. (In Russian).
13. Afanas'yev Yu. V. *Ferropobes*. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 168 p. (In Russian).
14. Shcherbakov G. N., Antselevich M. A. *New methods of hidden objects location: combating terrorism, humanitarian demining, information protection, control of underground communications, archeology, ecology*. Moscow, Elf IPR Publ., 2011. 503 p. (In Russian).
15. *The International Mine Action Standards (IMAS)*. Available at: <https://www.mineactionstandards.org/> (accessed: 05.08.2021).
16. *Mathcad: Math Software for Engineering Calculations*. Available at: <https://www.mathcad.com/en/> (accessed: 25.08.2021).
17. Sokolov N. A. *Ferrozona magnetometric sensor*. Patent 2757650 RF, publ. 19.10.2021, Bul. no. 29. 9 p. (In Russian).

The article was submitted 27.09.2021; approved after reviewing 27.09.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Nikolay A. Sokolov – Senior Researcher, FGBU “CRTI ET” Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 143432, Moscow oblast, Nakhabino, Karbyshev st., 2), cniii_iv@mail.ru

Alexey I. Bayandin – Senior Researcher, FGBU “CRTI ET” Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 143432, Moscow oblast, Nakhabino, Karbyshev st., 2), cniii_iv@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2021 гг. доступны на сайтах
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия
высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

Научная статья

УДК [612.13:612.141]:001.891.573

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-89-105

**Персонализированная математическая модель
сердечно-сосудистой системы
с механизмом барорефлекса**

Е. Н. Рубцова

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

*Первый Московский государственный медицинский университет
имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия*

rubtsova@bms.zone

Аннотация. Барорефлекс – один из механизмов автоматической регуляции давления сердечно-сосудистой системы. Он обеспечивает поддержание давления в системе на необходимом уровне, реагируя на изменения активности пациента. В работе описана математическая модель сердечно-сосудистой системы с точки зрения глобальных распределений параметров: давления, потоков и объемов в отделах сердечно-сосудистой системы. Показано, что модель воспроизводит нормальное и педиатрическое кровообращения, сердечную недостаточность с точностью, удовлетворяющей целям моделирования. Механизм автоматической регуляции давления демонстрирует изменения, наблюдаемые у пациента с нормальным кровообращением при увеличении физической активности. В состоянии покоя частота сердечных сокращений составляет 80 уд/мин при среднем артериальном давлении 104 мм рт. ст. и скорости кровотока 5,4 л/мин, в состоянии активности частота сердечных сокращений возрастает до 130 уд/мин при давлении 108 мм рт. ст., скорость кровотока увеличивается до 8 л/мин. Проведено сравнение по четырем наиболее важным параметрам кровообращения. Установлено, что модель воспроизводит параметры кровообращения с достаточной точностью – относительная погрешность составляет не более 6 %. Разработанная модель может применяться для персонализированного моделирования кровообращения пациентов с учетом их индивидуальных особенностей, таких как возраст, телосложение, заболевания, а также различного уровня физической активности. Для дальнейшего изучения модель может быть дополнена насосом механической поддержки кровообращения при сердечной недостаточности с целью изучения взаимодействий в биотехнической системе.

Ключевые слова: барорефлекс, математические модели, сердечно-сосудистая система, сердечная недостаточность, педиатрическое кровообращение

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-49-04404).

Для цитирования: Рубцова Е. Н. Персонализированная математическая модель сердечно-сосудистой системы с механизмом барорефлекса // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 89–105. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-89-105>

Original article

The personalized mathematical model of the cardiovascular system with baroreflex

E. N. Rubtsova

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia*

rubtsova@bms.zone

Abstract. Patient's physical activity is one of the most important indicators that influences the cardiovascular conditions. The baroreflex is the mechanism that contribute to the regulation of arterial blood pressure. It maintains an optimal level of the arterial pressure as a response to changes in the patient's activity. This work considers the developed mathematical model describing the cardiovascular system from the point of view of global distributions of parameters: pressures, flows and volumes in the parts of the cardiovascular system. It was shown that the model reproduces normal blood circulation, heart failure and pediatric circulation with an accuracy that meets the goals of modeling. Blood pressure automated regulation mechanism represents changes that occur during an increased level of activity for a healthy patient. The heart rate during the state of rest is about 80 bpm; the mean arterial pressure is 104 mm Hg and the flow rate in the system is 5.4 l/min. During the physical activity the heart rate increases to 130 bpm; the mean arterial pressure is 108 mm Hg and the flow rate in the system is 8 l/min. A comparison was made for the four most important parameters of blood circulation. It has been established that the model reproduced the parameters of blood circulation with sufficient accuracy: the relative error was less than 6 %. The developed model can be used in personalized medicine for individual modeling for the patient's blood circulation with account taken of various parameters of the patient: age, physique, diseases, and different levels of physical activity. For the further research, the model can be supplemented with a ventricular assist device during the heart failure state with purpose to study interactions in the biotechnical system.

Keywords: baroreflex, mathematical model, cardiovascular system, heart failure, pediatric circulation

Funding: the work has been supported by the Russian Scientific Foundation (project No. 20-49-04404).

For citation: Rubtsova E. N. The personalized mathematical model of the cardiovascular system with baroreflex. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 89–105. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-89-105>

Введение. Модели сердечно-сосудистой системы (ССС) помогают представить основные принципы работы сердца, оценить взаимодействие с имплантируемыми устройствами, такими как сердечный клапан, искусственное сердце и аппарат вспомогательного кровообращения [1–6]. Особенно важны математические модели для случаев, когда невозможно *in vivo* воспроизвести моделируемое состояние или процесс. В таком случае единственно возможным способом изучения остается математическое моделирование.

Состояние ССС меняется в зависимости от возраста, заболеваний, внешней среды и уровня активности человека. В норме давление в ССС 122/78 мм рт. ст. при скорости кровотока 5 л/мин, при сердечной недостаточности (СН) давление 96/63 мм рт. ст. при скорости кровотока 3,7 л/мин, т. е. СН характеризуется сниженными показателями кровообращения [7–10]. Сравнивая кровообращение взрослого и педиатрического пациентов, можно отметить сниженные показатели кровообращения: давление педиатрического пациента в возрасте четырех лет составляет 78/54 мм рт. ст. при скорости кровотока 3,3 л/мин, что отвечает физиологическим потребностям [11–13]. Возрастные изменения и изменения, возникающие под действием заболеваний, можно назвать квазистатическими, они происходят медленно, и в таком состоянии ССС находится продолжительное время. В течение дня человек выполняет разные по уровню активности действия – покой, физическая активность различной степени, и ССС отвечает на эти изменения. С увеличением уровня активности возрастают сила кровотока и частота сердечных сокращений. За реагирование на изменения потребностей кровообращения отвечают механизмы автоматической регуляции давления [14].

Барорефлекс – это один из механизмов автоматической регуляции давления ССС, обеспечивающий поддержание давления в системе на необходимом уровне, реагируя на изменения активности пациента. Барорефлекс представляет собой отрицательную обратную связь: повышение давления в системе действует на барорецепторы, которые посылают в продолговатый мозг сигнал о необходимости снижения сосудистого сопротивления и частоты сердечных сокращений [14–16]. Механизм барорефлекса недостаточно изучен. Для его моделирования используются технологии *in vivo* и *in vitro*. В частности, математическая модель, описанная в работе [17], применяется исследователями для моделирования афферентного симпатического и вагусного эфферентных путей регуляции барорефлекса [9, 16, 18, 19]. В работе [20] представлена математическая модель барорефлекса, описанная с помощью уравнений симпатической и вагусной регуляции. Модель, представленная в работе [8], применяется для моделирования взаимодействий с ССС и аппаратом вспомогательного кровообращения. Данные модели барорефлекса оперируют параметрами представленных моделей ССС.

Цель настоящей работы – разработка персонализированной математической модели автоматического механизма управления ССС – барорефлекса, которая позволит изучать кровообращение при разных физиологических состояниях: нормальном кровообращении, СН и педиатрическом кровообращении, а также при различной физической активности пациента.

Математическая модель сердечно-сосудистой системы. В основе моделирования – метод электрогидравлической аналогии, ставящий в соответствие гидравлическим параметрам электрические. Математические модели представляют собой системы дифференциальных уравнений, связывающих гидродинамические параметры. Количество нелинейных элементов (растяжимость органа или сосуда, местная инерционность сосуда)

в системе определяет число уравнений. Такая математическая модель называется моделью с сосредоточенными параметрами, она позволяет изучать глобальные распределения параметров в ССС без учета особенностей отдельных сосудов [1, 3–5, 21]. Математическое моделирование проводится в программной среде MATLAB. Разработанная математическая модель ССС включает в себя большой и малый круги кровообращения (рис. 1). По структурным составляющим большой и малые круги идентичны. Большой круг кровообращения представлен левым предсердием и левым желудочком, митральным и аортальным клапанами, аортой и сосудами большого круга кровообращения. Малый круг кровообращения содержит правое предсердие и правый желудочек; трехстворчатый и легочный клапаны; легочную артерию и сосуды малого круга кровообращения. Согласно теории моделей с сосредоточенными параметрами крупные сосуды представляют собой эластичные резервуары, куда сердце накачивает кровь во время фазы выброса, а затем сосуды сжимаются и выталкивают кровь в более мелкие сосуды. [1, 3–5]. Самый крупный по диаметру сосуд – аорта – для повышения точности модели выделен отдельно, его растяжимость в модели представлена конденсатором C_7 . Номиналы элементов выбраны согласно моделируемому физиологическому состоянию (нормальное кровообращение, СН, педиатрическое кровообращение) и приведены в табл. 1 [7, 10, 11, 13].

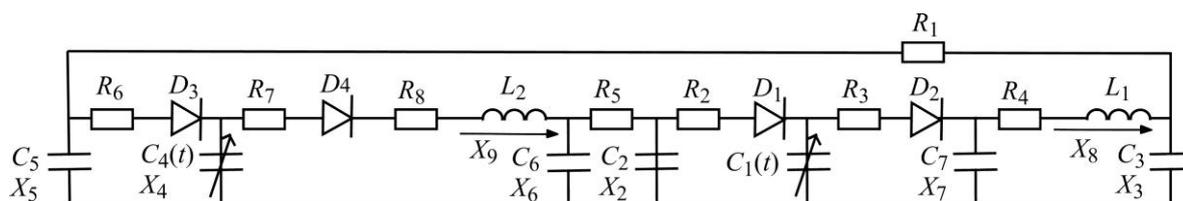


Рис. 1. Модель сердечно-сосудистой системы
Fig. 1. Cardiovascular system model

Метод математического описания ССС в виде системы дифференциальных уравнений, используемый для моделирования, подробно рассмотрен в работе [21]. ССС функционирует по четырем фазам сердечного цикла, что обусловлено открытием и закрытием сердечных клапанов. Для каждой фазы модель описывается системой дифференциальных уравнений, которую для удобства можно записать в матричном виде:

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)b(t), \quad (1)$$

где \dot{x} – вектор-столбец производных вектора-столбца переменных x :

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9]^T. \quad (2)$$

Здесь x_1 – давление левого желудочка; x_2 – давление левого предсердия; x_3 – давление системных сосудов; x_4 – давление правого желудочка; x_5 – давление правого предсердия; x_6 – давление легочных сосудов; x_7 – давление аорты; x_8 – аортальный поток; x_9 – поток легочной артерии; $A(t)$ – матрица состояния системы.

Таблица 1

Параметры и переменные модели сердечно-сосудистой системы

Table 1

Parameters and variables of the cardiovascular model

Органы ССС	Параметр	Нормальное кровообращение	Сердечная недостаточность	Педиатрическое кровообращение
Сопротивление, мм рт. ст.·с/мл				
Сосуды большого круга	R_1	1	1,15	1
Митральный клапан	R_2	–	0,005	–
Аортальный клапан	R_3	0,017		
Характеристическое сопротивление аорты	R_4	0,06		
Сосуды малого круга	R_5	0,1	–	0,21
Трехстворчатый клапан	R_6	0,005		
Легочный клапан	R_7	0,00025		
Характеристическое сопротивление легочной артерии	R_8	0,025		0,04
Растяжимость стенок, мл/мм рт. ст.				
Левый желудочек	$C_1(t)$	$1/E_1(t)$		
Левое предсердие	C_2	4,4		
Сосуды большого круга	C_3	0,35	0,37	0,36
Правый желудочек	$C_4(t)$	$1/E_2(t)$		
Правое предсердие	C_5	6,6		
Сосуды малого круга	C_6	3		
Аорта	C_7	0,8		0,6
Максимальное значение эластичности, мм рт. ст./мл				
Левый желудочек	E_{1max}	1,8	0,69	1,8
Правый желудочек	E_{2max}	0,6		
Минимальное значение эластичности, мм рт. ст./мл				
Левый желудочек	E_{1min}	0,05	0,04	0,06
Правый желудочек	E_{2min}	0,06		
Инерция крови, мм рт. ст.·с²/мл				
Аорта	L_1	0,0005		
Легочная артерия	L_2			
Клапаны				
Митральный	D_1	Не имеют численного значения		
Аортальный	D_2			
Трехстворчатый	D_3			
Легочный	D_4			
Объем желудочков при нулевом давлении, мл	V_0	14	30	4
Частота сердечных сокращений, уд/мин	HR	80	77	110

Матрица состояния имеет вид

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{E}_1(t)}{E_1(t)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_5 C_2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_5 C_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_1 C_3} & 0 & \frac{1}{R_1 C_3} & 0 & 0 & \frac{1}{C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\dot{E}_2(t)}{E_2(t)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_1 C_5} & 0 & -\frac{1}{R_1 C_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_5 C_6} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5 C_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_7} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{R_4}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Добавочная функция равна:

$$B(t) = \begin{bmatrix} -E_1(t) & 0 & E_1(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -E_2(t)x_9 & 0 & E_2(t) \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_5} \\ 0 & \frac{x_9}{C_6} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_7} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Вектор-столбец, управляющий открытием клапанов, равен:

$$b(t) = \begin{bmatrix} \frac{(x_1 - x_7)\eta(x_1 - x_7)}{R_3} \\ \eta(x_4 - x_6) \\ \frac{(x_2 - x_1)\eta(x_2 - x_1)}{R_2} \\ \frac{(x_5 - x_4)\eta(x_5 - x_4)}{R_6} \end{bmatrix} \cdot \quad (5)$$

В (5) функция Хевисайда η обеспечивает функцию сердечных клапанов.

С помощью метода Эйлера, обобщенного для систем дифференциальных уравнений, уравнение (1) преобразовано для численного моделирования.

Сердечная недостаточность. Сравнивая ССС в нормальном состоянии и при СН, прежде всего, отметим, что моделируется СН левого желудочка с допущением, что правый функционирует нормально. СН левого желудочка – наиболее распространенный случай [22]. Это обусловлено физиологией кровообращения: нагрузка на левый желудочек больше, чем на правый. При СН наблюдаются изменения в ткани миокарда, характеризующиеся снижением сократительной способности желудочка, вследствие чего отмечается увеличение объема желудочка при сниженном сердечном выбросе и пониженном давлении [10, 23, 24].

Сократительная способность желудочка моделируется с помощью функции эластичности, которая определяет изменение давления при заданном изменении объема внутри камеры [25, 26]:

$$E(t) = \frac{P(t)}{V(t) - V_0}, \quad (6)$$

где $E(t)$ – изменяющаяся во времени эластичность; $P(t)$ – давление желудочка; $V(t)$ – объем желудочка; V_0 – эталонный объем (теоретический объем желудочка при нулевом давлении).

При СН степень эластичности уменьшается [26], мышечная ткань ослабевает и растягивается, соответственно, увеличивается объем желудочка при нулевом давлении V_0 [6]. Остальные параметры модели остаются такими же, как при нормальном кровообращении (см. табл. 1).

Педиатрическое кровообращение. Для моделирования выбрано нормальное кровообращение педиатрического пациента в возрасте четырех лет [11, 13] (см. табл. 1). Несмотря на то что детская ССС представляет собой уменьшенную копию взрослой, она имеет некоторые особенности. Например, объем сердца меньше, соответственно, сердечный выброс тоже меньше, а для полноценной циркуляции компенсация недостатка объема выброса обеспечивается увеличением частоты сердечных сокращений, давление в педиатрической ССС ниже, чем во взрослой (см. табл. 1).

Механизм автоматической регуляции давления – барорефлекс. Физическая активность пациента – один из важнейших показателей, влияющих на состояние ССС. Задача ССС (спит пациент или активно двигается) – реагировать на изменения потребности организма в уровне насыщения органов и тканей кислородом. Эту важнейшую функцию выполняет барорефлекс – естественная система обратной связи. Основной

действующей единицей этой системы являются барорецепторы – специализированные нейроны, располагающиеся в аорте и сонных артериях, реагирующие на изменение растяжения стенки сосуда. Под действием повышенного давления барорецепторы посылают нервные импульсы в продолговатый мозг. Импульсы подавляют вазомоторный центр, тем самым снижается число импульсов, передаваемых к сердцу и сосудам, что вызывает расширение сосудов и уменьшение частоты сердечных сокращений. И наоборот, при снижении артериального давления поток импульсов уменьшается, сосуды сужаются, а частота сердечных сокращений возрастает. Барорецепторы улавливают изменение артериального давления и дают команду ССС изменить частоту сердечных сокращений и периферическое сопротивление сосудов [14–16]. Петлю обратной связи механизма барорефлекса можно представить аналогично принципу ПИД-регулятора (рис. 2).

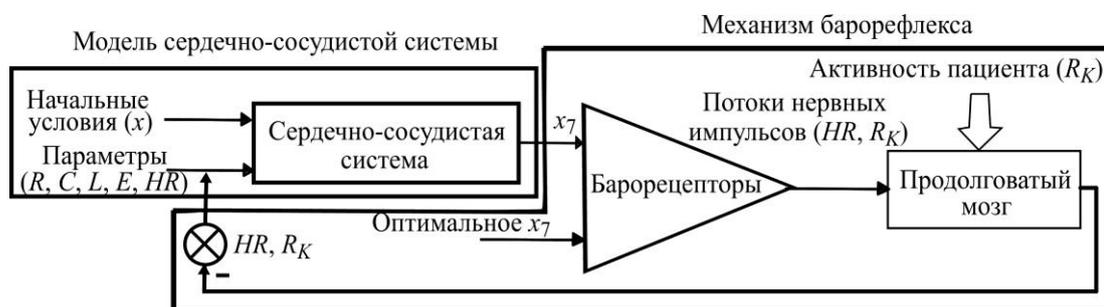


Рис. 2. Схематическое изображение принципа работы барорефлекса
 Fig. 2. Schematic diagram showing the principle of operation of the baroreflex

Для сравнения рассмотрим два физиологических состояния – покой и активность. Артериальное кровяное давление в обоих состояниях будет находиться на схожем уровне – оптимальном для ССС конкретного человека в зависимости от возраста, телосложения, заболеваний и т. д. Естественная задача барорефлекса – поддержание оптимального уровня давления. Частота сердечных сокращений и скорость кровотока будут различаться. Так, при возрастании активности наблюдается увеличение частоты сердечных сокращений и скорости кровотока в отличие от состояния покоя. Данное явление обусловлено изменением сосудистого сопротивления. В свою очередь, барорефлекс действует одновременно на частоту сердечных сокращений и на сопротивление сосудов (см. рис. 2) [14–16].

По закону Пуазейля скорость кровотока Q в сосуде прямо пропорциональна перепаду давления ΔP на концах сосуда и обратно пропорциональна сопротивлению сосуда R [5]:

$$Q = \frac{\Delta P}{R},$$

$$R = \frac{8\nu l}{\pi r^4}, \quad (7)$$

здесь ν – вязкость крови; l – длина сосуда; r – радиус сосуда.

Суммарное периферическое сопротивление сосудов вычисляется по формуле

$$R_{\Sigma} = NR,$$

где N – число сосудов.

При повышении активности в мышцах (см. рис. 2) увеличивается потребность в кислороде и для обеспечения большего притока крови к органам и тканям сосуды расширяются – увеличивается сосудистый просвет. Согласно формуле (7) сосудистое сопротивление обратно пропорционально четвертой степени радиуса сосуда: с повышением активности сопротивление сосудов снижается и, как следствие, увеличивается скорость кровотока. Однако сосудистый просвет увеличивается, в результате возрастает объем кровеносных сосудов и давление падает. Именно в этот момент активно включается в работу механизм барорефлекса. Барорецепторы в дуге аорты улавливают снижение артериального давления и дают команду вазомоторному центру на увеличение частоты сердечных сокращений и включение сосудосуживающего действия, вследствие чего увеличивается сосудистое сопротивление. Данный механизм работает по принципу отрицательной обратной связи, и на его активацию требуется времени меньше, чем длится одно сердечное сокращение. Еще до того как действующий сердечный цикл закончится, возрастает частота сердечных сокращений: кровь из желудочка выбрасывается чаще, под действием симпатической регуляции увеличивается сосудистое сопротивление и повышается давление крови. Аналогичное происходит и при переходе к состоянию покоя: мышцы расслабляются, уменьшается сосудистый просвет, в результате сосудистое сопротивление увеличивается. Потребность мышц в кислороде минимальная, скорость кровотока низкая и, как следствие, низкая частота сердечных сокращений. Под действием барорефлекса уравнивается оптимальное периферийное сопротивление.

Наибольшее сосудистое сопротивление в системе имеют капилляры – самые малые по диаметру сосуды, но самые многочисленные во всем организме. Именно их радиус и меняется при изменении активности [14], в то время как сопротивление крупных сосудов практически не зависит от активности. Говоря о сосудистом сопротивлении, будем иметь в виду суммарное сопротивление большого круга кровообращения R_1 , состоящее из зависящего от активности сопротивления капилляров R_K и неизменных сопротивлений артерий, артериол и вен.

Механизм барорефлекса реализован в виде дополнительной функции модели ССС. Ее задача соответствует задаче барорефлекса (предотвращение изменения артериального давления). Барорецепторы выступают в роли компаратора, т. е. сравнивают действующее среднее давление аорты \bar{x}_7 с оптимальным средним давлением аорты \tilde{x}_7 (см. рис. 2). Продолговатый мозг под действием нервных импульсов от барорецепторов и активности пациента принимает решение, в каком направлении менять управляющие параметры HR , R_K . Данный механизм можно описать в виде дифференциальных уравнений, представленных в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{HR} \\ \dot{R}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta((\tilde{x}_7 - dP) - \bar{x}_7) \\ \eta(\bar{x}_7 - (\tilde{x}_7 + dP)) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где k_1, k_2, h_1, h_2 – коэффициенты; dP – допустимое отклонение от точного значения оптимального среднего давления.

Моделирование различных типов кровообращения. С помощью модели, представленной на рис. 1, формул (1)–(5) проведено моделирование различных состояний ССС: нормальное кровообращение, СН и педиатрическое кровообращение. По функциональным составляющим все три моделируемых состояния идентичны, варьируются лишь численные значения параметров модели (см. табл. 1), поэтому для моделирования используется одна математическая модель с возможностью персонализации.

В результате моделирования получены распределения давлений и объемов в ССС. На рис. 3, а представлены распределения давлений в левом желудочке и аорте для трех моделируемых состояний в течение одного сердечного сокращения, на рис. 3, б – PV-диаграммы для левого желудочка. Проведя сравнение по четырем наиболее важным параметрам кровообращения (табл. 2), можно отметить, что модель воспроизводит параметры кровообращения с достаточной точностью: относительная погрешность составляет не более 6 %. Для сравнения выбраны значения показателей кровообращения из литературных источников [10, 11, 13, 27].

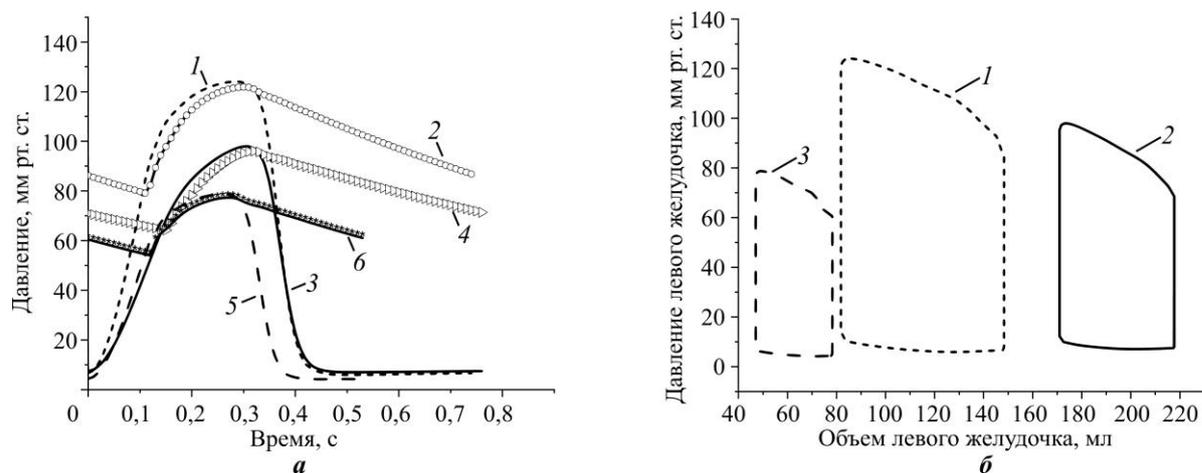


Рис. 3. Результаты моделирования нормального кровообращения, СН и педиатрического кровообращения: а – распределение давления в левом желудочке (ЛЖ) и аорте (1 – ЛЖ в норме; 2 – аорта в норме; 3 – ЛЖ при СН; 4 – аорта при СН; 5 – ЛЖ при педиатрическом кровообращении; 6 – аорта при педиатрическом кровообращении); б – PV-диаграммы (1 – нормальное кровообращение; 2 – СН; 3 – педиатрическое кровообращение)

Fig. 3. The results of simulation the normal blood circulation, the heart failure and pediatric circulation: a – distribution of pressure in the left ventricle and in the aorta (1 – left ventricular in health; 2 – aorta in health; 3 – left ventricular at heart failure; 4 – aorta at heart failure; 5 – left ventricular at pediatric circulation; 6 – aorta at pediatric circulation); b – PV-loops of the left ventricle (1 – normal blood circulation; 2 – heart failure; 3 – pediatric circulation)

Таблица 2
Нормальные показатели кровообращения и результаты моделирования

Normal indicators of blood circulation and simulation results

Table 2

Крово- обращение	Давление аорты, мм рт.ст.		Среднее давление легочных сосу- дов, мм рт.ст.		Сердечный вы- брос, л/мин		Конечный диасто- лический объем ле- вого желудочка, мл	
	Теория	Модели- рование	Теория	Модели- рование	Теория	Модели- рование	Теория	Модели- рование
Нормальное	122/78	122/79	18	18	5	5,3	147	148
Сердечная недостато- чность	96/63	96/64	24	22	3,7	3,6	229	218
Педиатри- ческое	78/54	77/54	16	18	3,3	3,4	74	78

Моделирование нормального кровообращения. Нормальное кровообращение характеризуется артериальным давлением 122/79 мм рт. ст. и объемной скоростью кровотока 5,3 л/мин при частоте сердечных сокращений 80 уд/мин [10]. Модель воспроизводит данные параметры с достаточной точностью (см. рис. 3, табл. 2). Конечный диастолический объем и среднее давление в сосудах малого круга кровообращения также находятся на соответствующем уровне, что говорит о точности модели и возможности ее применения для моделирования ССС при нормальном кровообращении.

Моделирование сердечной недостаточности. При СН наблюдаются изменения в ткани миокарда, в результате которых сердечная мышца уже не может полноценно сокращаться, уменьшается ударный объем, кровь застаивается в желудочке, вызывая его увеличение в объеме (см. рис. 3, б, табл. 2) [10]. Крови при каждом ударе выбрасывается меньше, а с учетом частоты сердечных сокращений сердечный выброс составляет 3,6 л/мин. Ослабленная сердечная мышца не может поддерживать артериальное давление на необходимом уровне, систолическое давление составляет 96 мм рт. ст., а диастолическое – 64 мм рт. ст. (см. рис. 3, а, табл. 2).

Сравнивая нормальное кровообращение и кровообращение при СН можно отметить принципиальные различия: артериальное давление при СН снижается, как и сердечный выброс, давление сосудов малого круга кровообращения растет, как и конечный диастолический объем [6, 8, 10]. Все эти изменения модель ССС воспроизводит с достаточной для целей моделирования точностью.

Моделирование кровообращения педиатрического пациента. Особенности кровообращения педиатрических пациентов обусловлены прежде всего размерами тела. Размер сердца тоже меньше: его объемы – конечный диастолический и ударный – меньше, чем у взрослых пациентов (см. рис. 3, б, табл. 2). Для компенсации необходимого уровня скорости кровотока частота сердечных сокращений педиатрического сердца больше и составляет 110 уд/мин (см. табл. 1). При этом обеспечивается сердечный выброс 3,4 л/мин (см. табл. 2), что соответствует нормальному кровообращению педиатрического пациента в возрасте четырех лет [11, 13]. Давление аорты у педиатрических пациентов составляет 77/54 мм рт. ст. (см. рис. 3, а, табл. 2) и повышается с возрастом, как и сердечный выброс, в то время как частота сердечных сокращений уменьшается [12].

Моделирование активности пациента с нормальным кровообращением. Активность пациента напрямую влияет на периферическое сосудистое сопротивление (6). Поэтому в качестве входной функции для модели ССС с интегрированным барорефлексом используется изменение сопротивления капилляров R_K . В свою очередь, функция барорефлекса отслеживает изменения среднего аортального давления и дает команду на изменение частоты сердечных сокращений и периферического сопротивления, если это необходимо (см. рис. 2, формулу (8)).

Сопротивление капилляров R_K изменяется в диапазоне 1–0,2 мм рт. ст.·с/мл, в то время как сопротивления артерий и вен постоянны и составляют 0,2 и 0,1 мм рт. ст.·с/мл соответственно. Суммарное сопротивление периферических сосудов R_1 изменяется в диапазоне 1,3–0,5 мм рт. ст.·с/мл. Меньшее сопротивление соответствует максимальной активности. Коэффициенты k_1 , k_2 , h_1 , h_2 в формуле (8) определены методом подбора для моделируемого физиологического состояния и равны 2 мм рт. ст./мл; 2 мм рт. ст./мл; 0,08 уд/с²; 0,05 уд/с² соответственно. Оптимальное среднее давление аорты \tilde{x}_7 определяется как среднее арифметическое между средними давлениями в состояниях покоя и активности [10] и составляет 103 мм рт. ст. Допустимое отклонение давления от точного значения оптимального среднего давления аорты dP определено как разница между средними давлениями в состояниях покоя и активности [10] и составляет 7 мм рт. ст.

Моделировался переход от состояния покоя к состоянию активности при периферическом сопротивлении сосудов R_1 , равном 1 и 0,2 мм рт. ст.·с/мл соответственно. Под действием барорефлекса при переходе увеличивается частота сердечных сокращений от 80 до 130 уд/мин, а также компенсируется снижение сосудистого сопротивления на 0,2 мм рт. ст.·с/мл. В результате воздействия механизма барорефлекса на модель ССС артериальное давление незначительно растет в допустимых пределах аналогично теоретическим значениям. Сердечный выброс увеличивается, что соответствует физиологическим изменениям (табл. 3) [10]. На рис. 4, а представлены зависимости давления левого желудочка и аорты для состояний покоя и активности. Диапазон изменения давления левого желудочка остается практически неизменным: сила сокращения в обоих случаях одинакова. Систолическое давление аорты также остается неизменным, оно определяется давлением в левом желудочке. В то же время диастолическое давление повышается с возрастанием активности, что обусловлено увеличением частоты сердечных сокращений: цикл длится меньше, соответственно диастолическое давление не успевает снизиться (см. табл. 3) [10]. Обратным к функции частоты является период сердечного сокращения, его можно оценить по длительности сердечного цикла в состояниях покоя и активности (см. рис. 4, а).

Таблица 3
Показатели нормального кровообращения в зависимости от состояния пациента
Table 3
The normal blood circulation indicators depending on patient's activity

Параметр	Покой		Активность	
	Теория	Моделирование	Теория	Моделирование
Частота сердечных сокращений, уд/мин	80	80	122	130
Среднее давление аорты, мм рт. ст.	100	104	107	108
Сердечный выброс, л/мин	5	5,4	8,2	8,0

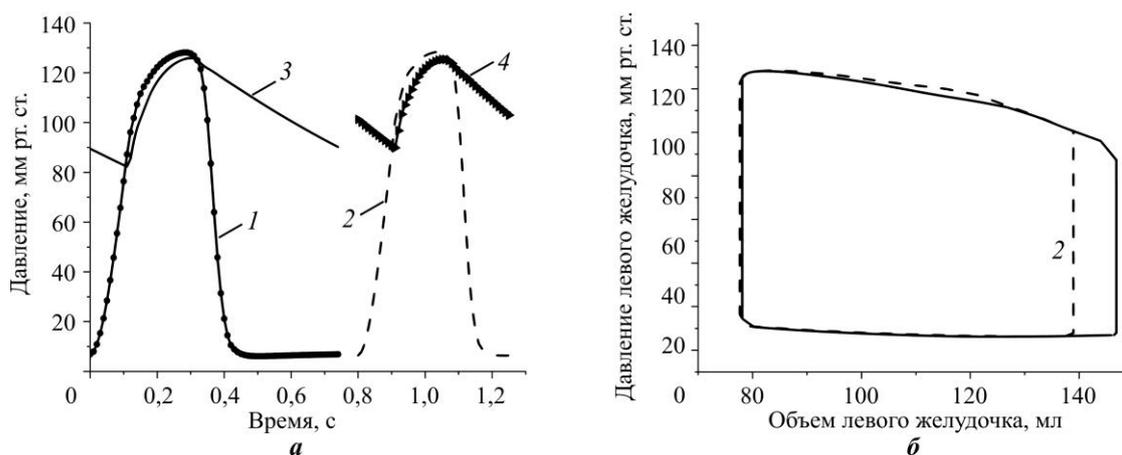


Рис. 4. Результаты моделирования нормального кровообращения: а – распределение давления в левом желудочке в состояниях покоя (1), активности (2) и аорте в состояниях покоя (3), активности (4); б – PV-диаграммы для состояния покоя (1), активности (2)

Fig. 4. The results of simulation the normal blood circulation at the rest and the active conditions: а – distribution of pressure in the left ventricle at rest (1), at the active condition (2) and in the aorta at rest (3), at the active condition (4); б – PV-loops for the state of rest (1), the active condition (2)

На рис. 4, б представлены *PV*-диаграммы для двух моделируемых состояний. В состоянии активности ударный объем снижается, что обусловлено возросшей частотой сердечных сокращений. По закону Франка – Старлинга чем больше сердечная мышца растянута поступающей кровью, тем больше сила сокращения и тем больше крови поступает в артериальную систему [28]. Время сердечного цикла уменьшается, поэтому меньший объем крови успевает накопиться в желудочке во время диастолической фазы. Соответственно, меньше крови выбрасывается при систолической фазе. Но такое незначительное уменьшение ударного объема в отличие от аналогичного при СН легко компенсируется увеличением частоты сердечных сокращений, и сердечный выброс возрастает от 5,4 до 8 л/мин (см. табл. 3) [10].

В случае с моделью ССС с интегрированным барорефлексом точность воспроизведения параметров снижается. Данный механизм реализован автоматически с использованием итерационного метода, относительная погрешность, составляющая 8 %, допустима и удовлетворяет целям моделирования.

Графическим представлением закона Франка – Старлинга является зависимость ударного объема желудочка от конечного диастолического давления (давления наполнения желудочка). Данная зависимость имеет более острый угол наклона при низких значениях давления и менее острый – при более высоких и в итоге становится параллельной оси давления при достижении насыщения. На положение зависимостей влияют следующие параметры: частота сердечных сокращений (более высокой частоте соответствует более высокий сердечный выброс); периферическое сосудистое сопротивление (чем выше активность, тем выше сердечный выброс); сила сердечного сокращения (чем больше эластичность, тем больше сердечный выброс как при нормальном кровообращении, так и при СН) [25, 28].

В результате моделирования механизма барорефлекса изменялись частота сердечных сокращений и периферическое сопротивление сосудов. С учетом данных изменений построены зависимости сердечного выброса и конечного диастолического давления (рис. 5). С целью верификации результатов моделирования значения сердечного выброса в зависимости от конечного диастолического давления в модели ССС соотнесены с кривыми Франка – Старлинга для состояний покоя и активности пациента (точки и кривые «покой» и «активность», см. рис. 5). Согласно физиологии в состоянии физической активности сердечный выброс больше, чем в состоянии покоя с близкими значениями конечного диастолического давления [25]. Полученные в модели ССС с механизмом барорефлекса точечные значения зависимости сердечного выброса от конечного диастолического давления лежат на зависимостях моделируемых состояний, что свидетельствует о выполнении механизма Франка – Старлинга в представленной модели [28].

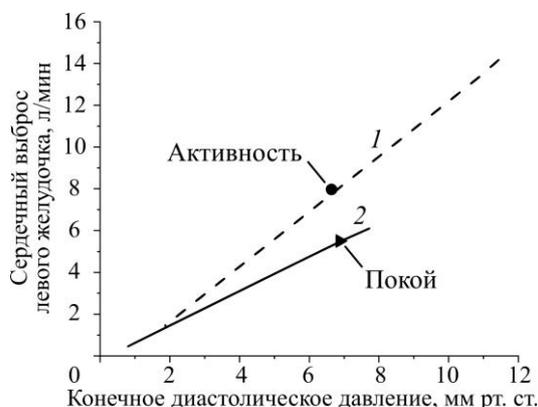


Рис. 5. Зависимости ударного объема от конечного диастолического давления в состояниях активности (1) и покоя (2)

Fig. 5. The relationship between end-diastolic pressure and the cardiac output at the active condition (1) and at the rest (2)

Результаты и их обсуждение. Разработанная модель подходит для персонализированного моделирования ССС в различных ее состояниях: нормальное кровообращение, СН и педиатрическое кровообращение. За счет вариации параметров модели (табл. 1) возможно воспроизведение кровообращения пациента с учетом его индивидуальных особенностей, таких как телосложение, возраст, заболевания и т. д., что показано на примере нормального кровообращения, СН и педиатрического кровообращения. Результаты моделирования с достаточной точностью соответствуют данным литературных источников [10, 13, 27], выбранных в качестве эталонных для каждого моделируемого состояния (табл. 2).

При резкой смене сосудистого сопротивления барорефлекс позволяет кровообращению адаптироваться под изменившиеся условия за несколько сердечных циклов. Данный механизм интегрировался в модель ССС при нормальном кровообращении. Разработанная модель демонстрирует автоматическую подстройку под изменения состояния активности пациента. Результаты моделирования коррелируют с данными работы [10].

В дальнейшем планируются исследования механизма барорефлекса в биотехнической системе при поддержке кровообращения роторным насосом крови. Аппараты вспомогательного кровообращения получили широкое распространение в качестве как моста к трансплантации, так и метода долгосрочной поддержки кровообращения при СН [1, 8, 10, 21, 22, 26, 27]. Исследование автоматической регуляции давления в биотехнической системе представляет собой интересную, но не решенную до конца задачу.

Ограничением данного исследования является область допустимых значений периферического сопротивления системы в модели ССС. При высокой степени активности пациента сопротивление капилляров стремится к нулевым значениям, в данном случае мышечные ткани начинают выполнять дополнительную насосную функцию, сопротивление становится минимальным [26]. Математическая модель не может воспроизводить такие состояния, но это и не являлось целью моделирования, ССС в норме не достигает таких уровней активности.

Заключение. Разработанная математическая модель ССС, дополненная механизмом автоматической регуляции давления – барорефлексом, дает возможность персонализации под индивидуальные особенности пациента. С помощью модели можно реализовать три типа кровообращения: нормальное, СН и педиатрическое. Результаты моделирования соответствуют теоретическим значениям литературных источников, что свидетельствует о возможности применения модели для персонализированного моделирования кровообращения.

Предлагаемая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, интегрированную с моделью ССС. Интеграция барорефлекса расширяет область применения модели: позволяет изучать не только квазистатическое состояние системы, но и динамическое в ответ на изменения состояния активности пациента.

Литература

1. *Caroccia M.* Development and characterization of the arterial windkessel and its role during left ventricular assist device assistance // *Artificial Organs*. 2015. Vol. 39. No. 8. P. E138–E153. doi: <https://doi.org/10.1111/aor.12532>
2. Модульное моделирование сердечно-сосудистой системы человека / *И. Н. Киселев, Б. В. Семисалов, Э. А. Бибердорф и др.* // *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. Т. 7. № 2. С. 703–736. doi: <https://doi.org/10.17537/2012.7.703>
3. *Vosse van de F. N., Stergiopoulos N.* Pulse wave propagation in the arterial tree // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2011. Vol. 43. P. 467–499. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160730>
4. Three- and four-element windkessel models: Assessment of their fitting performance in a large cohort of healthy middle-aged individuals / *P. Segers, E. R. Rietzschel, M. L. De Buyzere et al.* // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering Medicine*. 2008. Vol. 222. Iss. 4. P. 417–428. doi: <https://doi.org/10.1243/09544119JEIM287>

5. **Kokalari I., Karaja T., Guerrisi M.** Review on lumped parameter method for modeling the blood flow in systemic arteries // *Journal of Biomedical Science and Engineering*. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 92–99. doi: <https://doi.org/10.4236/jbise.2013.61012>
6. **Golov A. V., Simakov S. S.** Personalized computational evaluation of physical endurance in a treadmill test with increasing load // *Lobachevskii J. Math.* 2020. Vol. 41. No. 12. P. 2648–2663. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995080220120112>
7. A new hybrid (hydro-numerical) model of the circulatory system / **M. Darowski, M. Kozarski, G. Ferrari et al.** // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. No. 4. P. 993–1003. doi: <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0107>
8. A mathematical model to evaluate control strategies for mechanical circulatory support / **L. G. Cox, S. Loerakker, M. C. Rutten et al.** // *Artificial Organs*. 2009. Vol. 33. No. 8. P. 593–603. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2009.00755.x>
9. **Fresiello L., Meyns B., Di Molfetta A., Ferrari G.** A model of the cardiorespiratory response to aerobic exercise in healthy and heart failure conditions // *Front. Physiol.* 2016. Vol. 7. Art. No. 189. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00189>
10. A sensorless rotational speed-based control system for continuous flow left ventricular assist devices / **M. Meki, Y. Wang, P. Sethu et al.** // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2020. Vol. 67. No. 4. P. 1050–1060. doi: <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2928826>
11. **Петухов Д. С., Телышев Д. В.** Математическая модель сердечно-сосудистой системы педиатрических пациентов с врожденными пороками сердца // *Медицинская техника*. 2016. № 4 (298). С. 9–11.
12. **Gardner A. W., Parker D. E.** Association between arterial compliance and age in participants 9 to 77 years old // *Angiology*. 2010. Vol. 61. No. 1. P. 37–41. doi: <https://doi.org/10.1177/0003319709339588>
13. Estimation of timing errors for the intraaortic balloon pump use in pediatric patients / **G. M. Pantalos, L. L. Minich, L. Y. Tani et al.** // *ASAIO Journal*. 1999. Vol. 45. No. 3. P. 166–171. doi: <https://doi.org/10.1097/00002480-199905000-00012>
14. **Hall J. E., Guyton A. C.** Guyton and Hall textbook of medical physiology. Philadelphia, PA: Saunders Elsevier, 2011. 1112 p.
15. Математическая модель сердечно-сосудистой системы организма при физической нагрузке / **С. Г. Кюрежан, Т. Г. Петросян, А. Л. Мхитарян и др.** // *Изв. НАН РА и ГИУА. Серия техн. наук*. 2005. Т. 58. № 3. С. 585–592.
16. Reproduction of continuous flow left ventricular assist device experimental data by means of a hybrid cardiovascular model with baroreflex control / **L. Fresiello, K. Zieliński, S. Jacobs et al.** // *Artificial Organs*. 2014. Vol. 38. No. 6. P. 456–468. doi: <https://doi.org/10.1111/aor.12178>
17. **Ursino M.** Interaction between carotid baroregulation and the pulsating heart: a mathematical model // *Am. J. Physiol.* 1998. Vol. 275. No. 5. P. H1733–H1747. doi: <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1998.275.5.H1733>
18. Effects of intra-aortic balloon pump timing on baroreflex activities in a closed-loop cardiovascular hybrid model / **L. Fresiello, A. W. Khir, A. Di Molfetta et al.** // *Artificial Organs*. 2013. Vol. 37. No. 3. P. 237–247. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2012.01540.x>
19. **Bozkurt S., Vosse van de F. N., Rutten M. C. M.** Improving arterial pulsatility by feedback control of a continuous flow left ventricular assist device via in silico modeling // *Int. J. Artif. Organs*. 2014. Vol. 37. Iss. 10. P. 773–785. doi: <https://doi.org/10.5301/ijao.5000328>
20. **Van Roon A. M., Mulder L. J. M., Althaus M., Mulder G.** Introducing a baroreflex model for studying cardiovascular effects of mental workload // *Psychophysiology*. 2004. Vol. 41. Iss. 6. P. 961–981. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2004.00251.x>
21. A nonlinear state-space model of a combined cardiovascular system and a rotary pump / **A. Ferreira, Sh. Chen, M. A. Simaan et al.** // *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Seville: IEEE, 2005. P. 897–902. doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582271>
22. **Петухов Д. С., Селищев С. В., Телышев Д. В.** Развитие аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца как наиболее эффективный способ лечения острой сердечной недостаточности // *Медицинская техника*. 2014. № 6 (288). С. 37–39.
23. Unique parameter identification for cardiac diagnosis in critical care using minimal data sets / **C. E. Hann, J. G. Chase, T. Desai et al.** // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2010. Vol. 99. Iss. 1. P. 75–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.01.002>
24. **Stevenson L. W., Perloff J. K.** The limited reliability of physical signs for estimating hemodynamics in chronic heart failure // *The Journal of the American Medical Association*. 1989. Vol. 261. No. 6. P. 884–888. doi: <https://doi.org/10.1001/jama.1989.03420060100040>
25. **Burkhoff D.** Mechanical properties of the heart and its interaction with the vascular system. 23 p. // Columbia University in the city of New York: [web]. 2002. URL: <http://www.columbia.edu/itc/hs/medical/heartsim/review.pdf> (дата обращения: 11.12.2021).

26. Faragallah G., Simaan M. A. An engineering analysis of the aortic valve dynamics in patients with rotary left ventricular assist devices // *Journal of Healthcare Engineering*. 2013. Vol. 4. No. 3. P. 307–327. doi: <https://doi.org/10.1260/2040-2295.4.3.307>
27. Simulation of changes in myocardial tissue properties during left ventricular assistance with a rotary blood pump / J. R. Martina, P. H. M. Bovendeerd, N. de Jonge et al. // *Artificial Organs*. 2013. Vol. 37. No. 6. P. 531–540. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2012.01548.x>
28. Ribarič S., Kordaš M. Simulation of the Frank – Starling law of the heart // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2012. Vol. 2012. Art. ID: 267834. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/267834>

Статья поступила в редакцию 29.03.2021 г.; одобрена после рецензирования 16.08.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторе

Рубцова Екатерина Николаевна – аспирант Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), младший научный сотрудник Центра «Цифрового биодизайна и персонализированного здравоохранения» Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8/2), rubtsova@bms.zone

References

1. Capoccia M. Development and characterization of the arterial windkessel and its role during left ventricular assist device assistance. *Artificial Organs*, 2015, vol. 39, no. 8, pp. E138–E153. doi: <https://doi.org/10.1111/aor.12532>
2. Kiselev I. N., Semisalov B. V., Biberdorf E. A., Sharipov R. N., Blokhin A. M., Kolpakov F. A. Modular modeling of the human cardiovascular system. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika = Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 703–736. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17537/2012.7.703>
3. Vosse van de F. N., Stergiopoulos N. Pulse wave propagation in the arterial tree. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2011, vol. 43, pp. 467–499. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160730>
4. Segers P., Rietzschel E. R., De Buyzere M. L., Stergiopoulos N., Westerhof N., Bortel van L. M., Gillebert T., Verdonck P. R. Three- and four-element windkessel models: Assessment of their fitting performance in a large cohort of healthy middle-aged individuals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering Medicine*, 2008, vol. 222, iss. 4, pp. 417–428. doi: <https://doi.org/10.1243/09544119JEIM287>
5. Kokalari I., Karaja T., Guerrisi M. Review on lumped parameter method for modeling the blood flow in systemic arteries. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 92–99. doi: <https://doi.org/10.4236/jbise.2013.61012>
6. Golov A. V., Simakov S. S. Personalized computational evaluation of physical endurance in a treadmill test with increasing load. *Lobachevskii J. Math.*, 2020, vol. 41, no. 12, pp. 2648–2663. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995080220120112>
7. Darowski M., Kozarski M., Ferrari G., Zieliński K., Górczyńska K., Szczepanowski A., Pałko K., Fresiello L., Di Molfetta A. A new hybrid (hydro-numerical) model of the circulatory system. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 993–1003. doi: <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0107>
8. Cox L. G., Loerakker S., Rutten M. C., De Mol B. A., Vosse van de F. N. A mathematical model to evaluate control strategies for mechanical circulatory support. *Artificial Organs*, 2009, vol. 33, no. 8, pp. 593–603. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2009.00755.x>
9. Fresiello L., Meyns B., Di Molfetta A., Ferrari G. A model of the cardiorespiratory response to aerobic exercise in healthy and heart failure conditions. *Front. Physiol.*, 2016, vol. 7, art. no. 189. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00189>
10. Meki M., Wang Y., Sethu P., Ghazal M., El-Baz A., Giridharan G. A sensorless rotational speed-based control system for continuous flow left ventricular assist devices. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2020, vol. 67, no. 4, pp. 1050–1060. doi: <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2928826>
11. Petukhov D. S., Telyshev D. V. A mathematical model of the cardiovascular system of pediatric patients with congenital heart defect. *Biomed. Eng.*, 2016, vol. 50, iss. 4, pp. 229–232. doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-016-9626-y>

12. Gardner A. W., Parker D. E. Association between arterial compliance and age in participants 9 to 77 years old. *Angiology*, 2010, vol. 61, no. 1, pp. 37–41. doi: <https://doi.org/10.1177/0003319709339588>
13. Pantalos G. M., Minich L. L., Tani L. Y., McGough E. C., Hawkins J. A. Estimation of timing errors for the intraaortic balloon pump use in pediatric patients. *ASAIO J.*, 1999, vol. 45, no. 3, pp. 166–171. doi: <https://doi.org/10.1097/00002480-199905000-00012>
14. Hall J. E., Guyton A. C. *Guyton and Hall textbook of medical physiology*. Philadelphia, PA, Saunders Elsevier, 2011. 1112 p.
15. Kyuregyan S. G., Petrosyan T. G., Mkhitarayan A. L., Agadzhanyan A. S., Karamyan M. D. Mathematical model of the body's cardiovascular system on exertion. *Izv. NAN RA i GIUA: Seriya tekhnicheskikh nauk = Proc. of NAS RA and NPUA: Technical Sciences*, 2005, vol. 58, no. 3, pp. 585–592. (In Russian).
16. Fresiello L., Zieliński K., Jacobs S., Di Molfetta A., Pałko K. J., Bernini F., Martin M. et al. Reproduction of continuous flow left ventricular assist device experimental data by means of a hybrid cardiovascular model with baroreflex control. *Artificial Organs*, 2014, vol. 38, no. 6, pp. 456–468. doi: <https://doi.org/10.1111/aor.12178>
17. Ursino M. Interaction between carotid baroregulation and the pulsating heart: a mathematical model. *Am. J. Physiol.*, 1998, vol. 275, no. 5, pp. H1733–H1747. doi: <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1998.275.5.H1733>
18. Fresiello L., Khir A. W., Di Molfetta A., Kozarski M., Ferrari G. Effects of intra-aortic balloon pump timing on baroreflex activities in a closed-loop cardiovascular hybrid model. *Artificial Organs*, 2013, vol. 37, no. 3, pp. 237–247. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2012.01540.x>
19. Bozkurt S., Vosse van de F. N., Rutten M. C. M. Improving arterial pulsatility by feedback control of a continuous flow left ventricular assist device via in silico modeling. *Int. J. Artif. Organs*, 2014, vol. 37, iss. 10, pp. 773–785. doi: <https://doi.org/10.5301/ijao.5000328>
20. Van Roon A. M., Mulder L. J. M., Althaus M., Mulder G. Introducing a baroreflex model for studying cardiovascular effects of mental workload. *Psychophysiology*, 2004, vol. 41, iss. 6, pp. 961–981. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2004.00251.x>
21. Ferreira A., Chen Sh., Simaan M. A., Boston J. R., Antaki J. F. A nonlinear state-space model of a combined cardiovascular system and a rotary pump. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Seville, IEEE, 2005, pp. 897–902. doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582271>
22. Petukhov D. S., Selishchev S. V., Telyshev D. V. Development of left ventricular assist devices as the most effective acute heart failure therapy. *Biomed. Eng.*, 2015, vol. 48, no. 6, pp. 328–330. doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-015-9480-3>
23. Hann C. E., Chase J. G., Desai T., Froissart C. B., Revie J., Stevenson D., Lambermont B., Ghuysen A., Kolh P., Shaw G. M. Unique parameter identification for cardiac diagnosis in critical care using minimal data sets. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2010, vol. 99, iss. 1, pp. 75–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.01.002>
24. Stevenson L. W., Perloff J. K. The limited reliability of physical signs for estimating hemodynamics in chronic heart failure. *The Journal of the American Medical Association*, 1989, vol. 261, no. 6, pp. 884–888. doi: <https://doi.org/10.1001/jama.1989.03420060100040>
25. Burkhoff D. Mechanical properties of the heart and its interaction with the vascular system. *Columbia University in the City of New York*. Available at: <http://www.columbia.edu/itc/hs/medical/heartsim/review.pdf> (accessed: 11.12.2021).
26. Faragallah G., Simaan M. A. An engineering analysis of the aortic valve dynamics in patients with rotary left ventricular assist devices. *Journal of Healthcare Engineering*, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 307–327. doi: <https://doi.org/10.1260/2040-2295.4.3.307>
27. Martina J. R., Bovendeerd P. H. M., Jonge N. de, de Mol B. A. J. M., Lahpor J. R., Rutten M. C. M. Simulation of changes in myocardial tissue properties during left ventricular assistance with a rotary blood pump. *Artificial Organs*, 2013, vol. 37, no. 6, pp. 531–540. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2012.01548.x>
28. Ribarič S., Kordaš M. Simulation of the Frank-Starling law of the heart. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2012, vol. 2012, art. ID: 267834. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/267834>

The article was submitted 29.03.2021; approved after reviewing 16.08.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the author

Ekaterina N. Rubtsova – PhD student of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Junior Researcher of the World-Class Research Center “Digital biodesign and personalized healthcare”, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8/2), rubtsova@bms.zone

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья

УДК [004.021:004.932.4]:004.416.2:623.746-519

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-106-119

Оптимизация алгоритма анализа и обработки информации в оптико-электронной системе

А. В. Парфирьев¹, О. В. Парфирьева¹, А. В. Душкин^{1, 2, 3}

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны
Российской Федерации, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж, Россия

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

a_dushkin@mail.ru

Аннотация. Точность координат наземных объектов, измеряемых с помощью оптических приборов беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), зависит от множества факторов: погрешности в измерении угловых координат оптической системы, расстояния до объекта, неоднородного рельефа местности и т. д. Применение оптико-электронных систем, функционирующих на основе инерциальных датчиков, показало их недостатки: большая погрешность при определении координат местоположения наземных объектов для выдачи целеуказаний БПЛА, обусловленная погрешностью определения углов склонения и азимута. В работе представлен вариант оптимизации алгоритма анализа и обработки информации в оптико-электронной системе определения координат наземных объектов с БПЛА. Разработаны алгоритм и способ определения географических координат на основе электронной матрицы высот. Повышение точности расчета координат объекта достигнуто за счет минимизации ошибки измерения угла склонения, азимута на наземный объект и наклонной дальности. Приведено описание натурального эксперимента с автомобилем на местности. Его суть заключается в том, что по нескольким стоп-кадрам, полученным оптико-электронной системой БПЛА на значительном расстоянии при большой наклонной дальности, определены географические координаты автомобиля двумя способами – традиционным и разработанным. С помощью предложенного способа точность определения координат повышена в несколько

© А. В. Парфирьев, О. В. Парфирьева, А. В. Душкин, 2022

раз. Разработанные алгоритм и способ обработки информации позволяют создавать множество аппаратно-программных решений для систем наведения и целеуказания БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, корреляционная фильтрация, оптико-электронная система, оптимизация, цифровая обработка изображений

Для цитирования: Парфирьев А. В., Парфирьева О. В., Душкин А. В. Оптимизация алгоритма анализа и обработки информации в оптико-электронной системе // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 106–119. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-106-119>

Original article

Optimization of the algorithm of information analysis and processing in the optoelectronic system

A. V. Parfiryev¹, O. V. Parfiryeva¹, A. V. Dushkin^{1,2,3}

¹*Military Educational Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation, Voronezh, Russia*

²*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

³*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

a_dushkin@mail.ru

Abstract. The accuracy of the coordinates of ground objects measured using optical instruments by unmanned aerial vehicles depends on many factors including: errors in measuring the angular coordinates of the optical system, the distance to the object, the presence of heterogeneous terrain, etc. Traditional use of optoelectronic systems functioning based on inertial sensors demonstrated their flaws, such as low accuracy at ground objects positioning for target designation to unmanned aerial vehicles due to declination angle and azimuth determination inaccuracy. In this work, a variant of optimizing the algorithm for analyzing and processing information in an optoelectronic system for determining the coordinates of ground objects from an unmanned aerial vehicle is presented. An algorithm and a method for determining geographical coordinates based on an electronic height matrix have been developed. An increase in the accuracy of calculating the coordinates of an object was achieved by minimizing the error of measuring the declination angle, azimuth on a ground object and inclined range. A description of a full-scale experiment with a car on the ground is given. Its essence was that according to several freeze frames obtained by the optoelectronic system of an unmanned aerial vehicle at a considerable distance with a large inclined range, the geographical coordinates of the car were determined in two ways (traditional and developed). With the help of the method proposed by the authors, the accuracy of determining coordinates has been increased several times. The developed algorithm and method for information processing make it possible to create a variety of hardware and software solutions for guidance and target designation systems of unmanned aerial vehicles.

Keywords: unmanned aerial vehicle, correlation filtering, optoelectronic system, optimization, digital image processing

For citation: Parfiryev A. V., Parfiryeva O. V., Dushkin A. V. Optimization of the algorithm of information analysis and processing in the optoelectronic system. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 106–119. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-106-119>

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) как в гражданском, так и в специальном сегменте выполняют следующие задачи: мониторинг окружающей среды и наземных объектов, тушение пожаров, видеосъемка, доставка грузов, организация спортивных соревнований и др. [1, 2]. Определяющим фактором развития беспилотной авиации является возрастание роли БПЛА в организации воздушной разведки и нанесении ударов по целям в условиях локальных конфликтов и конфликтов мирового масштаба в будущем [3, 4].

Анализ опыта применения в 2018–2020 гг. групп БПЛА вскрыл недостатки оптико-электронных систем (ОЭС). В частности, ОЭС, функционирующие на основе инерциальных датчиков, имеют большую погрешность при определении координат местоположения наземных объектов для выдачи целеуказаний на их поражение, обусловленную погрешностью определения углов склонения и азимута. Это связано с инструментальными ошибками инерциальных датчиков, точностью их установки в блоке чувствительных элементов и качеством установки начальных координат бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Перечислим основные виды ошибок, являющихся аддитивной составляющей ошибок измерений: изменение положения нулевых сигналов; выброс случайных составляющих; погрешности преобразования масштабных коэффициентов [5, 6]. Мультипликативная составляющая представляет собой погрешность масштабного коэффициента и проявляется в нелинейности преобразования физических измерений в выходные параметры. При этом в выходных сигналах датчиков присутствует случайный шум [5]. В результате постоянно растет суммарная погрешность в ходе продолжительного полета БПЛА, которая непосредственно влияет на расчет горизонтальной дальности до наземного объекта, особенно на больших удалениях (свыше 5 км) и при больших углах места. Также на точность определения географических координат влияет погрешность в измерении наклонной дальности до наземного объекта лазерным дальномером на больших удалениях. Погрешность измерения дальности лазерным дальномером на 5 км составляет ± 1 м, на 25 км – порядка ± 10 м.

В настоящей работе разрабатываются алгоритм и способ определения географических координат наземных объектов на основе ОЭС, установленной на БПЛА.

Методы и способы определения координат наземных объектов. Существуют следующие способы определения координат наземных объектов с БПЛА (однако не все они удовлетворяют требованиям безопасности их применения в условиях противовоздушной обороны противника):

– с помощью цифровой обработки изображений и ряда вспомогательных систем, в том числе спутниковой радионавигационной и инерциальной [7]. Недостатки: необходимость ведения съемки в надир и невозможность применения в ночных условиях;

– с помощью ОЭС с блоком цифровой обработки изображений, установленной на борту БПЛА [8, 9]. В качестве исходных данных используются идеальные углы азимута и места без учета инструментальной погрешности в их измерениях, что приводит к неточностям в расчетах географических координат наземных объектов, особенно на

больших удалениях относительно БПЛА. Также невозможен учет ошибок определения спутниковых координат БПЛА, связанных со сдвигом координат спутника или часов приемника и спутника [10, 11];

– с использованием активных и пассивных радиолокаторов. Недостатки: громоздкость аппаратуры, высокая стоимость, ограничение по целям и заметность [12–15];

– на основе использования энергии лазерного излучения в совокупности с бесплатформенной инерциальной навигационной системой и спутниковой радионавигационной системой. Недостаток – низкая степень дискретизации при построении рельефа местности и, соответственно, дрейфа инерциальных датчиков.

Повышение точности определения географических координат можно достичь:

– применением дорогостоящих высокоточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем, спутниковых навигационных систем с дифференциальными режимами, обуславливающими разработку новых полноценных оптико-электронных систем. В свою очередь, разработка новых систем, предназначенных для установки на БПЛА, предусматривает учет ряда ограничений по массе полезной нагрузки, габаритам и т. п.;

– использованием дополнительной информации о местности (цифровой модели рельефа) для уточнения координат, выдаваемых модулем для расчета географических координат и параметров движения захваченного объекта.

Постановка задачи. Требуется определить географические координаты движущегося наземного объекта с использованием ОЭС, установленной на БПЛА вертолетного или самолетного типа. БПЛА находится в воздухе на высоте и дальности от объекта, обеспечивающих корректную работу средств измерения ОЭС в соответствии с их техническими характеристиками. Наземный объект располагается в зоне видимости дневной или ночной камеры и не перекрывается другими объектами. Метеорологические условия в зоне действия ОЭС способствуют максимальной дальности видимости наземного объекта.

БПЛА с ОЭС имеет в своем составе следующее необходимое оборудование: гиросtabilизированную платформу; дневную камеру; ночную камеру инфракрасного диапазона (длина волны от 7 до 14 мкм); лазерный дальномер; приемник ГЛОНАСС или GPS; бортовой вычислитель. Требования, предъявляемые к ОЭС: угол обзора 360 град; наличие цифровой стабилизации изображения; гиросtabilизированная система на базе гироскопа и акселерометра средней точности на основе МЭМС с активной стабилизацией для обеспечения четкого изображения с камер в движении и при вибрации; наличие трехосевого датчика магнитного склонения; длина волны лазерного излучения 0,9 мкм; длина волны принимаемого электромагнитного излучения камерой инфракрасного диапазона 7–14 мкм; длина волны принимаемого электромагнитного излучения дневной камерой 0,5–0,9 мкм; отъюстированная система устройств дневной, ночной камер и лазерного дальномера.

Определение координат движущихся наземных объектов по фотоснимкам, полученным дневной или ночной камерой с БПЛА, предполагает решение трех частных задач: 1) слежение за наземным объектом по видеопоследовательности для определения его центра координат в системе координат изображения; 2) разработка системы автоматического сопровождения на базе гиросtabilизированной платформы; 3) разработка способа определения географических координат на основе цифровой модели рельефа (ЦМР). Рассмотрим варианты решения этих задач.

Разработка алгоритма слежения по видеопоследовательности. До этапа слежения за объектом осуществляется его обнаружение. Локализация наземного объекта может быть автоматической или ручной. Для автоматической локализации используют алгоритмы машинного обучения на основе сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN). Процесс автоматической локализации условно делят на этапы: выбор наиболее эффективной модели нейронной сети; создание специальной структуры данных; подготовка обучающей выборки; обучение модели. Для работы с региональными сверточными нейронными сетями применяют компьютерную библиотеку машинного обучения TensorFlow с открытым исходным кодом, где основную работу по захвату изображений с камеры и цифровой обработке осуществляет библиотека OpenCV. Для решения задачи локализации наземных объектов на изображении с одновременной классификацией могут использоваться следующие топологии CNN: R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO, SSD, FPN и RetinaNet [16]. Для увеличения числа классифицируемых объектов нейронную сеть дообучают на основе одной из приведенных моделей. Варианты алгоритмов обучения описаны в работах [17, 18]. Результат применения модели Faster R-CNN после процесса обучения на серии аэрофотоснимков самолетов (aircraft) и вертолетов (helicopter) представлен на рис. 1.



Рис. 1. Результат обнаружения и классификации объектов на фотоснимке
Fig. 1. The result of the detection and classification of objects in the photograph

У нейросетевых подходов, помимо дорогостоящего и энергозатратного оборудования, имеются следующие недостатки:

– на современных видеокартах сложно добиться от сетей высокого быстродействия (для сравнения: сеть-классификатор YoloV3 с относительно простой архитектурой может выдавать изображение за 50 мс [19]);

– объект интереса может не входить в номенклатуру классификатора нейронной сети. Ее необходимо дообучать на новых наборах данных, что приводит к снижению оперативности в принятии решений.

В связи с тем что результат работы нейронной сети не всегда стабилен, объект, в том числе сложной формы, при разном ракурсе съемки может быть пропущен на некоторых кадрах. Данная ситуация приводит к сбоям в системе автоматического наведения оптической оси камеры ОЭС на наземный объект для определения его координат. Для более стабильного сопровождения наземного объекта необходимо применять другие алгоритмы, называемые оптическими трекерами: Average of Synthetic Exact Filters

(ASEF) и Minimum Output Sum of Squared Error (MOSSE), а для поиска и классификации объектов на изображении – нейронную сеть. Данные алгоритмы имеют много общего. Различаются они способом усреднения фильтров и тем, что MOSSE создает лучшие фильтры по сравнению с ASEF [19].

Общий вид фильтра MOSSE можно представить выражением

$$\hat{\mathbf{W}}_i^* = \frac{A_i}{B_i},$$

где $A_i = \eta \sum_{p=1}^P \hat{\mathbf{G}}_p \odot \hat{\mathbf{F}}^{p*} + (1-\eta)A_{i-1}$, $B_i = \eta \sum_{p=1}^P \hat{\mathbf{F}}^p \odot \hat{\mathbf{F}}^{p*} + (1-\eta)B_{i-1}$ – компоненты фильтра;

$\hat{\mathbf{F}}^p \odot \hat{\mathbf{F}}^{p*}$ – энергетический спектр прямоугольника с p -го изображения; $\hat{\mathbf{G}}_p$ – матрица частот желаемого идеального отклика; η – скорость обучения во время трекинга; P – количество трансформаций.

Фильтр MOSSE поэлементно умножим на матрицу частот $\hat{\mathbf{F}}$, полученную с последующего кадра и прошедшую предобработку. К предобработке относится нелинейное преобразование пикселей изображения (логарифмирование), которое приведет слишком светлые и слишком темные участки к среднему. В данном случае лучше будет работать нормализация вида

$$I = \text{sign}(I - 127) \sqrt{|I - 127|}.$$

Далее необходимо применить выражение

$$A = \exp \frac{(x-i)^2 + (y-j)^2}{\sigma^2}.$$

Также можно применить двумерные окна Хеннинга для плавного обнуления значений пикселей на краях изображения. После получения $\hat{\mathbf{W}}_i^*$ вычислим отклик в частотной области:

$$\hat{\mathbf{G}}_{conv} = \hat{\mathbf{F}} \odot \hat{\mathbf{W}}_i^*.$$

Затем применим к нему обратное преобразование Фурье для перевода в пространственную область и найдем координаты максимума в получившейся матрице \mathbf{G}_{conv} . Найденные координаты указывают на новое положение объекта. Объект, за которым осуществляют слежение, может пропадать из кадра или быть перекрыт другим объектом. Для выявления таких ситуаций необходимо более детально проанализировать отклик, полученный с последнего кадра. Для этого находим максимум g_{\max} матрицы \mathbf{G}_{conv} , затем исключаем квадрат 11×11 из центра этой матрицы, а по остальным элементам рассчитываем математическое ожидание $\mu_{\mathbf{G}}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\mathbf{G}}$. Коэффициент Peak to Sidelobe Ratio (PSR) вычислим по формуле

$$PSR = \frac{g_{\max} - \mu_{\mathbf{G}}}{\sigma_{\mathbf{G}}}.$$

Если это значение выше определенного порога, то объект считается обнаруженным. Значение данного порога при стабильной детекции составляет от 20 и выше. На рис. 2 приведены данные по частоте обновления кадров для различных размеров фильтров,



Рис. 2. Частота обновления кадров для различных размеров фильтров
 Fig. 2. Frame refresh rate for different filter sizes

обусловленные ростом вычислительной нагрузки на процессор бортового вычислителя. Программная реализация представленного оптического трекера MOSSE представлена в работе [20].

Применение рассмотренного алгоритма позволяет получить исходные данные, которые можно интерпретировать в управляющие сигналы системы автоматического управления гиросtabilизированной платформой БПЛА для совмещения линии визирования оптической системы с направлением на сопровождаемый наземный объект.

Разработка системы автоматического сопровождения на базе гиросtabilизированной платформы. Совмещение линии визирования камеры ОЭС осуществляется изменением двух угловых координат – тангажа и рыскания. На борту БПЛА, как правило, уже имеется гиросtabilизированная платформа с контроллером. Контроллер представляет собой вычислитель с множеством цифровых входов и выходов для внешнего управления, считывания сигналов с инерциальных датчиков, выдачи сигналов управления бесколлекторными двигателями (БКД), текущего состояния и режима работы. Реализацию способа управления рассмотрим на примере контроллера BaseCam SimpleBGC 32-bit с открытым программным интерфейсом для построения внешних модулей управления. Для обмена данными в контроллере предусмотрены интерфейсы управления и последовательной передачи данных – UART и I2C, а также цифровые выходы, работающие на прием сигнала широтно-импульсной модуляции для управления угловыми координатами платформы. Для организации управления платформой с целью совмещения линии визирования с направлением на захваченный наземный объект следует подать сигнал широтно-импульсной модуляции на соответствующие входы контроллера RC_PITCH и RC_YAW. Чтобы сформировать сигналы управления, необходим вычислитель на базе Raspberry Pi. Общая схема устройства автоматического сопровождения объекта, которое включает в себя трехосевую гиросtabilизированную платформу с контроллером управления, видеокамеру (теповизор), лазерный дальномер и платформу Raspberry Pi для обработки изображений и выработки управляющих сигналов, представлена на рис. 3.

Сигналы с вычислителя прямо пропорциональны отклонению центра объекта от центра кадра и представляют собой два сигнала рассогласования по координатам x и y . Координаты центра кадра представляют собой опорный сигнал. Для компенсации сигналов рассогласования разработаны устройство и система автоматического управления следящего типа, функциональные схемы которых представлены на рис. 4. На данном рисунке введены следующие обозначения: $x_o(t)$, $y_o(t)$ – опорный сигнал по координатам x и y соответственно; $x_m(t)$, $y_m(t)$ – текущий сигнал по координатам x и y соответственно; УС1, УС2 – устройство сравнения по координатам x и y соответственно; КУ1, КУ2 – последовательное корректирующее устройство по координатам x (рис. 4, б) и y (рис. 4, в) соответственно; УУ – устройство управления для преобразования сигнала широтно-импульсной модуляции в напряжение; УсУ – усилительное устройство; ИУ1, ИУ2 – исполнительные устройства (двигатели платформы); ОУ – объект управления (платформа с видеокамерой или тепловизором); ВУ – вычислительное устройство, выдающее управляющие сигналы контроллеру гироплатформы [21, 22]; Р, I и D – пропорциональное, интегрирующее и дифференцирующее звенья ПИД-регулятора.

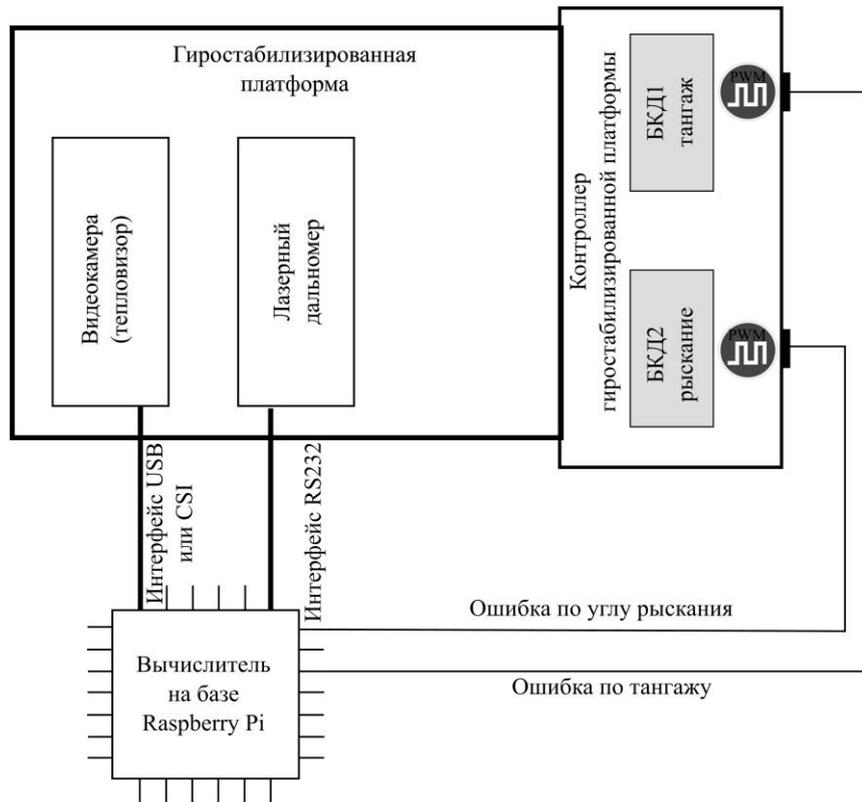


Рис. 3. Схема системы автоматического сопровождения
Fig. 3. Diagram of the automatic tracking system

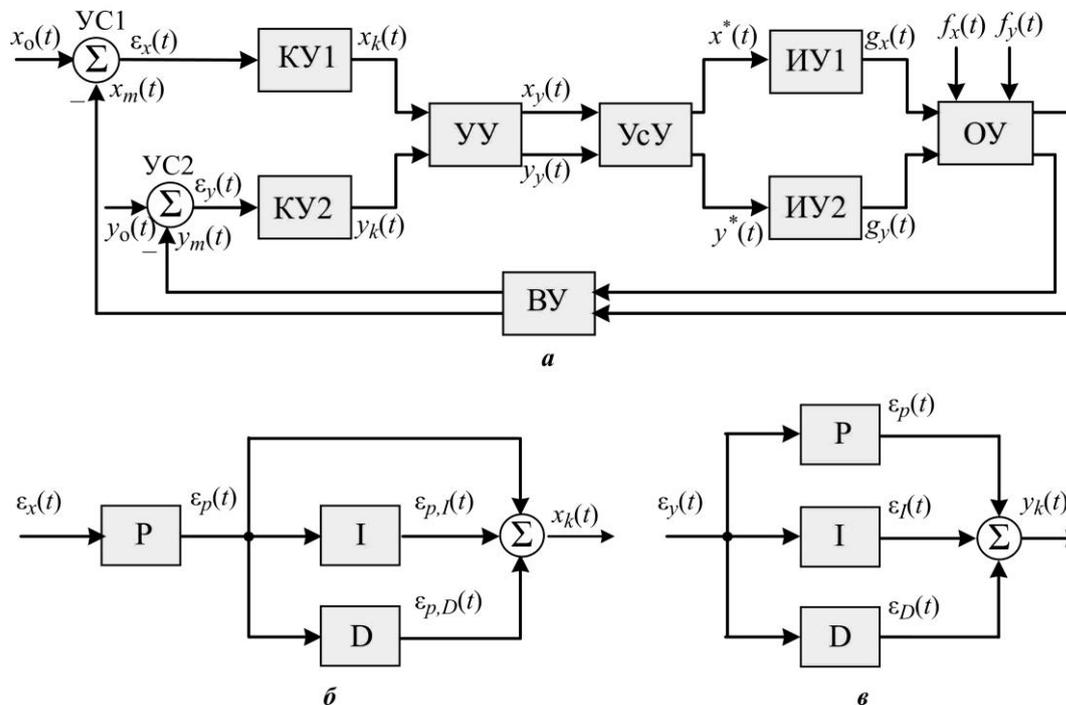


Рис. 4. Функциональные схемы разработанной системы автоматического управления следящего типа (а) и корректирующих устройств на основе ПИД-регулятора: б – координата x; в – координата y
Fig. 4. Functional graphs of the developed tracking type ACS (a) and correcting devices based on the PID controller: б – coordinate x; в – coordinate y

Целью сопровождения является максимально точное и быстрое совмещение линии визирования камеры и луча лазерного дальномера с направлением на объект. Таким образом достигается правильный съем исходных данных для реализации алгоритма определения координат наземных объектов с БПЛА по видеопотоку.

Определение географических координат на основе электронной матрицы высот. Для решения данной задачи ЦМР получены методами классической цифровой фотограмметрии в совокупности с алгоритмами компьютерного зрения с применением передового программного обеспечения Agisoft Metashape. Его преимущество в том, что при анализе и постобработке используются технологии машинного обучения, в итоге точность получаемых результатов повышается. С помощью Agisoft Metashape при обработке изображений снимки преобразуются в плотные облака точек, а цифровая модель рельефа строится только по тем точкам плотного облака, которые классифицированы как точки рельефа земной поверхности. Модель рельефа может быть создана в виде нерегулярной треугольной сети (TIN), в виде регулярной матрицы высот (DEM), а также как совокупность записей горизонталей (изогибс) с требуемой высотой сечения рельефа. TIN-модель рельефа имеет более высокое разрешение в областях, где поверхность крайне неравномерна, и более низкое разрешение в областях с однородной поверхностью. Точность ЦМР может достигать 16 см при масштабе 1:500. Интервал (шаг сетки) ЦМР может достигать 0,003 угловых секунды (0,1 м) в зависимости от технических характеристик камеры, высоты съемки, метеоусловий и т. п. Модель рельефа в виде матрицы высот представляется в форматах GeoTIFF, Arc/Info ASCII Grid (ASC), Band Interleaved (BIL), XYZ или в виде файлов в формате Sputnik KMZ. Формат представления ЦМР воспринимается всеми современными языками программирования, в том числе Python. В Интернете можно найти сервисы, позволяющие получить ЦМР в один клик (например, Open Aerial Map). Данный способ проиллюстрирован на рис. 5.

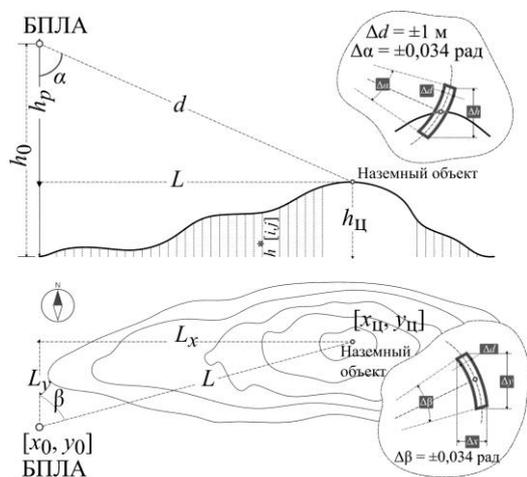


Рис. 5. Иллюстрация определения координат наземных объектов
 Fig. 5. Illustration of determining the coordinates of ground objects

Рассчитаем географические координаты путем решения многопараметрической оптимизационной задачи на основе алгоритма оптимизации. Он минимизирует функционал невязки, которая представляет собой квадрат разности между высотой объекта, рассчитанной угломерно-дальномерным методом h_c , и высотой объекта из матрицы высот h^* :

$$\begin{aligned} \mathfrak{Z}(\alpha, \beta, d) : \min_{\alpha, \beta, d} \|h_c(\alpha, d) - h^*(x_0 + L_x, y_0 + L_y)\|_2, \\ \begin{cases} L_x = d \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta), \\ L_y = d \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta), \\ h_c = h_0 - d \cdot \cos(\alpha). \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь α, β – текущие углы визирования и азимута на наземный объект, полученные с контроллера гиросtabilизированной платформы БПЛА; d – наклонная дальность до наземного объекта, измеренная лазерным дальномером; L – горизонтальная дальность

до наземного объекта; x_0 , y_0 , h_0 – географические координаты местоположения БПЛА (широта, долгота, высота), полученные с помощью приемника ГЛОНАСС или GPS.

Точность расчета координат объекта повышается за счет минимизации ошибки измерения угла α , азимута на наземный объект β и наклонной дальности d . В соответствии с аналитическими расчетами погрешность определения координат наземного объекта традиционным способом находится в пределах красной зоны. Погрешность определения координат разработанным способом лежит на пересечении красной зоны с горизонтальной поверхностью. Динамические значения аналитически рассчитанной погрешности измерения горизонтальной дальности в зависимости от угла визирования ОЭС и высоты БПЛА представлены на рис. 6.

Для подтверждения аналитических расчетов проведен эксперимент с автомобилем на определенной местности. На значительном расстоянии, при котором наклонная дальность составила 900 м, произведено несколько стоп-кадров данных. В результате расчетов получены географические координаты автомобиля двумя способами – традиционным и разработанным (рис. 7). В итоге точность расчета координат разработанным способом повысилась в 4,8 раза. Общий вид ОЭС, устанавливаемой на БПЛА коптерного типа, и его блок-схема, реализующая данный способ, приведены на рис. 8.

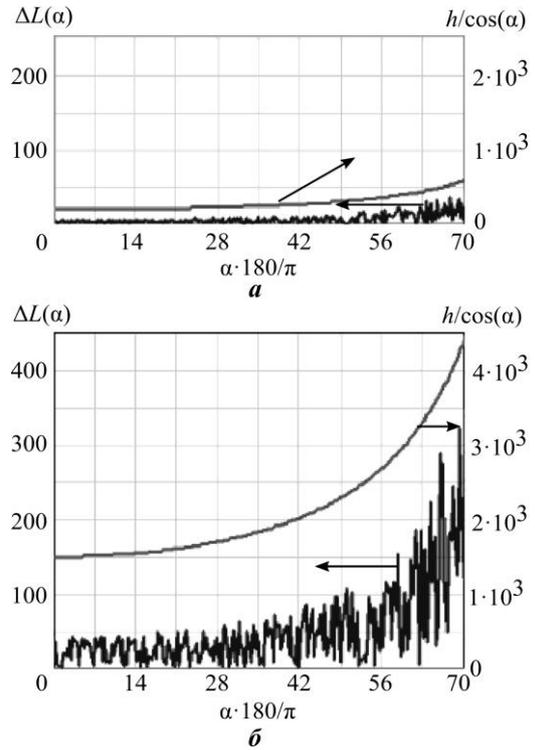


Рис. 6. Графики распределения погрешности горизонтальной дальности: $h = 200$ м (а); $h = 1500$ м (б)

Fig. 6. Graphs of horizontal range error distribution: $h = 200$ m (a); $h = 1500$ m (b)

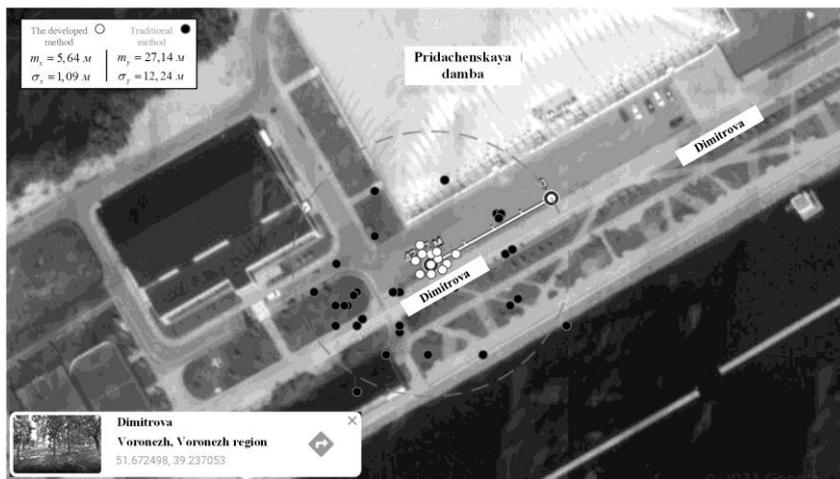


Рис. 7. Оценка расчета географических координат несколькими способами (традиционным – черные кружки; разработанным – белые кружки)

Fig. 7. Evaluation of the calculation of geographic coordinates in several ways (traditional – black circles; developed – white circles)

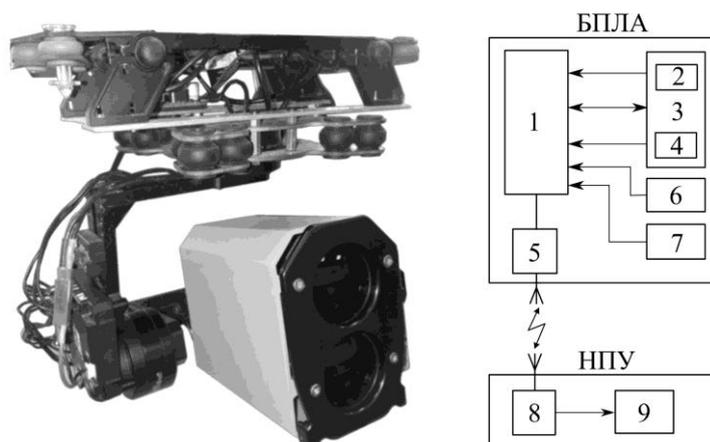


Рис. 8. Общий вид оптико-электронной системы и ее блок-схема: НПУ – наземный пункт управления; 1 – бортовой вычислитель; 2 – блок видеонаблюдения; 3 – гиростабилизированная платформа с акселерометром и гироскопом; 4 – лазерный дальномер; 5 – трансивер; 6 – приемник спутникового сигнала и магнитометр; 7 – барометрический высотомер; 8 – трансивер; 9 – наземная станция управления

Fig. 8. General view of the optoelectronic system and its block diagram: БПЛА – unmanned aerial vehicle; НПУ – ground control post; 1 – onboard computer; 2 – video surveillance unit; 3 – gyro-stabilized platform with accelerometer and gyroscope; 4 – laser rangefinder; 5 – transceiver; 6 – satellite signal receiver and magnetometer; 7 – barometric altimeter; 8 – transceiver; 9 – ground control station

Заключение. Разработанный алгоритм и способ определения географических координат наземных объектов на основе ОЭС, установленной на борту БПЛА, позволяют эффективно и точно рассчитать координаты любого наземного объекта, заметного в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра с БПЛА, в режиме времени, близком к реальному. Применен инновационный подход: ЦМР получена методами классической цифровой фотограмметрии в совокупности с современными алгоритмами компьютерного зрения. Степень дискретности ЦМР, которая достигается качеством фотоснимков, разрешающей способностью фотокамеры, высотой съемки и вычислительными затратами, оказывает прямое влияние на оценку расчета координат наземного объекта.

Результаты эксперимента показывают, что точность расчета координат разработанным способом может быть повышена в 4,8 раза по сравнению с традиционным угломерно-дальномерным способом.

Литература

1. **Картеничев А. Ю., Панфилова Е. В.** Технологии тушения пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 149–152.
2. **Макаров К. С.** Структурная схема комплекса с беспилотным летательным аппаратом, предназначенного для мониторинга территории и объектов в условиях низкой доступности каналов связи // *Auditium*. 2019. № 4 (24). С. 48–53.
3. **Нартов М. В., Полянин К. С.** Система вооружения, предназначенная для противодействия беспилотным летательным аппаратам // *Наука без границ*. 2018. № 1 (18). С. 48–51.
4. **Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В., Привалов А. А.** Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 4. С. 163–191. doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10406>

5. Оценка влияния погрешностей инерциальных датчиков на точность беспилотной инерциальной навигационной системы / **С. В. Андреев, В. В. Ильиных, О. А. Ильиных и др.** // Вестник концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 2 (25). С. 29–34. doi: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2018-2-29-34>
6. **Егошкин Н. А.** Методы высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Рязань, 2019. 32 с.
7. Пат. 2726902 РФ. Способ определения координат наземных объектов при фотосъемке с беспилотного летательного аппарата / **А. Ю. Каплин**. № 2020102510; заявл. 21.01.2020; опублик. 16.07.2020, Бюл. № 20. 2 с.
8. **Шипко В. В., Рубинов В. И., Шаронов И. Е., Ханов А. С.** Алгоритм определения координат и параметров движения наземных объектов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 43–48.
9. **Шипко В. В.** О некоторых особенностях определения координат подвижных надводных целей оптико-электронной системой беспилотного летательного аппарата типа «мультикоптер» // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 252–261.
10. **Makarenkov A., Egoshkin N., Ereemeev V.** Modular transfer function compensation for hyperspectral data from Resurs-P satellite system // Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. Vol. 10789. P. 301–307. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2325531>
11. Standard image products of Russian highly elliptical remote sensing system «Arktika-M» / **N. Egoshkin, A. Kuznetsov, V. Ereemeev et al.** // Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. Vol. 10789. P. 430–436. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2325099>
12. Пат. 2638174 РФ. Способ определения угловых координат цели с помощью линейной антенной решетки / **И. Г. Насенков, Р. В. Поликашкин, К. В. Филиппов**. № 2016127054; заявл. 05.07.2016; опублик. 12.12.2017, Бюл. № 35. 2 с.
13. **Смирнова Д. М.** Обнаружение и измерение координат движущихся наземных объектов в многопозиционной просветной радиолокационной системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2012. 16 с.
14. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / **А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин и др.** // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20. № 1. С. 222–231.
15. **Баженков А. В., Гривенная Н. В., Исаев А. М., Мельников С. В.** Применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 212–230. doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10207>
16. Распознавание объектов в режиме реального времени на iOS с помощью YOLOv3 / **Александр @M00nLight** // Хабр: [электронный ресурс]. 25.07.2019. URL: <https://habr.com/ru/post/460869> (дата обращения: 12.02.2021).
17. **Porfiriev A. V., Sumin V. I., Dushkin A. V.** Algorithm of measurement information processing for hardware and software complex capture and automatic tracking of unmanned aerial vehicle // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). Chelyabinsk: IEEE, 2017. P. 199–204. doi: <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120710>
18. **Parfiryev A. V., Dushkin A. V., Dubrovin A. S., Stepanov L. V.** Control of unmanned aerial vehicles based on the detection algorithm // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1202. Art. ID: 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1202/1/012014>
19. Optical trackers: ASEF and MOSSE // Sudonull: [электронный ресурс]. URL: <https://sudonull.com/post/12040-Optical-trackers-ASEF-and-MOSSE> (дата обращения: 20.01.2021).
20. **Parfiryev A. V., Ischuk I. N., Dushkin A. V., Smolyakova S. D.** Algorithm for controlling the trajectory of an unmanned aerial vehicle with the possibility of flying around obstacles // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2020). Moscow: IEEE, 2020. P. 2395–2400. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039467>
21. The software implementation of the system of automatic observation of ground objects based on correlation analysis / **A. V. Parfiryev, I. N. Ischuk, A. V. Dushkin et al.** // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019). Moscow: IEEE, 2019. P. 1749–1753. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656636>

Статья поступила в редакцию 21.06.2021 г.; одобрена после рецензирования 21.06.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Парфирьев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» г. Воронеж Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), keeperate@mail.ru

Парфирьева Оксана Владимировна – аспирант кафедры робототехнических комплексов и систем воздушного базирования Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» г. Воронеж Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), aregard@inbox.ru

Душкин Александр Викторович – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» г. Воронеж Министерства обороны Российской Федерации (Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), профессор кафедры радиотехники Воронежского государственного технического университета (Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); профессор кафедры информационной безопасности Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), a_dushkin@mail.ru

References

1. Kartenichev A. Yu., Panfilova E. V. Fire extinguishing technologies using unmanned aerial vehicles. *Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*, 2019, no. 1 (10), pp. 149–152. (In Russian).
2. Makarov K. S. Structure chart of a complex including unmanned aerial vehicle and intended for territory and objects monitoring in low communications link availability. *Auditorium*, 2019, no. 4 (24), pp. 48–53. (In Russian).
3. Nartov M. V., Polyaniin K. S. Weapon system used for destruction [of] unmanned aerial vehicles. *Nauka bez granits = Science without Borders*, 2018, no. 1 (18), pp. 48–51. (In Russian).
4. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V., Privalov A. A. Analysis of combat experience as groups of unmanned aerial vehicles are used to defeat anti-aircraft missile means of the air defense system in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh wars. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 163–191. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10406>
5. Andreyev S. V., Ilinykh V. V., Ilinykh O. A., Chertkov M. S., Klyuchnikov A. V. Estimation of inertial sensors error impact on platformless inertial navigation system accuracy. *Vestnik kontserna VKO "Almaz – Antey" = Journal of "Almaz–Antey" Air and Space Defence Corporation*, 2018, no. 2, pp. 29–34. doi: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2018-2-29-34>
6. Egoshkin N. A. *Methods of high-precision geometric processing of information from modern systems of space sensing of the Earth*. Extended Abstract of Dr. Sci. (Eng.) diss. Ryazan', 2019. 35 p. (In Russian).
7. Kaplin A. Ju. *Method for determining the coordinates of ground objects when photographing from an unmanned aerial vehicle*. Patent 2726902 RF, publ. 16.07.2020, Bul. No. 20. (In Russian).
8. Shipko V. V., Rubinov V. I., Sharonov I. E., Hanov A. S. Algorithm for determining the coordinates and parameters of the motion of ground objects. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 43–48. (In Russian).
9. Shipko V. V. About some peculiarities of the mobile surface targets coordinates determining by the unmanned aerial vehicle type “multicopter” optical-electronic system. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2019, no. 12, pp. 252–261. (In Russian).
10. Makarenkov A., Egoshkin N., Ereemeev V. Modular transfer function compensation for hyperspectral data from Resurs-P satellite system. *Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV*, 2018, vol. 10789, pp. 301–307. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2325531>
11. Egoshkin N., Kuznetsov A., Ereemeev V., Solovyev V., Kochergin A. Standard image products of Russian highly elliptical remote sensing system “Arktika-M”. *Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV*, 2018, vol. 10789, pp. 430–436. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2325099>

12. Nasenkov I. G., Polikashkin R. V., Filippov K. V. *Method for determining the angular coordinates of a target using a linear antenna array*. Patent 2638174C1 RF, publ. 12.12.2017, Bul. No. 35. (In Russian).
13. Smirnova D. M. *Detection and measurement of coordinates of moving ground objects in a multi-position transmissive radar system*. Extended Abstract of Cand. Sci. (Eng.) diss. Nizhny Novgorod, 2012. 16 p. (In Russian).
14. Chernodarov A. V., Patrikeev A. P., Kovregin V. N., Kovregina G. M., Merkulova I. I. Flight development of a distributed inertial satellite micromavigation system for synthetic-aperture radar. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii = Civil Aviation High Technologies*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 222–231. (In Russian).
15. Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Isaev A. M., Melnikov S. V. Application of unmanned aerial vehicles for radar search of aircraft and ships affected by an accident. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 2, pp. 212–230. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10207>
16. M00nLight. Real-time object recognition on iOS with YOLOv3. (In Russian). *Habr*. Available at: <https://habr.com/ru/post/460869> (accessed: 12.01.2021).
17. Porfiriyev A. V., Sumin V. I., Dushkin A. V. Algorithm of measurement information processing for hardware and software complex capture and automatic tracking of unmanned aerial vehicle. *2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*. Chelyabinsk, IEEE, 2017, pp. 199–204. doi: <https://doi.org/10.1109/URALCON.2017.8120710>
18. Parfiriyev A. V., Dushkin A. V., Dubrovin A. S., Stepanov L. V. Control of unmanned aerial vehicles based on the detection algorithm. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1202, art. ID: 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1202/1/012014>
19. Optical trackers: ASEF and MOSSE. *Sudonull*. Available at: <https://sudonull.com/post/12040-Optical-trackers-ASEF-and-MOSSE> (accessed: 20.01.2021).
20. Parfiriyev A. V., Ischuk I. N., Dushkin A. V., Smolyakova S. D. Algorithm for controlling the trajectory of an unmanned aerial vehicle with the possibility of flying around obstacles. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2020)*. Moscow, IEEE, 2020, pp. 2395–2400. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039467>
21. Parfiriyev A. V., Ischuk I. N., Dushkin A. V., Buriak T. S., Popova N. A. The software implementation of the system of automatic observation of ground objects based on correlation analysis. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2019)*. Moscow, IEEE, 2019, pp. 1749–1753. doi: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656636>

The article was submitted 21.06.2021; approved after reviewing 21.06.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Andrey V. Parfiriev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Robotic Complexes and Air-based Systems Department, Military Educational Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevnikov st., 54a), keeperate@mail.ru

Oksana V. Parfiriya – PhD student of the Robotic Complexes and Air-based Systems Department, Military Educational Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevnikov st., 54a), aregard@inbox.ru

Alexander V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Scientific Research Centre, Military Educational Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation (Russia, 394064, Voronezh, Starykh Bolshevnikov st., 54a), Prof. of the Radio Engineering Department, Voronezh State Technical University (Russia, 394006, Voronezh, 20th Anniversary of October st., 84), Prof. of the Information Security Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), a_dushkin@mail.ru

Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов

Д. Г. Пантенков¹, Н. В. Гусаков², А. А. Ломакин¹

¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий», г. Смоленск, Россия

pantenvkov88@mail.ru

Аннотация. В настоящее время в США и странах Западной Европы существует большое количество космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли в целях получения данных радиомониторинга с очень высоким разрешением с различных видов целевых нагрузок: оптико-электронного наблюдения, радиолокационного наблюдения, радио- и радиотехнической разведки. В работе рассмотрены современные зарубежные КА оптико-электронного наблюдения, характеризующиеся наилучшим разрешением на местности: WorldView, QuickBird, GeoEye, KeyHole Pleiades, Spot, Eros, Cartosat; радиолокационного наблюдения: RadarSat, SAR-Lupe, Lacrosse, ERS, Terrasar, Envisa, IGS; радио- и радиотехнической разведки: TacSat, Jumpseat, Orion, Vortex, Mentor, Magnum, Mercury, Intruder. Также рассмотрены современные космические системы ретрансляции информации на высоких орбитах: TDRSS, SDS, EDRS, DRTS, CTDRSS, обеспечивающие возможность мгновенной передачи информации ее получателям с учетом характеристик транспондеров и используемых частотных диапазонов. Проанализированы, обобщены и систематизированы основные технические характеристики КА дистанционного зондирования Земли и КА-ретрансляторов, через которые осуществляется сброс целевой информации на удаленные пункты приема и обработки информации. Систематизированный обзор позволит специалистам в авиационной и ракетно-космической промышленности, занимающимся вопросами радиоконтроля и радиомониторинга излучаемых радиосигналов, оценить оперативность получения целевой информации с требуемым качеством по результатам радиомониторинга в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: космический аппарат, земная станция, дистанционное зондирование Земли, радиомониторинг, оптико-электронная система, радиолокационная система, космический ретранслятор, диапазон частот, скорость передачи информации

Для цитирования: Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Ломакин А. А. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов. Обзорная статья // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 120–149. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-120-149>

Review article

Review of the current state of the orbital groups of remote sensing spacecraft and information relay spacecraft

D. G. Pantenkov¹, N. V. Gusakov², A. A. Lomakin¹

¹JSC “Kronstadt”, Moscow, Russia

²JSC “Scientific Research Institute of Modern Telecommunication Technologies”, Smolensk, Russia

pantenkov88@mail.ru

Abstract. Currently in the USA and Western European countries there are many spacecrafts for Earth remote sensing in the interests of obtaining very high-resolution radio monitoring data with various types of target load: optoelectronic surveillance, radar surveillance, radio- and radio engineering reconnaissance. In this review article, most modern foreign optoelectronic surveillance spacecrafts are considered, including the families with the best resolution on the ground: Worldview, QuickBird, GeoEye, Keyhole, Pleiades, Spot, Eros, Cartosat; radar surveillance: Radarsat, SAR-Lupe, Lacrosse, ERS, Terrasar, Envisat, IGS; radio- and radio engineering reconnaissance: TacSat, Jumpseat, Orion, Vortex, Mentor, Magnum, Mercury, and Intruder. The article also discusses modern space systems for relaying information in high orbits: TDRSS, SDS, EDRS, DRTS, CTDRSS, which provide the possibility of instantaneous transmission of information to its recipients, with account for the characteristics of transponders and the frequency ranges used. The main technical characteristics of remote sensing spacecraft and satellite repeaters, through which the target information is reset to remote information reception and processing points, have been analyzed, summarized, and systematized. This structured review will eventually allow specialists in the aviation and rocket and space industry, dealing with issues of radio monitoring of radiated radio signals, to assess the efficiency of obtaining target information with the required quality based on the results of real-time radio monitoring.

Keywords: spacecraft, ground station, Earth remote sensing, radio monitoring, optoelectronic system, radar system, space repeater, frequency range, information transmission rate

For citation: Pantenkov D. G., Gusakov N. V., Lomakin A. A. Review of the current state of the orbital groups of remote sensing spacecraft and information relay spacecraft. Review article. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 120–149. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-120-149>

Введение. Активное использование космического пространства в целях безопасности от возникновения разного рода угроз позволяет [1, 2]:

- обеспечивать контроль над использованием другими странами космического пространства, акваторий океанов и морей;
- получать исчерпывающую и достоверную информацию о возникающей нештатной ситуации в реальном масштабе времени с последующим оперативным ее доведением до всех структур управления;
- обеспечивать защиту от применения оружия различного назначения;

– решать специальные задачи при возникновении конфликтов малой интенсивности с наименьшими потерями и незначительным ущербом для окружающей среды и гражданского населения.

Космические системы радиомониторинга используются в целях контроля за гражданскими объектами социально-экономического назначения, слежения за постоянным функционированием и зонами сосредоточения техники и вооруженных сил зарубежных стран, определения и уточнения технических характеристик инфраструктурных объектов, мониторинга их состояния и особенностей функционирования, обнаружения факта применения радиоэлектронных средств. Космические системы радиомониторинга – основа обеспечения информацией гражданских и силовых структур [1, 2].

В работах [1–30] представлено современное состояние и баллистическое построение орбитальных группировок космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – оптико-электронного наблюдения, радиолокационного наблюдения, радиотехнической разведки, достигнутых параметров целевых нагрузок в части разрешающей способности на местности, а также скоростей сброса информации на земную станцию управления и приема целевой информации и ее ретрансляции через КА на высоких орбитах (геостационарной (ГСО) и высокоэллиптической).

В работах [1–5] представлены некоторые характеристики КА-ретрансляторов на высоких орбитах, через которые КА ДЗЗ способны сбрасывать целевую информацию по высокоскоростному радиоканалу на удаленные земные станции в реальном масштабе времени.

Цель настоящей работы – обзор, анализ, обобщение и систематизация технических характеристик КА ДЗЗ и КА-ретрансляторов для последующего использования специалистами в данной предметной области при оценке оперативного получения информации о результатах радиоконтроля и радиомониторинга передаваемой информации с требуемым качеством.

Техническое описание и основные характеристики известных КА ДЗЗ и КА-ретрансляторов на ГСО. Основные характеристики КА оптико-электронного наблюдения. На сегодняшний день все современные КА ДЗЗ имеют строго коммерческую направленность. В конце XX в. был выведен на орбиту новый оптико-электронный КА ДЗЗ для коммерческого использования с высоким разрешением IKONOS-2 (США). Потребители в любой точке мира получили возможность доступа к цифровым изображениям подстилающей земной поверхности с пространственным разрешением 1 м и мультиспектральным изображением с разрешением 4 м [1–5]. Данный КА успешно отработал в течение всего срока активного существования (САС) – 15 лет.

В XXI в. появились более совершенные гражданские КА ДЗЗ, в частности: «Ресурс-П» №1, «Ресурс-П» №2, «Ресурс-П» №3, «Ресурс-ДК1» (Россия); KompSat-2, KompSat-3, KompSat-3A (Корея); Pleiades-1A, Pleiades-1B, Spot-6, Spot-7 (Франция); Cartosat-1, Cartosat-2, Cartosat-2A, Cartosat-2B (Индия); QuickBird-2, WorldView-1, GeoEye-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4 (США); EROS-A, EROS-B (Израиль).

В табл. 1 приведены технические характеристики основных известных КА ДЗЗ, в табл. 2 – параметры оптико-электронных систем, имеющих высокие характеристики.

В техническом плане повышение разрешающей способности реализуется либо увеличением диаметра и фокусного расстояния используемой оптической системы, либо уменьшением размера пикселей фотоприемных матриц, используемых в аппаратуре, либо уменьшением высоты рабочей орбиты. На практике используются все три способа, иногда одновременно.

Таблица 1

Характеристики КА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

Table 1

Characteristics of high- and ultra-high-resolution remote sensing satellites

КА	Год запуска	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км
		ПАН	МС		
Pleiades-1A (Франция)	2011	0,7	2,8	20,0	694
Pleiades-1B (Франция)	2012	0,7	2,8	20,0	694
KompSat-3 (Корея)	2012	0,7	2,8	16,8	685
«Ресурс-П» №1 (Россия)	2013	0,7	2,1	38,6	475
DubaiSat-2 (ОЭА)	2013	1,0	4,0	12,2	600
Skysat-1 (США)	2013	0,9	2,0	8,0	600
EgypSat-2 (Египет)	2014	1,0	4,0	12,6	720
KazEOSat-1 (Казахстан)	2014	1,0	4,0	20,0	740
Deimos-2 (ОАЭ)	2014	1,0	4,0	12,0	620
SkySat-2 (США)	2014	0,9	2,0	8,0	640
WorldView-3 (США)	2014	0,31	1,24	13,1	617
Gaofen-2 (Китай)	2014	0,8	3,2	45,0 (две камеры)	630
ASRARO-1 (Япония)	2014	0,5	2,0	10,0	520
«Ресурс-П» №2 (Россия)	2014	0,7	2,1	38,6	475
KompSat-3A (Корея)	2015	0,55	2,2	13,0	530
DMC-3A, DMC-3B, DMC-3C (Китай)	2015	1,0	4,0	23,4	650
Jilin-1 (Китай)	2015	0,72	2,88	11,6	670
Cartosat-2C (Индия)	2016	0,65	2,0	11,0	510
«Ресурс-П» №3 (Россия)	2016	0,7	2,1	38,6	475
SkySat-C1, SkySat-C2, SkySat-C3, SkySat-C4, SkySat-C5 (США)	2016	0,7	1,56	6,25	500
WorldView-4 (США)	2016	0,31	1,24	13,1	617
SuperView-01, SuperView-02 (Китай)	2016	2,0	12,0	12,0	500
SkySat-C6-C11 (США)	2017	1,56	6,25	6,25	500

Примечание. ПАН – панхроматический режим; МС – мультиспектральный режим.

С момента существования коммерческих систем ДЗЗ имели место два подхода к используемым орбитам наблюдения. Первый подход ориентирован на создание наиболее «сложных» и полнофункциональных спутников, предназначенных для работы на орбитах 700–800 км и, как правило, имеющих крупногабаритную оптическую систему. Такие спутники за счет большой высоты орбиты имеют широкую полосу обзора и хорошую оперативность наблюдения объектов на поверхности Земли. Второй подход основан на использовании менее габаритных оптических систем и самих спутников. При меньшей полосе обзора и оперативности обеспечивалось достижение примерно тех же параметров по разрешению с круговых орбит меньшей высоты. Развитие этих тенденций по мере появления новых оптико-электронных спутников ДЗЗ показано на рис. 1, а. На рисунке четко выделяются две группы спутников. Для обоих подходов

Таблица 2

Значения параметры бортовой съемочной аппаратуры и выходных параметров КА для спутников, имеющих высокие характеристики

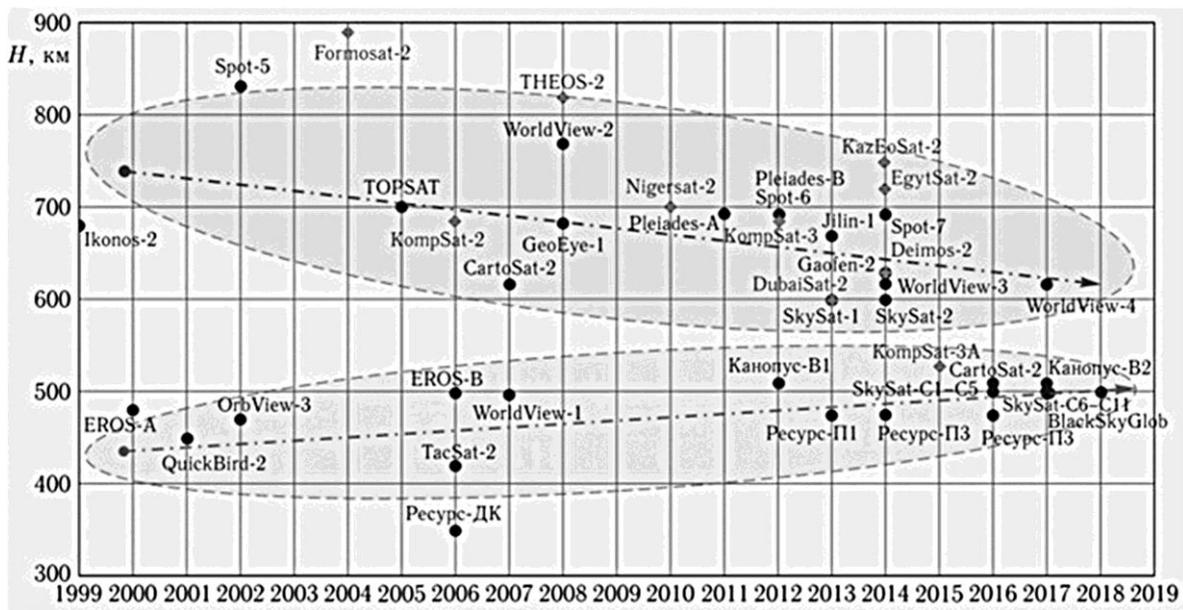
Table 2

Values of the parameters of the onboard survey equipment and the output parameters of the spacecraft for high-performance satellites

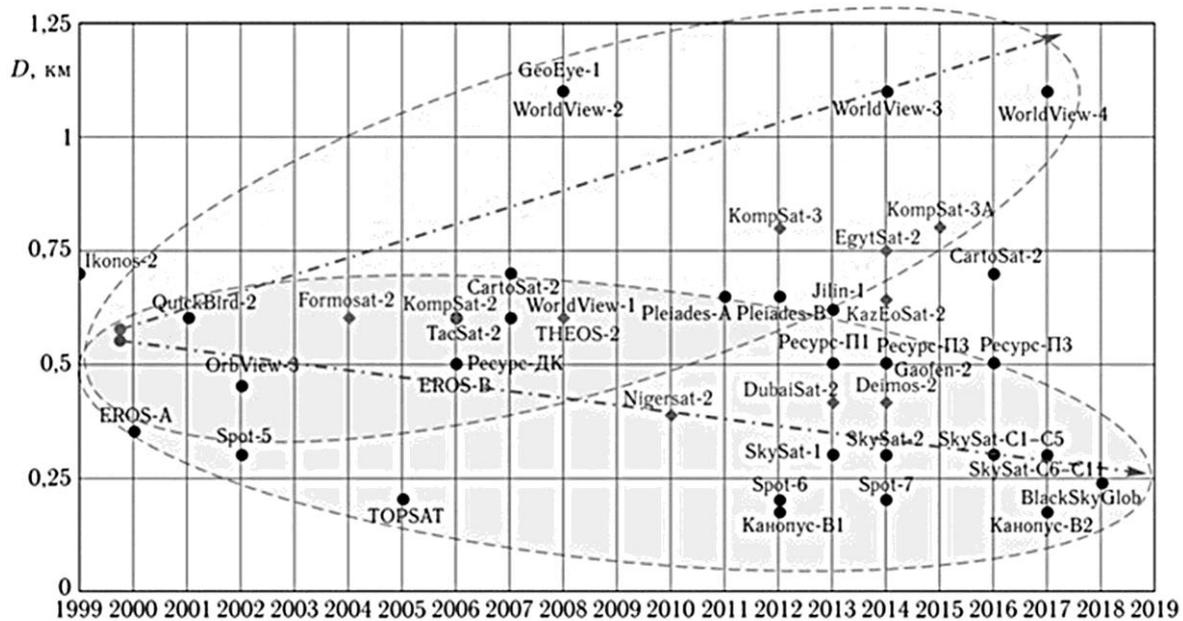
КА	W, Вт	T _{КА} , мин	САС, лет	Параметры						
				оптико-электронной камеры		запоминающего устройства и системы передачи информации		космической системы (выходные)		
				f, м	d, см	Емкость, Гбит	Скорость, Мбит/с	Захват, км	Разрешение, м	
						ПАН	МС			
IKONOS-2	600	98,3	5–7	10,0	70	80	320	11,0	1,0	4,0
QuickBird-2	563	93,4	5–7	8,8	60	128	320	16,5	0,6	2,4
OrbView-3	625	92,6	5	3,0	45	32	150	8,0	1,0	4,0
EROS-B	800	94,8	10	5,0	50	2×120	450	7,0	0,7	–
«Ресурс-ДК»	–	94,0	3	4,0	50	768	300	28,3	1,0	3,0
KompSat-2	955	98,5	5	–	–	64 и 96	320	15,0	1,0	4,0
Cartosat-2	900	97,4	7	5,6	70	64	105	9,6	0,8	–
WorldView-1	3200	93,0	7,25	8,8	60	2200	800	16,4	0,5	–
Cartosat-2A	900	97,4	7	5,6	70	64	105	9,6	0,8	–
GeoEye-1	3862	98,0	7	13,3	110	1200	740	15,2	0,41	1,64
WorldView-2	3200	100,0	7,25	13,3	110	2200	800	16,4	0,46	1,8
WorldView-3	3100	97,0	7,25	13,3	110	2200	1200	13,1	0,31	1,24

Примечание. W – мощность системы электропитания КА; T_{КА} – период обращения КА; f – фокусное расстояние; d – диаметр телескопа.

наблюдается тенденция к сближению характерной высоты орбиты. За время развития систем ДЗЗ типичная высота орбиты спутников первой группы снизилась приблизительно на 100 км, а второй, наоборот, повысилась на 50 км. Высота рабочих орбит у спутников последнего поколения WorldView-3 и WorldView-4 снизилась с 681 и 770 км до 617 км у GeoEye-1 и WorldView-2 соответственно. Это позволило довести разрешение до 31 см. Аналогично высота рабочей орбиты КА KompSat-3A, запущенного в 2015 г., снижена до 530 км по сравнению с высотой 685 км у KompSat-3, работающего на орбите с 2012 г. Это позволило довести разрешение с 0,7 до 0,55 м. При этом полоса захвата соответственно уменьшилась с 16,8 до 13 км, так как использованы те же детекторы без изменений, и длина строки фотоприемников осталась такой же – 24 000 пикселей. Ромбиками на рис. 1, а показаны спутники, созданные по заказу других стран. Их размещение на более высоких орбитах, скорее всего, объясняется стремлением государств-разработчиков таких аппаратов не допустить серьезной конкуренции своим собственным группировкам и спутникам, так как при однотипных решениях разрешение аппаратуры с более высокой орбиты будет несколько хуже. Эта версия находит подтверждение и в других важных характеристиках, например точности координатной привязки информации.



a



b

Рис. 1. Типичная высота орбиты (а) и два подхода к изменению диаметра апертуры телескопа (б) оптико-электронных спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешений [3]
 Fig. 1. Typical orbit height (a) and two trends in the aperture diameter of the telescope (b) of high- and ultra-high-resolution optical-electronic remote sensing satellites [3]

Результаты статистического анализа параметров телескопов, используемых в оптико-электронных системах космического наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения, показывают, что имеют место две тенденции изменения диаметра (апертуры) инструмента (см. рис. 1, б). Одна направлена на увеличение диаметра апертуры, а вторая, наоборот, на снижение. У обеих тенденций одни и те же физические основы и при-

чины: тяготение к двум указанным группам орбит; ориентация на разный уровень пространственного разрешения 0,2–0,3 м или 0,5–1,0 м; уменьшение размера пикселей используемых фотоприемников.

В результате предъявляемые к используемой оптике требования разные. Так, разрешение около 30 см спутников WorldView-3, WorldView-4 и GeoEye-1, имеющих высокую оперативность, могло быть обеспечено только с высокой орбиты при диаметре оптики не менее 1 м. Соответственно, при переходе от КА IKONOS-2 и QuickBird-2 к новому поколению аппаратуры наблюдения параметры используемых оптических телескопов увеличились.

На рис. 2 представлен внешний вид оптико-электронных спутников GeoEye-1, GeoEye-2, QuickBird-2 и WorldView-2.

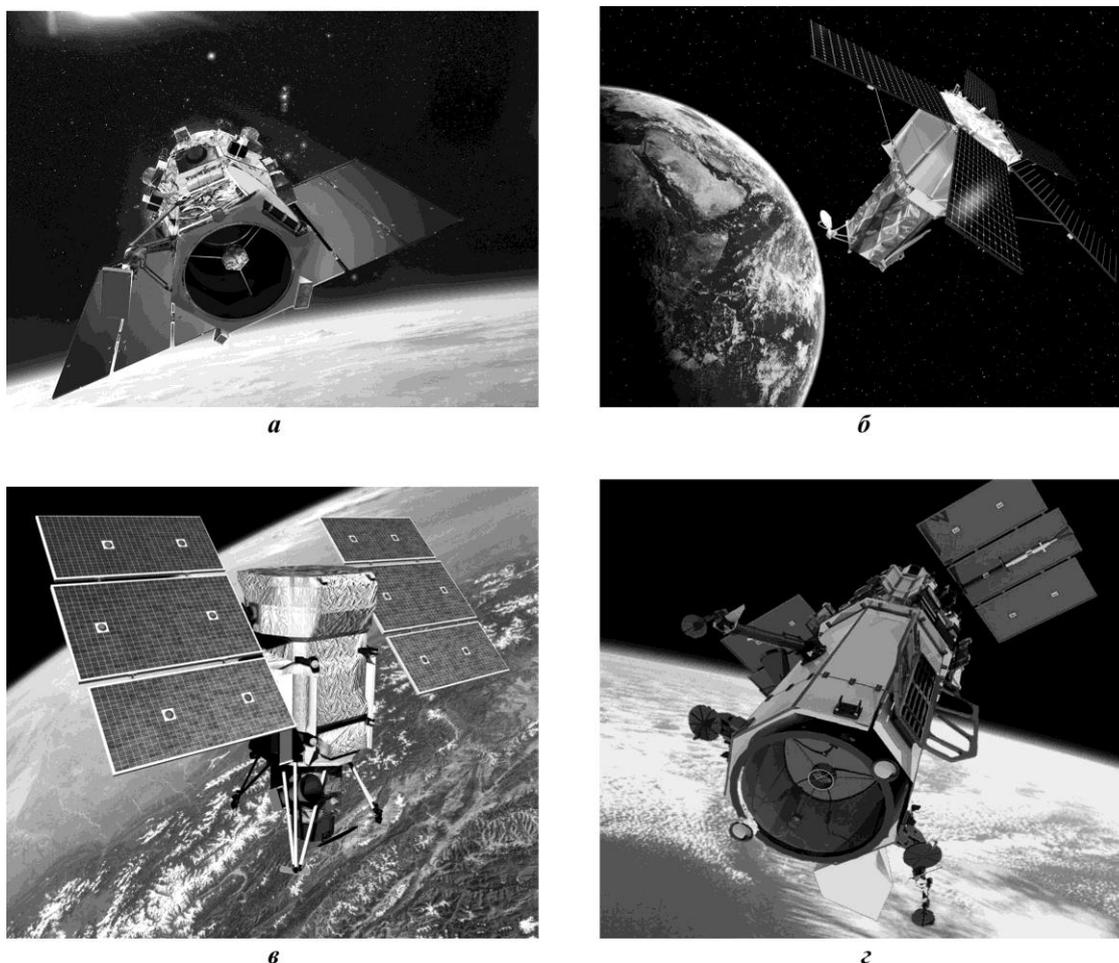


Рис. 2. Общий вид оптико-электронных спутников GeoEye-1 (а), GeoEye-2 (б), QuickBird-2 (в) и WorldView-2 (г) [24]

Fig. 2. General view of optoelectronic satellites GeoEye-1 (a), GeoEye-2 (b), QuickBird-2 (c) and WorldView-2 (d) [24]

Диаметр апертуры составляет 1,1 м против 0,6–0,7 м, а фокусное расстояние выросло до 13–16 м. Отметим, что если в начальный период своего развития в космических системах для получения разрешения 1 м использовалась оптика диаметром 0,5–0,7 м, то в настоящее время те же значения реализуются при диаметрах 35–45 см (SkySat,

DubaiSat-2, Deimos-2). Более того, создаются системы с заявленным разрешением 1 м при диаметре оптики 24 см. Одна из таких систем – это группировка BlackSkyGlob, первые несколько спутников которой выведены на орбиту в 2018 г.

Одни из лучших рассмотренных КА – GeoEye-1 и WorldView-3, обеспечивающие съемку с пространственным разрешением 0,31–0,41 м.

Основные характеристики КА радиолокационного наблюдения. Подавляющее большинство систем ДЗЗ, эксплуатируемых на сегодняшний день в мире, относятся к системам оптико-электронного наблюдения. Однако ведущие космические державы стремятся ввести в состав национальных космических группировок спутники, оснащенные радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА). Это связано с тем, что радиолокационные системы наблюдения по сравнению с оптическими средствами имеют неоспоримые преимущества:

- независимость от погодных условий и времени суток;
- сочетание широкой полосы обзора на больших дальностях и высокой разрешающей способности;
- многорежимность и гибкость управления работой РСА, позволяющие быстро менять положение и размеры зоны обзора, разрешающую способность и формы представления информации;
- высокая оперативность получения данных зондирования вплоть до реального масштаба времени.

Радиолокационная информация незаменима при экстренной съемке в чрезвычайных ситуациях, решении задач ледовой разведки в полярных районах, в картографии, лесоводстве, поиске нефти и пр.

Анализ зарубежных программ позволяет выделить общие черты перспективных спутников с РСА:

- применение радиолокаторов, работающих в одном из трех наиболее распространенных диапазонов частот (*L*, *C* и *X*) со сверхширокополосными сигналами (ширина спектра до 300 МГц) и высоким пространственным разрешением (до 0,5 м);
- повышение частоты и оперативности съемки путем создания многоспутниковых систем (из двух – пяти КА) и обеспечения возможности съемки по обе стороны от трассы полета КА (за счет разворота антенны или всего спутника);
- использование активных фазированных антенных решеток (АФАР) и новых технологий высокоинформативной съемки в поляриметрическом режиме, в режимах селекции движущихся целей, интерферометрическом и стереоскопическом режимах для построения цифровых моделей рельефа местности.

Появившиеся в последние годы новые технологии обработки радиолокационных изображений позволяют осуществлять обнаружение сантиметровых подвижек грунта (например, проседание почвы в районах подземного строительства или водозабора, последствия землетрясений и оползней); обнаружение движущихся целей и наложение их на детальное изображение местности; построение цифровых трехмерных моделей рельефа местности; автоматическое обнаружение изменений на объектах и др.

В табл. 3 представлены характеристики некоторых из реализованных КА радиолокационного наблюдения с РСА. Как следует из таблицы, первые радиолокационные космические системы Radarsat-1, ERS-2 и Envisat-1 обеспечивали разрешение на местности не более 8 м. Современные космические системы имеют сверхвысокое разрешение от 0,5 до 1 м [6–10].

Таблица 3

Характеристики КА радиолокационного наблюдения

Table 3

Characteristics of the radar surveillance spacecraft

КА	Год запуска	Разрешение, м	Диапазон частот	Масса, т
Radarsat-1 (Канада)	1995	8–100	C	2,7
ERS-2 (Европейское космическое агентство)	1995	25–30	C	2,5
Envisat-1 (Европейское космическое агентство)	2002	30–150	C	8,2
Lacrosse / Онух (США)	1991–2000	<1	–	16,0
IGS-1R (Япония)	2003	1–3	–	1,2
SAR-Lupe (Германия)	2006	0,5	X	0,72
TerraSar-X (Германия)	2007	1,0	X	1,3
COSMO-Skymed (Италия)	2007–2008	1,0	X	1,7
Radarsat-2 (Канада)	2007	3–100	C	2,2
Tecsar (Израиль)	2008	0,1	X	0,26
«Кондор» (Россия)	2013	1–2	S	1,15

Радиолокационные изображения дополняют изображения, полученные в видимом и ИК-диапазонах, позволяя повысить объем информации и ее достоверность. С выходом радарных космических систем на тот же порядок пространственного разрешения, что и у систем видимого диапазона, возможности дистанционного зондирования Земли из космоса многократно возрастают. Появление орбитальных группировок из нескольких спутников, таких как SAR-Lupe и COSMO-Skymed, способствует значительному повышению оперативности съемки.

Радарные снимки – удобный и эффективный источник получения детальной, точной, всеобъемлющей информации о рельефе местности, намного более мощный, оперативный, достоверный и экономичный, чем использование, например, космических стереопар или аэрофотоснимков.

Специальные технологии интерферометрической съемки позволяют определять незначительные подвижки грунта. Эти данные могут быть использованы для контроля состояния трубопроводов, обнаружения нелегальных врезок в нефтегазопроводы и оценки сейсмоопасности. Интерферометрия комбинирует комплексные изображения, зафиксированные антеннами под различными углами наблюдения или в разное время. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, представляющую собой сеть цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз по обеим экспозициям. Благодаря высокой частоте излучения подвижки регистрируются с точностью до сантиметров. Все данные съемок представляются в цифровом виде, что обеспечивает также однозначность интерпретации. Интерферометрия – это альтернатива традиционной стереографической технике для создания топографических карт с высоким разрешением вне зависимости от погодных условий.

Самый простой способ оценки смещений и временных изменений – использование пары спутниковых изображений, сделанных с некоторым интервалом времени. Две интерферограммы позволяют увидеть любые изменения, которые произошли на поверхности Земли. Дифференциальная интерферометрия дает возможность определять на малых масштабах смещение земной поверхности (оползни и предвестники землетрясе-

ний), а также отслеживать изменение характеристик радиосигналов из-за смены влажности почвы (проблемы подтопления).

Для получения достоверных результатов необходимо выполнение некоторых условий, таких как выведение спутника для повторной экспозиции в область космического пространства, близкую к первому снимку, один сезон съемки (даже в разные годы) для наблюдения схожего состояния отражающей поверхности (растительный покров, гидрогеологические условия). Эти проблемы в большей мере решаются с помощью специальной системы «Тандем» на базе двух спутников, работающих по одним и тем же орбитам с интервалом полета ровно 24 ч. Примером такой системы является система из современных радиолокационных КА – немецких спутников с радаром с синтезированной апертурой TerraSAR-X и TanDEM-X [6, 7, 9]. КА TerraSAR-X массой 1,3 т обращается по солнечно-синхронной сумеречно-рассветной полярной орбите высотой 514 км и наклоном 97,44°. Это означает, что КА будет двигаться по границе дня и ночи и всегда будет обращен к Солнцу одной и той же стороной. Таким образом достигается оптимальная засветка панелей солнечных батарей. В процессе полета вокруг Земли спутник может снимать все регионы в режиме с фиксированным углом обзора. Через каждые 11 суток КА возвращается на исходную позицию и начинает новый цикл. Расчетный САС КА составляет около 5 лет. РСА выполняет съемку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см) с изменяемой поляризацией излучения в диапазоне съемочных углов от 20 до 55°. Радар выполняет съемку в четырех режимах [6, 7]:

- сверхвысокое разрешение с разрешающей способностью 1 м на участке размером 5×10 км;
- высокое разрешение (2 м, 10×10 км);
- широкополосное высокое разрешение (3 м, 30×50 км);
- среднее разрешение (16 м, 100×150 км).

Радиометрическое разрешение изображений составляет 8 бит, скорость формирования данных (с учетом сжатия) – от 340 до 680 Мбит/с, скорость передачи данных на Землю – 300 Мбит/с. Емкость бортового ЗУ равна 320 Гбит.

Данные ДЗЗ, полученные КА TerraSAR-X, обеспечивают:

- круглосуточное всепогодное наблюдение за любыми объектами на земной поверхности;
- получение высокоточных цифровых моделей рельефа с помощью интерферометрических методов;
- мониторинг самых незначительных подвижек (до 1 мм) на поверхности Земли;
- высокую оперативность выполнения заказов (от 1 до 6 суток).

В 2010 г. в целях оперативной интерферометрической съемки с высокой точностью для группового полета совместно с КА TerraSAR-X Германским космическим агентством запущен КА TanDEM-X (рис. 3), имеющий массу 1,3 т и выполненный в виде шестигранной призмы длиной 5 м и диаметром 2,4 м. Длина антенны РСА 5 м. Оба спутника впервые составили систему, способную создать трехмерную модель рельефа всей поверхности земного шара с вертикальным разрешением 2 м и горизон-

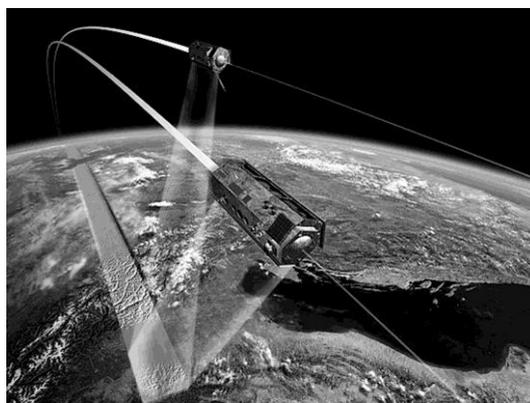


Рис. 3. КА TerraSAR-X и TanDEM-X [10]

Fig. 3. Spacecrafts TerraSAR-X and TanDEM-X [10]

тальным – 12 м. Для составления рельефа всего земного шара потребовалось три года их совместной работы.

Другим примером построения системы из нескольких КА ДЗЗ с РСА является немецкая система, состоящая из четырех КА SAR-Lupe. Масса каждого КА составляет примерно 720 кг, габаритные размеры равны $4 \times 3 \times 2$ м. Предполагаемый САС 10 лет при доступности в течение 97 % времени в году. Средняя потребляемая мощность 250 Вт. КА SAR-Lupe размещаются на трех околополярных орбитах высотой около 500 км. РСА оснащен параболической антенной диаметром 3 м, работающей в X-диапазоне частот. Объем бортового ЗУ для хранения информации наблюдения составляет 128 Гбайт. Сброс информации на Землю осуществляется по прямому радиоканалу X-диапазона частот.

Слово «lupe» («лупа») в названии КА означает возможность снимать определенные цели с существенно большим разрешением. По данным разработчика спутников SAR-Lupe, мировых аналогов такой технологии не существует, что объясняется комбинированием методики синтезированной синтетической апертуры (одновременно с двумя или тремя спутниками) и маневром наблюдения за точкой в сочетании с алгоритмами обработки изображений. В режиме «лупы» движение наблюдаемого объекта ухудшает разрешающую способность метода, поэтому предпочтительнее применять этот метод для съемки неподвижных объектов. В режиме «лупы» максимальное разрешение составляет менее 1 м. По данным разработчика спутников SAR-Lupe, это выше, чем у аналогичных американских и российских систем. Полоса захвата имеет размеры $5,5 \times 5,5$ км при высшем разрешении менее 1 м и 60×8 км при высоком разрешении.

На рис. 4 показан канадский Radarsat-2, оснащенный РСА с АФАР размером $15 \times 1,5$ м. РСА работает на частотах С-диапазона (5,4 ГГц) и осуществляет наблюдение с разрешением 3–100 м в полосе захвата 20–500 км. Бортовое ЗУ емкостью 384 Гбит обеспечивает накопление данных за 28 мин на каждом витке. КА выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой около 800 км и наклоном $98,6^\circ$. Масса РСА составляет 750 кг [6, 7].

В России первый КА ДЗЗ с РСА «Кондор» запущен в июне 2013 г. на орбиту высотой около 500 км и наклоном $74,9^\circ$. Масса спутника 1150 кг, САС 5 лет. РСА S-диапазона частот (3,1 ГГц), оснащенный параболической антенной диаметром 6 м (рис. 5), работает в двух режимах: детальный режим обеспечивает разрешение 1–2 м в полосе захвата 10×10 км; панорамный режим обеспечивает разрешение 2–20 м в полосе захвата 20–160 км. Масса РСА 250 кг, в том числе масса антенны 95 кг, энергопо-

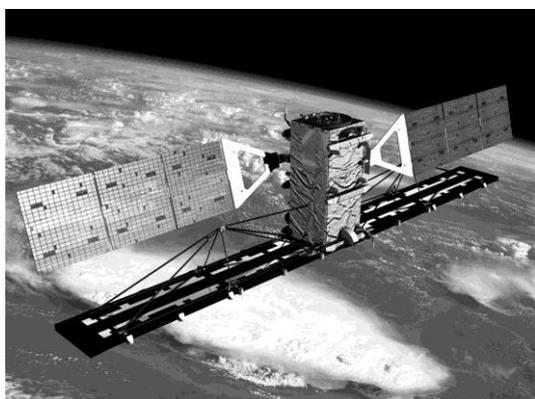


Рис. 4. КА ДЗЗ Radarsat-2 [10]
Fig. 4. Satellite for remote sensing of the Earth Radarsat-2 [10]



Рис. 5. КА ДЗЗ «Кондор» [10]
Fig. 5. Satellite for remote sensing of the Earth Kondor [10]

требление не более 1700 Вт. Скорость передачи (сброса) информации наблюдения на Землю 350 Мбит/с [6, 7].

В настоящее время в России в соответствии с Федеральной космической программой ведется создание крупногабаритного КА «Аркон-2» с трехдиапазонным РСА со следующими характеристиками:

Высота орбиты.....	550–650 км
Наклонение.....	97,6 или 81,4 град
Полоса обзора.....	до 500 км
Размеры района съемки	
детальный режим.....	10 × 10 км
обзорный режим.....	450 км
Длина маршрутной съемки.....	400–4000 км
Периодичность наблюдения.....	1–2 суток
Диапазоны радиолокационной съемки.....	X, L, P
Разрешение (в зависимости от режимов).....	1–50 м
Масса КА.....	4000 кг
в том числе масса полезной нагрузки.....	до 1300 кг
Размеры антенных устройств	
P-диапазон (антенная решетка).....	12 × 4 м
L-диапазон (АФАР с облучателем).....	12 × 3 м
X-диапазон (АФАР).....	6 × 1,5 м

За рубежом высокая информативность многодиапазонных РСА продемонстрирована с помощью американского комплекса SIR-C. Несмотря на небольшую продолжительность трех полетов, совершенных комплексом на борту шаттлов в 1990-х гг., полученная съемочная информация обрабатывалась в течение многих месяцев. Комплекс имел большие размеры: общая масса 11–13 т, в том числе масса антенной системы более 3,3 т; длина 12 м.

Вероятно, ввиду высокой стоимости и сложности за рубежом не удалось создать гражданские спутники с многочастотными РСА. Так, германо-британский радиолокационный проект КА TerraSAR, задуманный первоначально как двухчастотный (в X- и L-диапазонах), в дальнейшем был разделен на два отдельных спутника TerraSAR-X и TerraSAR-L для тандемного полета.

Для реализации программы GMES под руководством Европейского космического агентства ведется разработка пяти типов КА Sentinel, каждый из которых будет осуществлять определенную миссию, связанную с мониторингом Земли. Миссия включает в себя группировку из двух КА для обеспечения наилучшего охвата территории и ускорения повторных съемок, что позволит улучшить надежность и полноту данных для GMES.

Миссия Sentinel-1 будет представлять собой группировку из двух КА радиолокационного наблюдения на полярной орбите, оснащенных РСА для съемок в C-диапазоне частот. Предназначенная специально для программы GMES миссия Sentinel-1 продолжит радиолокационные съемки C-диапазона частот, начатые КА ERS-1, ERS-2, Envisat, Radarsat-1 и Radarsat-2. Группировка Sentinel-1, как предполагается, будет обеспечивать съемками всю территорию Европы, Канады, а также основные морские судоходные пути каждые 1–3 суток. Благодаря использованию спутников-ретрансляторов системы EDRS радиолокационные наблюдения будут поставляться в течение 1 ч после проведения съемки – это большой шаг вперед по сравнению с существующими радарными спутниковыми системами.

Запуск КА Sentinel-1 состоялся в апреле 2014 г. КА массой 2240 кг выводятся на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 693 км. Расчетный САС составляет 7 лет. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-1 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Основные технические характеристики съемочной аппаратуры
КА Sentinel-1

Table 4

Main technical characteristics of the surveying instrument of the Sentinel-1 spacecraft

Спектральный диапазон	С-диапазон		
	Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
Interferometric Wide Swath	5 × 20	250	Двойная (по выбору – HH/VV или VV/VH)
Extra Wide Swath	20 × 40	400	
Stripmap	5 × 5	80	
Wave	20 × 5	20 × 20	Одинарная (по выбору – VV или HH)

Примечание. Периодичность съемки 1–3 суток.

Спутники Sentinel-2 регулярно поставляют космические снимки высокого разрешения всей Земли, обеспечивая непрерывность получения данных с характеристиками, аналогичными программам SPOT и Landsat. КА Sentinel-2 оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением 10–60 м в видимой, ближней ИК- (VNIR) и коротковолновой ИК-зонах (SWIR) спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в том числе и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние атмосферы на качество съемки. Солнечно-синхронная орбита высотой в среднем 785 км, наличие в миссии двух КА позволяют проводить повторные съемки каждые 5 суток на экваторе и каждые 2–3 суток в средних широтах. Увеличение ширины полосы обзора наряду с высокой повторяемостью съемок дает возможность отслеживать быстро изменяющиеся процессы, например характер растительности в течение вегетационного периода. Уникальность миссии Sentinel-2 обусловлена сочетанием большого территориального охвата, частых повторных съемок и, как следствие, систематическим получением полного покрытия всей Земли мультиспектральной съемкой высокого разрешения. Масса КА 1100 кг, расчетный САС 7 лет. Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-2 приведены в табл. 5.

Первый КА Sentinel-2A выведен на орбиту в июне 2015 г. Основная цель миссии Sentinel-3 – наблюдение за топографией поверхности океана, температурой поверхности моря и суши, цветом океана и суши с высокой степенью точности и надежности для прогнозирования состояния океана, а также для мониторинга окружающей среды и климата. Миссии Sentinel-4 и Sentinel-5 – обеспечение данными о составе атмосферы соответствующих служб GMES. Обе миссии реализованы на платформе метеорологических КА европейской организации спутниковой метеорологии EUMETSAT.

Таблица 5

Основные технические характеристики съемочной аппаратуры КА Sentinel-2 (ширина полосы съемки 290 км; периодичность съемки от 5 на экваторе до 2–3 суток в средних широтах)

Table 5

The main technical characteristics of the surveying instruments of the Sentinel-2 spacecraft (the width of the survey swath is 290 km; the revisit rate is from 5 at the equator to 2–3 days in midlatitudes)

Параметр	VNIR-режим										SWIR-режим		
	Спектральные каналы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	12
Спектральный диапазон, мкм	0,44	0,49	0,56	0,66	0,70	0,78	0,78	0,84	0,86	0,94	1,38	1,61	2,19
Пространственное разрешение (в надире), м	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20

Описание КА радиотехнического наблюдения. КА радиотехнического наблюдения предназначены для регистрации из космоса излучений наземных радиотехнических средств в широком диапазоне частот. В России для решения задач радиотехнического наблюдения первоначально созданы комплексы первого поколения с КА «Целина-О» обзорной и «Целина-Д» детальной радиотехнической разведки. Опыт их эксплуатации продемонстрировал высокую эффективность выполнения целевых задач, обусловленную принятыми техническими решениями, что позволило установить потенциальные возможности дальнейшего совершенствования комплексов радиотехнического наблюдения.

Испытания системы радиотехнической разведки «Целина» первого поколения показали, что, кроме обнаружения радиоизлучающих средств и определения их координат, «Целина» точно устанавливает их назначение, характеристики и режимы работы. Основные объекты наблюдения первых КА типа «Целина» – зарубежные радиолокационные станции систем противовоздушной обороны и систем предупреждения ракетного нападения. По информации, получаемой с КА, определяли не только их местоположение, но и дальность действия, чувствительность, охватываемый объем. По предоставляемым данным можно разрабатывать способы преодоления противовоздушной и противоракетной обороны противника. Наблюдения с КА «Целина» за радиопередающей аппаратурой штабов и подразделений иностранных войск позволяли обнаруживать проведение подготовки к различным операциям. Прежде чем поступала информация с КА фоторазведки, спутники радиотехнической разведки первыми предоставляли сообщение – предупреждение, основанное на изменении интенсивности и характера радиообмена.

По результатам анализа функционирования системы «Целина» и перспектив развития бортовой специальной и обеспечивающей аппаратуры определены основополагающие технические решения применительно к КА следующего поколения «Целина-2»:

- совмещение в одном КА функций обзорного и детального наблюдения;
- расширение частотного диапазона;
- расширение полосы обзора детального наблюдения;

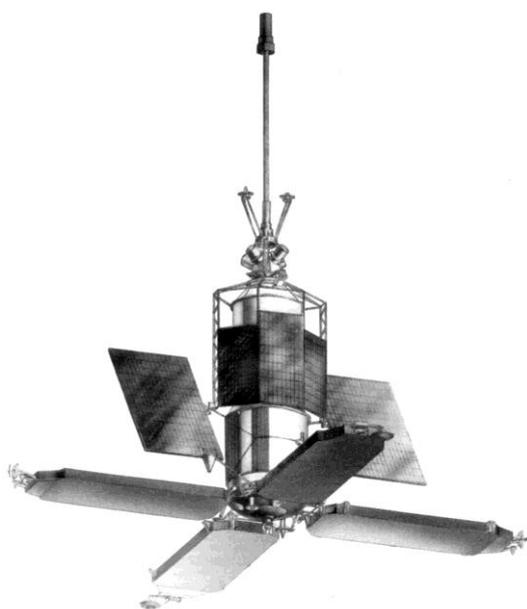


Рис. 6. КА радиотехнического наблюдения «Целина» [3]
Fig. 6. The «Tselina» spacecraft [3]

1120 кг. Габариты комплекса КА $1,2 \times 1,4 \times 4,46$ м. При наличии трех КА в системе периодичность наблюдения составляет 1,5 ч, а время доставки информации на наземный пункт приема – от 5 до 50 мин. Точность определения координат радиолокационных станций составляет до 20 км [9].

Космические системы ретрансляции целевой информации на удаленные земные станции. Основные характеристики КА-ретрансляторов типа TDRS. TDRSS (Data Relay and Tracking Satellite System) – система двойного назначения, способная обслуживать не только космические объекты Национального аэрокосмического агентства США (NASA), но и специальных ведомств [1, 3, 31]. Общая организационная структура системы TDRSS представлена на рис. 7.

Орбитальная группировка TDRSS включает в себя «западный» и «восточный» спутниковые ретрансляторы (СР), располагающиеся на ГСО в точках стояния 171 и 41° з. д.

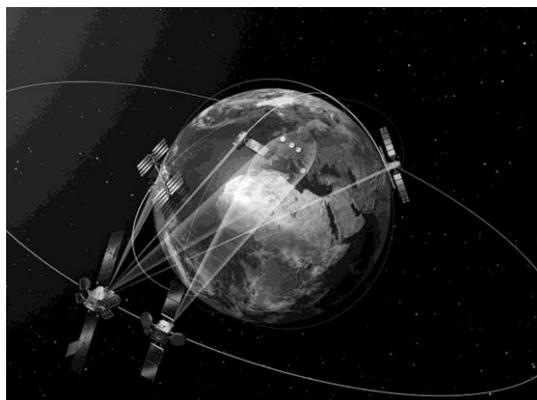


Рис. 7. Общая организационная структура системы TDRSS [3]

Fig. 7. General organizational structure of the TDRSS [3]

– улучшение характеристик периодичности и оперативности наблюдения (в частности, предусмотрена передача специальной информации на Землю через спутник-ретранслятор «Гейзер»);

– квазисинхронная орбита высотой 870 км и наклоном 71° , обеспечивающая повышение эффективности контроля за изменением радиотехнической обстановки;

– состав и функции бортового комплекса управления с учетом использования в его структуре автоматизированной системы управления КА;

– увеличение времени активного существования КА с шести месяцев до одного года.

Комплекс «Целина-2» (рис. 6) включает в себя три КА, каждый из которых имеет массу 3200 кг, массу аппаратуры бортового специального комплекса

ЦЗС системы располагается в штате Нью-Мексико, рядом с испытательным ракетным полигоном NASA в Уайт-Сэндс, т. е. она находится одновременно в зонах радиовидимости «западного» и «восточного» СР. ЦЗС, в свою очередь, связана с центрами управления полетами КА NASA и специальных ведомств с помощью наземных линий связи, а также через спутники систем региональной космической связи. От центров управления NASA на ЦЗС поступают технологическая информация и программы работ, необходимых для организации управления КА. В обратном направлении передаются информация, приня-

тая от КА, и результаты измерений параметров движения. В целом система TDRSS предназначена для передачи на низкоорбитальные КА (НКА) через СР команд управления и речевых сообщений для пилотируемых объектов.

От НКА на ЦЗС в цифровом виде поступает телеметрическая и специальная информация, а от пилотируемых объектов – речевые сообщения. Помимо передачи указанной цифровой информации по каналам системы при необходимости можно передавать информацию в аналоговом виде и сигналы телевидения. Дополнительно к указанным функциям аппаратура ЦЗС позволяет измерять параметры движения (дальность, т.е. протяженность трассы ЦЗС – СР – НКА, и радиальную скорость перемещения НКА относительно СР). Дальность измеряется запросным методом, радиальная скорость – как запросным, так и беззапросным методом. В системе одновременно функционируют прямые (ЦЗС – СР – НКА) и обратные (НКА – СР – ЦЗС) каналы ретрансляции, разделенные по частоте и поляризации [3, 9, 10, 31]. Во всех каналах для передачи информации и измерения дальности используется четырехпозиционная фазовая манипуляция [3] со сдвигом несущей частоты по закону псевдослучайных последовательностей (ПСП), причем ПСП, с помощью которых осуществляется передача информации, поступают на синфазный канал I фазоманипулированного сигнала (информационный канал), а ПСП, с помощью которых осуществляется измерение дальности, передаются по квадратурному каналу Q фазоманипулированного сигнала (измерительный канал). По структуре ПСП информационного и измерительного каналов отличаются друг от друга, т.е. имеет место совмещение информационного и измерительного каналов с использованием разделения каналов по форме (кодовое). Если, например, при информационном обмене с определенным НКА измерение дальности не проводится, то измерительный канал фазоманипулированного сигнала также используется для передачи информации.

В целях повышения помехоустойчивости передаваемая по каналам информация, представленная в двоичном коде, преобразуется с помощью определенных, принятых в США, методов кодирования двоичных единиц и нулей (различные модификации кодирования без возвращения к нулю – NRZ-кодирования или др.). Кроме того, в обратных каналах используется помехоустойчивое кодирование сверточными кодами. Для засекречивания передаваемой информации полученные таким образом кодовые последовательности синхронно суммируются по модулю 2 с ПСП информационного канала [3, 31]. Дальность до НКА измеряется по временной задержке между передаваемой и принимаемой последовательностями квадратурного канала фазоманипулированного сигнала, радиальная скорость – по доплеровскому смещению частоты. Информационный обмен между ЦЗС и НКА через каждый СР осуществляется одновременно в двух режимах: индивидуальный доступ (ИД) и множественный доступ (МД). Необходимость информационного обмена с определенным НКА в том или ином режиме зависит от информативности НКА. Например, с высокоинформативными НКА (пилотируемыми КА и орбитальными станциями, КА ДЗЗ) информационный обмен осуществляется в режиме ИД.

В прямой линии связи через каждый СР одновременно может передаваться информация для двух НКА по четырем отдельным каналам и для одного НКА по каналу в режиме МД [3, 31]. Как в прямой, так и в обратной линии связи на участке ЦЗС – СР используются частотное и кодовое разделения каналов. Кроме того, в обратной линии связи на указанном участке один из каналов отделяется от остальных методом разделения по поляризации. При этом используются несущие частоты в *Ku*-диапазоне частот (12,5–18,0 ГГц). На участке СР – НКА как в прямой, так и в обратной линии связи при

информационном обмене в режимах ИД и МД используются частотное и кодовое разделения каналов. Дополнительно применяются и методы пространственного и поляризованного разделения каналов. Пространственное разделение реализуется с помощью антенн с узкими диаграммами направленности для каналов ИД и фазированной антенной решетки (ФАР) для каналов МД. На указанном участке линий связи при информационном обмене с отдельными НКА (режим ИД) используются одновременно частотные *S*- и *Ku*-диапазоны. Следует отметить, что если НКА оборудован аппаратурой, функционирующей на частотах обоих диапазонов, то информационный обмен с таким НКА может осуществляться одновременно в двух диапазонах частот. Во всех других случаях информационный обмен организуется на частотах либо *S*-диапазона, либо *Ku*-диапазона.

Информационный обмен с НКА в режиме МД осуществляется в *S*-диапазоне частот. В прямом канале СР – НКА используется одна и та же несущая частота для всех НКА. В этом случае применяется МД с временным разделением каналов в сочетании с кодовым разделением. В обратном канале (НКА – СР) информация передается одновременно от 20 НКА на одной и той же несущей и используются кодовое и пространственное разделения каналов [3, 9, 20]. Приведем характеристики СР TDRS первого поколения:

Габаритные размеры.....	17,42 × 12,98 м
Масса на орбите	1088,63 кг
Мощность системы электропитания в конце САС	1700 Вт
Стабилизация.....	по трем осям
Точность наведения перенацеливаемых антенн	0,2°
Число ретрансляционных стволов	два дуплексных в <i>S</i> -диапазоне частот, два дуплексных в <i>Ku</i> -диапазоне частот, один ответный в <i>S</i> -диапазоне частот с МД, один запросный в <i>S</i> -диапазоне частот
Используемая орбита	геостационарная, удержание в пределах ±0,1°
САС	10 лет

Формирование приемных лучей ФАР осуществляется в аппаратуре ЦЗС посредством определения весовых коэффициентов для каждого из 30 парциальных сигналов ФАР выбранного СР. В основе расчета весовых коэффициентов – результаты прогноза текущего положения линии визирования СР – НКА, получаемые исходя из знания эфемерид движения СР и НКА, и известная геометрия расположения излучающих элементов ФАР СР. При программном управлении лучом ФАР для компенсации углового перемещения КА-абонентов относительно СР TDRS расчет новых весовых коэффициентов фазового распределения для каждого ответного абонентского канала должен проводиться каждые 20 с. Для управления приемными лучами ФАР необходимо знать распределение амплитуды и фазы каждого принимаемого абонентского сигнала в раскрыве ФАР, а также амплитудные и фазовые характеристики сигналов НКА на входе устройств формирования лучей ЦЗС. Кроме управления приемными лучами ФАР, ЦЗС для любого абонентского канала должна обеспечивать в заданном направлении на Землю формирование нулевого провала в диаграмме направленности [9–11, 20–22].

Информационный обмен между СР и ЦЗС осуществляется в *Ku*-диапазоне частот с помощью параболической антенны диаметром 2 м, закрепленной на карданном подвесе с двумя степенями свободы. При приеме сигналов от ЦЗС ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ составляет порядка 0,68°, коэффициент усиления 44,5 дБ, поляризация линейная (вертикальная). При передаче сигналов в направлении ЦЗС ши-

рина диаграммы направленности составляет порядка $0,7^\circ$, коэффициент усиления 44 дБ, поляризация линейная (горизонтальная). Кроме того, для передачи на Землю информации с высокой скоростью организуется дополнительный канал с вертикальной поляризацией. По командам, передаваемым с Земли, возможно наведение антенны в пределах пространства, ограниченного конической поверхностью с углом при вершине 60° .

Во всех ответных радиоперелиниях информационного обмена с НКА обеспечивается вероятность ошибки на бит передаваемой информации не более 10^{-5} . Каждый СР системы TDRSS способен одновременно обслуживать до 22 НКА: 20 – в режиме МД и 2 – в режиме ИД. Характеристики ретрансляционной аппаратуры СР TDRS представлены в табл. 6 [1–3]. 30 июня 2000 г. осуществлен запуск усовершенствованного СР для этой системы – TDRS-H, дополнительно обеспечивающего индивидуальный доступ в Ka-диапазоне частот.

Таблица 6

Характеристики ретрансляционной аппаратуры СР TDRS в разных режимах

Table 6

Characteristics of the TDRS satellite repeater relay equipment in different modes

МД в S-диапазоне частот		ИД в S-диапазоне частот		ИД в Ku-диапазоне частот	
НКА – СР	СР – НКА	НКА – СР	СР – НКА	НКА – СР	СР – НКА
Число каналов					
20	1	2	2	2	2
Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, дБВт					
–	34	–	46,4	–	49,4
G/T, дБ/К					
–14,7	–	8,9	–	24,4	–
Максимальная скорость передачи, Мбит/с					
0,05	0,01	12	0,3	300	25
Полоса пропускания ретранслятора, МГц					
5	6	10	20	225	50
Несущая частота абонентских радиоперелиний, МГц					
2287,5	2106,4	2202,5–2297,5	2030–2113,5	15 008,5	13 775

С вводом в эксплуатацию спутников-ретрансляторов нового поколения TDRS-H, I, J система предоставляет пользователям следующие виды обслуживания: многопользовательский доступ в S-диапазоне частот; индивидуальный доступ в S-, Ku- и Ka-диапазонах частот. Для обслуживания космических абонентов в режиме ИД на борту СР TDRS-H, I, J установлены две большие параболические антенны диаметром 4,57 м, каждая из которых может обеспечить работу в S-, Ku- и Ka-диапазонах частот. Для обслуживания в режиме МД на борту каждого СР установлена 30-элементная ФАР [1–3]. Гарантированный САС спутника TDRS-H и других космических аппаратов новой серии составляет 11 лет при расчетном сроке 15 лет. Масса спутника на рабочей орбите около 1780 кг.

Главным различием TDRS-H и двух последующих спутников (TDRS-I, TDRS-J) серии являются две перенацеливаемые зонтичные антенны с сеткой из графитового волокна. За счет использования новых материалов масса таких антенн существенно меньше при той же отражающей поверхности, что и у обычных. Кроме того, оригинальная конструкция позволяет легко складывать антенны для размещения под обтека-

телем носителя, после вывода спутника на орбиту они также легко раскрываются и принимают правильную форму.

Использование на СР TDRS-H аппаратуры *Ka*-диапазона частот (27,5/22,5 ГГц) позволяет увеличить скорость приема информации от НКА до 800 Мбит/с. Кроме того, использование *Ka*-диапазона частот дает возможность избежать интерференции с сигналами спутников и земных станций других операторов во все более загруженном радиоспектре, а также обеспечивает совместимость с европейской и японской системами ретрансляции научной информации. Претерпела изменения и аппаратура множественного доступа. Благодаря увеличенным размерам ФАР стал возможным прием информации от НКА со скоростью до 3 Мбит/с, однако число одновременно действующих каналов приема уменьшено до 5.

В январе 2013 г. запущен СР TDRS-K, в январе 2014 г. – СР TDRS-L. Масса СР TDRS-K вместе с запасом топлива составляет 3454 кг. Система электропитания спутника обеспечивает мощность от 2850 до 3200 Вт. Расчетный САС спутника не менее 15 лет. На СР TDRS-K установлены ретрансляторы *S*-, *Ku*- и *Ka*-диапазонов частот. Так же как и СР предыдущего поколения, TDRS-K может одновременно обслуживать до пяти НКА в режиме МД и два в режиме ИД.

Спутниковая система передачи данных SDS (США). Другая американская космическая система ретрансляции (КСР) – система SDS (Satellite Data System – спутниковая система передачи данных), которая на сегодняшний день является единственной системой, построенной на базе СР на высокоэллиптической орбите со следующими параметрами: апогей, расположенный над Северным полюсом, свыше 39 000 км; перигей 250 – 500 км; наклонение 63,0 – 63,8°; период обращения около 11,7 ч.

Система первого поколения SDS-1 состояла из двух действующих спутников, обеспечивающих связь в реальном масштабе времени между НКА разведки [1, 3, 13, 21, 22], в частности KeyHole-11 (КН-11), и наземными станциями управления, что являлось важной составляющей спутниковой системы связи военно-воздушных сил США AFSATCOM. Помимо информационного обмена с НКА, система SDS-1 обеспечивала связь между Центром управления спутниками ВВС в Саннивейле (штат Калифорния) и отдаленными станциями слежения, расположенными в том числе в высоких широтах. Система SDS-1 также обеспечивала в полярных районах почти непрерывную двустороннюю связь, контроль и управление в УВЧ-диапазоне в интересах командования стратегической авиацией. Таким образом, система охватывала районы, не доступные для геостационарных спутников.

Спутники системы SDS-1 имели форму цилиндра диаметром около 3 м и длиной 4 м. Внешний цилиндр, имевший силиконовую оболочку с нанесенными на нее элементами солнечной батареи, приводился во вращение для равномерного распределения тепловой нагрузки. Масса спутников составляла около 630 кг, а общая длина вместе с установленной на торце спутника главной зонтичной передающей антенной диаметром 3 м равнялась 7,5 м. Мощность системы электропитания спутников 980 Вт. Кроме главной антенны, спутники системы SDS-1 оснащены двумя антеннами меньшего диаметра (до 1 м) и, возможно, другими антеннами. Для поддержания орбитальной группировки системы SDS-1 с 1976 по 1987 г. запущено 7 спутников, САС которых составлял от 2 до 8 лет. Последний спутник этой серии завершил работу в 1995 г.

Впоследствии ВВС США заменили систему SDS-1 на систему нового поколения SDS-2, спутники которой также запускались почти на полусуточную высокоэллиптическую орбиту. Облик спутника этой системы определялся габаритами грузового отсека Space Shuttle, с помощью которого осуществлялось его выведение на орбиту.

В отличие от спутников предыдущего поколения спутник для системы SDS-2 оснащен 4,5-метровыми параболическими антеннами, по конструкции аналогичными используемым на CP TDRS. Для связи с Землей установлена антенна диаметром около 2 м, также имеются и другие антенны. Как и у спутников SDS-1, одна из главных задач CP SDS-2 – ретрансляция информации наблюдения с КА фоторазведки КН-11. Первый запуск SDS-2 осуществлен в августе 1989 г. Параметры спутника системы SDS-2 [1, 2, 13, 17]:

Диаметр корпуса (спутник имеет форму цилиндра).....	4,2 м
Длина	3 м
Масса спутника с топливом.....	2336 кг
Мощность системы электропитания.....	1238 Вт
САС.....	7 лет

В настоящее время в системе SDS функционируют спутники третьего поколения – SDS-3, которые выводятся не только на полусуточные орбиты типа «Молния», но и на ГСО. Начиная с 1998 г. запущены три КА на высокоэллиптическую орбиту и четыре КА на ГСО. Три из последних геостационарных КА, запущенных в 2011, 2012 и 2014 гг., уже относятся к спутникам четвертого поколения [3, 21, 22].

Европейская система ретрансляции данных EDRS. Потребность в европейской системе ретрансляции данных (European Data Relay System, EDRS), позволяющей обеспечивать оперативную передачу больших объемов информации с низкоорбитальных спутников на Землю, возникла в начале 1980-х гг. при появлении долгосрочного плана Европейского космического агентства на последнее десятилетие века и дальнейший период. Необходимость в такой системе обусловлена, главным образом, намерением Европы начать претенциозную программу развития европейской космической инфраструктуры. Система EDRS призвана обеспечивать независимость Европы и отвечать потребностям европейских пользователей. В 1987 г. была начата предварительная программа разработки этой системы с целью детальных технических проработок, а также установления критичных элементов в процессе ее создания. Характерным отличием EDRS, например, от американской системы TDRSS по замыслу разработчиков должен быть децентрализованный метод распределения данных на Земле, допускающий прямой доступ к системе (хотя и с некоторыми ограничениями на линии «вверх»).

Необходимо отметить, что при сохранении европейской независимости разработчики системы стремились к интеграции и взаимодействию с другими существующими или разрабатываемыми КСР, прежде всего американской и японской DRTSS. С этой целью для CP системы EDRS первоначально выбраны точки стояния 44° з. д. и 59° в. д. По замыслу разработчиков при одновременном функционировании европейской, американской и японской систем на ГСО образовались бы три пары близко расположенных CP:

- 1) первая пара – «восточный» CP TDRS в точке 41° з. д. и «западный» CP системы EDRS в точке 41° з. д.;
- 2) вторая пара – «восточный» европейский CP в точке 59° в. д. и «западный» японский CP системы EDRS в точке 90° з. д.;
- 3) третья пара – «восточный» японский и «западный» американский спутники в точке 171° з. д.

Данное расположение CP дает возможность обеспечить определенную степень резервирования для каждого спутника из указанных пар друг другом в случае отказа одного из них. Однако на сегодняшний день в составе японской КСР имеется всего лишь

один спутник-ретранслятор, а европейская система, по всей вероятности, будет базироваться на СР в других точках стояния. Следует отметить способность этих трех систем совместно обеспечивать при необходимости глобальный охват области возможных положений НКА (каждая из систем в отдельности полную глобальность охвата не обеспечивает). Предпосылкой к этому является использование всеми системами одинаковых полос частот *S*- и *Ka*-диапазонов, выделенных для информационного обмена с НКА. Единственная проблема в этом случае – различный характер доведения данных до конечных пользователей: централизованный в США и Японии и децентрализованный в Европе, что может сделать процесс взаимодействия или дорогостоящим, или непрактичным [3, 21, 22].

В обеспечение создания EDRS в июле 2001 г. состоялся запуск технологического СР ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite – спутник для отработки передовых технологий и ретрансляции данных). Однако ввиду нерасчетной работы второй ступени ракеты-носителя пуск оказался неудачным. Вследствие этого спутник сначала был размещен на круговой орбите высотой 31 000 км, и только в январе 2003 г. его удалось перевести на ГСО в точку стояния $24,8^\circ$ в. д. (расчетная точка, в которой спутник находится в настоящее время, – $21,5^\circ$ в. д.) [1–3].

СР ARTEMIS по всем параметрам – уникальный спутник. Он создан для отработки новейших технологий, в первую очередь мобильной связи, телекоммуникации, ретрансляции данных с НКА, в том числе в оптическом диапазоне волн, а также высокоточной навигации. Стартовая масса спутника 3105 кг, мощность бортовой системы электропитания 4 кВт, САС составляет 10 лет. СР оснащен двумя антеннами диаметром 2,85 м, одна из которых обеспечивает информационный обмен с НКА в международных *S*- и *Ka*-диапазонах частот, другая – связь с наземными подвижными объектами в *L*-диапазоне частот (1,6/1,5 ГГц). Кроме того, на борту СР ARTEMIS имеется аппаратура для информационного обмена с КА в оптическом диапазоне длин волн.

Оптическая линия реализована на базе аппаратуры, разработанной по программе SILEX (Semiconductor Laser Inter-Satellite Link Experiment – эксперимент по межспутниковой связи с участием полупроводникового лазера). С помощью этой аппаратуры 21 ноября 2002 г. впервые в мире осуществлен сеанс передачи данных с европейского КА дистанционного зондирования Земли SPOT-4 (высота орбиты 832 км) со скоростью 50 Мбит/с на дальностях до 45 000 км [1–10]. Эксперимент проведен в период нахождения СР ARTEMIS на нештатной круговой орбите. Впоследствии после достижения ГСО с использованием той же аппаратуры успешно проведены эксперименты по связи с японским КА OICETS и наземной станцией на острове Tenerife.

В марте 2003 г. с помощью СР ARTEMIS получены первые снимки с КА ДЗЗ Envisat, оснащенного радаром с синтезированной апертурой. Примененная впервые в Европе аппаратура *Ka*-диапазона частот для ретрансляции данных между этими спутниками и для ее передачи от СР на Землю подтвердила свои параметры и продемонстрировала успешную работу сложного программного обеспечения как в наземных, так и в космических сегментах испытываемого канала связи [1–5]. Помимо того, что СР ARTEMIS является прообразом спутника-ретранслятора для штатной системы EDRS, он также рассматривается как первый шаг к построению новой европейской глобальной навигационной спутниковой системы Galileo. После развертывания ее орбитальной группировки, состоящей из 30 КА, Европа должна стать полностью независимой в этой сфере от других спутниковых систем.

За период экспериментальной отработки СР ARTEMIS концепция построения системы EDRS претерпела значительные изменения. Несмотря на то что, как и прежде,

система будет базироваться на орбитальной группировке из двух геостационарных СР, средства, используемые для решения главной целевой задачи, становятся несколько иными. Если в соответствии с первоначальным замыслом система EDRS должна включать в себя специализированные СР с одинаковым составом полезной нагрузки, то на сегодняшний день предусматривается использование двух разных СР с условными обозначениями EDRS-A и EDRS-C. Их различие заключается в том, что в качестве СР EDRS-A для данной системы используется спутник Eutelsat-9B, несущий кроме основной еще и полезную нагрузку для системы EDRS. С помощью полезной нагрузки организованы каналы информационного обмена с НКА в *Ka*- и оптическом диапазонах частот. СР EDRS-C – специализированный спутник, решающий исключительно задачи системы EDRS и только с использованием каналов оптического диапазона. Основными пользователями системы EDRS станут европейские КА ДЗЗ класса Sentinel, также предполагается обслуживание беспилотных летательных аппаратов [17–22].

Лазерные терминалы, устанавливаемые на СР EDRS-A и EDRS-C, способны осуществлять съем информации с указанных КА со скоростью 600 Мбит/с. Потенциальные возможности лазерных терминалов позволят производить информационный обмен с перспективными КА ДЗЗ со скоростью до 1,8 Гбит/с. Что касается радиолиний *Ka*-диапазона частот, то возможна передача информации с НКА со скоростью 300 Мбит/с.

Развертывание штатной системы EDRS началось в 2016 г. запуском спутника Eutelsat-9B. Его масса на орбите 5,3 т, мощность энергетической установки 12 кВт, САС 15 лет. Спутник обеспечивает из точки стояния 9° в. д. связь европейских потребителей с помощью 66 ретрансляторов *Ku*-диапазона частот. В дополнение к указанной полезной нагрузке на КА Eutelsat-9B установлена аппаратура для работы в системе EDRS. Общий вид КА Eutelsat-9B представлен на рис. 8, а.

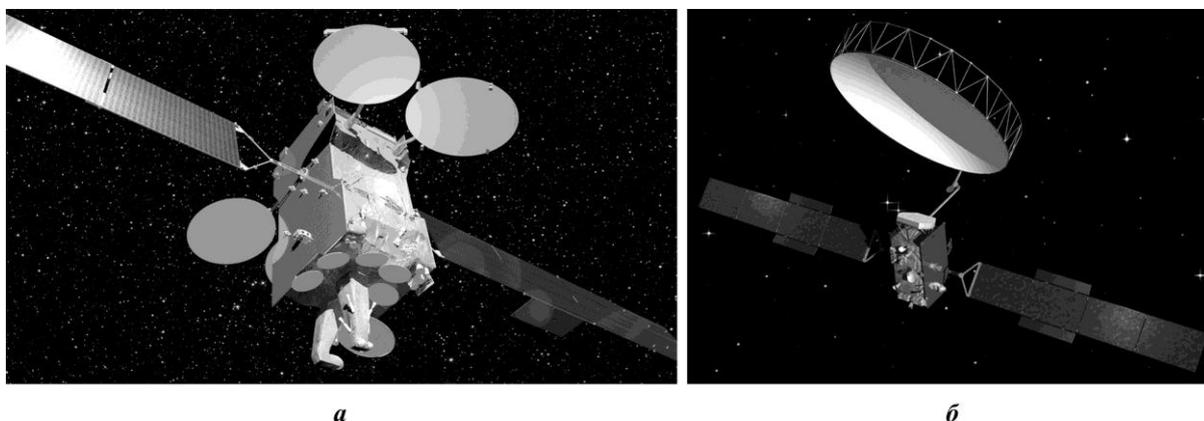


Рис. 8. КА Eutelsat-9B (а) и Alphasat-I-XL (б) [10]
Fig. 8. Spacecrafts Eutelsat-9B (a) and Alphasat-I-XL (b) [10]

Поскольку СР EDRS-C должен нести только полезную нагрузку для обеспечения связи с НКА в оптическом диапазоне частот, он создан на базе относительно малой космической платформы, на которой может быть размещена полезная нагрузка массой до 360 кг с энергопотреблением 3 кВт. САС спутника 15 лет. С вводом в систему обоих СР максимальная пропускная способность системы составит 10,8 Тбит в сутки при работе с перспективными КА ДЗЗ [1–4].

Перед тем как создать систему EDRS, с помощью лазерных терминалов, установленных на НКА Sentinel-1A (высота круговой орбиты 700 км, наклонение $98,2^\circ$) и на ранее запущенном геостационарном КА Alphasat-I-XL (см. рис. 8, б), проведена экспе-

риментальная проверка функционирования оптической линии межспутниковой связи. Передача изображений с НКА осуществлялась на длине волны 1,064 мкм со скоростью 1,8 Гбит/с при максимальной дальности связи 48 000 км.

Один из сложнейших КА связи – спутник Alphasat-I-XL (второе название Inmarsat-I-4A-F4) (см. рис. 8, б) со стартовой массой 6650 кг – выведен на ГСО в июле 2013 г. в точку стояния $24,8^\circ$ в. д. Основное назначение спутника – обеспечение подвижной связи в L -диапазоне частот, в связи с чем он оборудован приемопередающей антенной диаметром 12 м и усовершенствованной ретрансляционной аппаратурой, включающей в себя восемь цифровых сигнальных процессоров нового поколения, которые способны эффективно управлять несколькими коммутационными процессами с максимальной гибкостью как в плане применяемых частот, так и в распределении мощности в антенных лучах. Alphasat-I-XL несет четыре полезные нагрузки с демонстрационными технологиями, в числе которых лазерный терминал для информационного обмена с НКА и ретрансляционная аппаратура для связи с Землей на частотах Q - и V -диапазонов частот [1–10].

Японский спутник-ретранслятор DRTS. В сентябре 2002 г. на ГСО в точку стояния 90° в. д. выведен японский спутник-ретранслятор DRTS (Data Relay and Tracking



Рис. 9. Внешний вид СП DRTS [3]
Fig. 9. Appearance of the DRTS satellite repeater [3]

Satellite), получивший название Kodama («Эхо»). Он предназначался для проведения экспериментов по информационному обмену с НКА на орбите высотой от 300 до 1000 км. Внешний вид DRTS приведен на рис. 9.

СП DRTS – один из самых легких зарубежных КА данного класса: его масса на орбите составила около 1500 кг. Для связи с НКА в S - и Ka -диапазонах частот спутник оснащен двухдиапазонной антенной диаметром 3,6 м, для связи с Землей используется антенна диаметром 1,8 м. Это

обеспечивает возможность приема информации от НКА со скоростью 240 Мбит/с. Используемая на спутнике двухдиапазонная антенна обеспечивает следующие характеристики бортовой аппаратуры СП в абонентском направлении. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность в максимуме луча: S -диапазон – 47 дБВт; Ka -диапазон – 62 дБВт; Параметр добротности на прием (G/T) в максимуме луча: S -диапазон – 8 дБ/К; Ka -диапазон – 27 дБ/К.

В феврале 2003 г. успешно проведен первый эксперимент по ретрансляции данных со спутника ADEOS-II. СП DRTS успешно проводил сеансы связи с шестью различными НКА, в том числе с японским экспериментальным модулем МКС Kibo. При совместной работе с КА ДЗЗ DAICHI осуществлена ретрансляция подавляющего большинства (95 %) из полученных этим спутником 6,54 млн снимков. В качестве других абонентов СП DRTS выступают низкоорбитальные КА ALOS, OICETS, метеорологические спутники Shizuku (второе название GCOM-W1), ракеты-носители Н-П, Н-ПА.

Китайская система CTRSS. В последнее время в Китае отмечается существенный прорыв в космосе в связи с запуском множества спутников самого различного назначения, в том числе пилотируемых космических кораблей. С целью обеспечения их полета и связи с ними вне видимости с национальной территории в Китае придается большое значение созданию собственных средств космической ретрансляции – систем CTRSS (China Tracking and Data Relay Satellite System). Реализация программы нача-

лась с запуска в апреле 2008 г. первого СР «Тяньлянь-1-01» (рис. 10). Для связи с НКА СР оборудован совмещенной следящей параболической антенной S- и Ku-диапазонов частот диаметром 3,05 м. Линии связи с наземными пунктами работают в Ka-диапазоне частот. СР «Тяньлянь-1-01» занимает орбитальную позицию 77° в. д. [9].

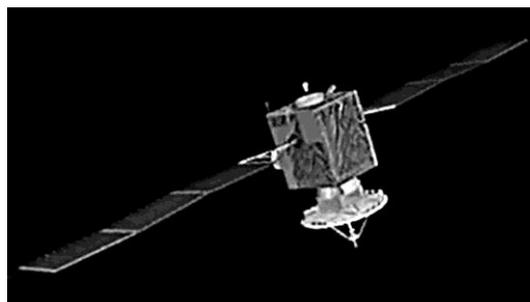


Рис. 10. Спутник-ретранслятор СТDRSS «Тяньлянь-1-01» [10]
 Fig. 10. Satellite repeater СТDRSS «Tianlian-1-01» [10]

В июле 2011 г. в Китае запущен второй СР системы «Тяньлянь-1-02», установленный в орбитальную позицию 176,8° в. д., а в августе 2012 г. – третий СР («Тяньлянь-1-03») для работы в орбитальной позиции 16,7° в. д.

Китайские космические аппараты основаны на базе платформы массой 2100 кг, предназначенной для создания среднеразмерных спутников связи. На этой платформе может размещаться полезная нагрузка массой до 220 кг [1, 3, 9, 11].

Результаты анализа современного состояния и тенденций развития коммерческих космических систем ретрансляции информации. В табл. 7 приведены сравнительные характеристики рассмотренных существующих зарубежных спутниковых систем ретрансляции в части реализуемых в них скоростей передачи информации. Основная отличительная особенность зарубежных космических систем ретрансляции – использование общих международных частотных S- и Ka-диапазонов частот, что обеспечивает их взаимозаменяемость и взаимодополняемость [31].

Таблица 7

Каналы ретрансляции и скорости передачи информации в зарубежных СР

Table 7

Retransmission channels and information transmission rates in foreign satellite repeaters

Канал	TDRS (США)	ARTEMIS (Европа) / Alphasat-I-XL (Европа) / EDRS	DRTS (Япония)
S-диапазон (ИД)			
НКА – СР	100 бит/с – 6 Мбит/с	До 3 Мбит/с	До 5 Мбит/с
СР – НКА	0,1–300 кбит/с	До 1 Мбит/с	До 300 кбит/с
S-диапазон (МД)			
НКА – СР	0,1–50 кбит/с	–	–
СР – НКА	0,1–10 кбит/с	–	–
Ku-диапазон			
НКА – СР	1–300 Мбит/с	–	–
СР – НКА	1–25 Мбит/с	–	–
Ka-диапазон (ИД)			
НКА – СР	До 800 Мбит/с	До 150 Мбит/с	До 240 Мбит/с
СР – НКА	До 50 Мбит/с	До 25 Мбит/с	До 50 Мбит/с
Оптический диапазон			
НКА – СР	–	50 Мбит/с / 1,8 Гбит/с	–
СР – НКА	–	2,048 Мбит/с	–

На спутниках-ретрансляторах зарубежных КСР обслуживание НКА осуществляется узконаправленными параболическими антеннами большого диаметра (3–5 м), способными работать в нескольких частотных диапазонах: в *S*- и *Ka*-диапазонах частот для европейского, китайского и японского спутников и в *S*-, *Ku*- и *Ka*-диапазонах частот для американского спутника (начиная с TDRS-H). При соответствующем построении бортового ретранслятора это позволяет одной такой антенной одновременно обслуживать два НКА, если они находятся приблизительно на одной линии визирования со стороны СР (например, при стыковке двух НКА) и оказываются таким образом в зонах обслуживания двух лучей разных частотных диапазонов, например в *S*- и *Ka*-диапазонах.

Радиолинии *S*-диапазона частот используются в основном для управления посредством обмена низкоскоростной информацией (в том числе командно-программной) с космическими объектами с низкой энерговооруженностью, к числу которых относятся ракеты-носители и разгонные блоки. Радиолинии *Ka*-диапазона частот в силу широкой полосы частот применяются для передачи высокоскоростной информации. НКА при этом оснащаются направленными следящими антеннами, что и обуславливает высокий энергопотенциал таких радиолиний.

Спутники-ретрансляторы системы TDRSS оснащены аппаратурой многостанционного доступа, позволяющей НКА выходить на связь с СР в произвольные моменты времени. На спутниках нового поколения TDRS-H установлена многолучевая ФАР с большей апертурой, чем у предыдущих СР, что позволяет повысить максимальную скорость приема информации от НКА с 50 кбит/с до 3 Мбит/с. В европейской и японской системах данный вид обслуживания не применяется, что, скорее всего, объясняется недостаточностью для решения поставленных задач имеющегося количества каналов индивидуального доступа *S*- и *Ka*-диапазонов частот.

Ключевая особенность СР ARTEMIS – наличие оптического канала ретрансляции с пропускной способностью до 50 Мбит/с на прием и до 2,048 Мбит/с на передачу, значительно увеличенной (до 1,8 Гбит/с) с запуском КА Alphasat-I-XL. Оптическая связь в настоящее время признана одним из перспективных направлений спутниковой связи, поскольку прогрессирующими темпами развиваются потребности общества в передаче больших потоков информации в гражданской и в военной сферах.

Интерес к оптическим линиям связи обусловлен принципиальными преимуществами этих систем: высокая скорость передачи информации при габаритах и массе системы меньше соответствующих параметров систем радиодиапазона; скрытность и защищенность от несанкционированного доступа, что, наряду с известными методами кодирования, обусловлено узкой диаграммой направленности излучения; помехоустойчивость и электромагнитная совместимость.

Успешно проведенные эксперименты по оптической связи с применением СР ARTEMIS и Alphasat-I-XL, а также успехи в области разработки и создания лазерных терминалов позволили разработчикам европейской КСР коренным образом пересмотреть первоначальную концепцию построения системы в пользу преимущественного использования оптических линий связи с НКА с одновременным отказом от размещения на борту СР аппаратуры относительно низкоскоростных линий связи *S*-диапазона. Реализация на борту НКА и СР аппаратуры оптической связи является не самоцелью, а следствием постоянно возрастающих требований к пропускной способности линий информационного обмена с КА ДЗЗ, связанных с увеличением разрешающей способности последних и затруднением хранения на борту и с последующим сбросом на Землю значительных объемов информации.

Таким образом, ключевыми техническими решениями, которые внедрены или внедряются в КСР, являются унифицированные для всех КСР линии связи *S*- и *Ka*-диапазонов частот; многодиапазонные антенны для связи с НКА, включая КА ДЗЗ; линии связи оптического диапазона. Ведущие промышленные державы мира и европейское сообщество, обладающие развитой низкоорбитальной инфраструктурой, состоящей из космических объектов различного назначения (ракет-носителей, разгонных блоков, автоматических и пилотируемых космических аппаратов), развернули в настоящее время собственные КСР для информационного обмена с космическими объектами. Для информационного обмена с объектами ракетно-космической техники в основном используются обеспечивающие взаимодействие между системами международные каналы ретрансляции *S*-диапазона частот с пропускной способностью до единиц мегабит в секунду и *Ka*-диапазона частот с пропускной способностью в сотни мегабит в секунду. В европейской системе также проходят экспериментальную отработку каналы ретрансляции оптического диапазона с пропускной способностью до единиц гигабит в секунду.

Заключение. Анализ современного состояния орбитальных группировок КА ДЗЗ различного целевого назначения – основных технических характеристик, в частности используемых частотных диапазонов, типов и габаритов антенно-фидерных систем, скоростей передачи (сброса) целевой информации от полезных нагрузок КА ДЗЗ, – показал следующее. Рассмотренные КА отличаются достаточно высокой разрешающей способностью бортовой аппаратуры, наличием различных режимов съемки, возможностью всепогодного их применения, а также крайне высокой оперативностью доведения целевой информации до конечного потребителя за счет использования межспутниковых радиолиний связи и ретрансляции информации на удаленные земные станции через КА-ретрансляторы на высоких орбитах [31].

Согласно проведенному сравнительному анализу КА-ретрансляторов, достигнуты хорошие результаты в разработке высоких пропускных способностей каналов сброса и ретрансляции целевой информации с КА ДЗЗ на удаленные земные станции, составляющих до нескольких сот мегабит в секунду. Это позволяет получать информацию в реальном масштабе времени.

Использование оптических радиолиний связи – перспективное направление. Такие радиолинии качественно дополняют существующие радиотехнические средства передачи данных в части скрытности передачи информации, защиты от несанкционированного доступа, высокой помехоустойчивости и электромагнитной совместимости, чрезвычайно высоких скоростей передачи информации, достигающих единиц гигабит в секунду.

Литература

1. **Макаренко С. И., Иванов М. С.** Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы: монография. СПб.: Научное издание, 2018. 898 с.
2. **Макаренко С. И.** Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века: монография. СПб.: Научное издание, 2017. 546 с.
3. Космические системы ретрансляции: монография / **Н. А. Тестоедов, В. Е. Косенко, Ю. Г. Выгонский и др.** М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
4. **Шовенгердт Р. А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. **Бакланов А. И.** Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. 2010. № 2 (22). С. 80–91.

6. **Гарбук С. В., Гершензон В. Е.** Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Инженер.-технол. центр «СканЭкс»: А и Б, 1997. 296 с.
7. **Кучейко А. А.** Мировая отрасль космической съемки в итогах запусков спутников // Земля из космоса. 2016. № 6 (22). С. 55–65.
8. **Свиридов К. Н., Тюлин А. Е.** О проектировании оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и Космос. 2018. № 4. С. 136–145.
9. **Алябьев А. А., Коберниченко В. Г.** Использование материалов радиолокационной космической съемки для информационного обеспечения мониторинга пространственных данных // Геодезия и картография. 2007. № 5. С. 37–45.
10. **Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.** Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
11. **Тюлин А. Е., Бетанов В. В., Ларин В. К.** Информационное обеспечение управления космическими аппаратами: системный подход к решению задач. М.: Радиотехника, 2019. 272 с.
12. Организация сквозного тракта телемостов с использованием многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч» / **К. В. Громов, Ю. Г. Выгонский, С. М. Роскин и др.** // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 191–196.
13. Пат. 2503127 РФ. Многофункциональная космическая система ретрансляции для информационного обмена с космическими и наземными абонентами / **Ю. Г. Выгонский, В. И. Лавров, В. А. Мухин и др.**; заявл. 20.12.2011; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. 15 с.
14. **Благодаряцев И. В., Антохин Е. А., Федулин А. М., Паничев В. А.** Опыт применения имитационного моделирования боевых действий на базе технологий виртуальной реальности для оценки наземных робототехнических комплексов военного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Т. 7. № 2. С. 94–99. doi: <https://doi.org/10.31776/RTSJ.7202>
15. **Федулин А. М., Садеков Р. Н.** Алгоритм навигации беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны // Известия Института инженерной физики. 2020. № 3 (57). С. 79–84.
16. **Федулин А. М., Никандров Г. В.** Перспективы применения систем технического зрения для повышения автономности крупноразмерных беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета // Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации: сб. статей V Воен.-науч. конф. (Анапа, 29–30 июля 2020 г.). Анапа, 2020. Т. 2. С. 58–65.
17. Системный анализ и организация автоматизированного управления космическими аппаратами: учебник / **Ю. С. Мануйлов, А. Н. Павлов, Е. А. Новиков и др.**; под общ. ред. Ю. С. Мануйлова. СПб.: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 2010. 266 с.
18. **Усков А. А., Кузьмин А. В.** Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 143 с.
19. П. м. 191165 РФ. Бортовой терминал радиосвязи беспилотного летательного аппарата / **Н. Н. Долженков, А. В. Абрамов, Д. Г. Пантенков и др.**; заявл. 21.03.2019; опубл. 26.07.2019; Бюл. № 21. 8 с.
20. **Пантенков Д. Г., Ломакин А. А.** Оценка устойчивости спутникового канала управления беспилотными летательными аппаратами при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 11 (17). С. 43–50. doi: [https://doi.org/10.18127/j00338486-201911\(17\)-04](https://doi.org/10.18127/j00338486-201911(17)-04)
21. **Егоров А. Т., Ломакин А. А., Пантенков Д. Г.** Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Ч. 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 19–26. doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26>
22. **Ломакин А. А., Пантенков Д. Г., Соколов В. М.** Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Ч. 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37–48. doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48>
23. **Догерти М.** Дроны: первый иллюстрированный путеводитель по БПЛА: пер. с англ. В. Бычковой, Д. Евтушенко. М.: ГрандМастер: Э, 2017. 224 с.
24. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции / **А. В. Кузовников, Н. А. Тестоедов, В. Г. Сомов и др.** М.: Радиотехника, 2015. 216 с.
25. **Иванкин Е. Ф.** Информационные системы с апостериорной обработкой результатов измерений: монография. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 168 с.
26. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием: монография / **В. Н. Ленин, В. Н. Антипов, А. Ю. Викентьев и др.** М.: Радиотехника, 2017. 416 с.

27. **Пантенков Д. Г.** Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5 (10). С. 20–30. doi: [https://doi.org/10.18127/j00338486-202005\(10\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202005(10)-03)

28. **Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П.** Алгоритмы формирования и обработки радиосигналов командно-телеметрической радиолинии и технические предложения по их реализации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 90–105. doi: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.2.014>

29. **Цветков К. Ю., Акмоллов А. Ф., Викторов Е. А.** Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3 (58). С. 63–70.

30. **Журавлев В. И., Руднев А. Н.** Цифровая фазовая модуляция: монография. М.: Радиотехника, 2012. 208 с.

31. **Пантенков Д. Г.** Моделирование и сравнительный анализ своевременности передачи информации от источника к получателю в двухуровневой системе спутниковой связи с использованием космических аппаратов на низких и геостационарной орбитах // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 192–219. doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10407>

Обзорная статья поступила в редакцию 21.10.2021 г.; одобрена после рецензирования 27.11.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, заместитель главного конструктора по радиосвязи АО «Кронштадт» (Россия, 123060, г. Москва, 1-й Волоколамский пр-д, 10/1), pantenvov88@mail.ru

Гусаков Николай Васильевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий» (Россия, 214012, г. Смоленск, ул. Ново-Ленинградская, 10), N.V.Gusakov@mail.ru

Ломакин Андрей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер АО «Кронштадт» (Россия, 123060, г. Москва, 1-й Волоколамский пр-д, 10/1), lomakinandrej@yandex.ru

References

1. Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Netcentric warfare – principles, technologies, examples, and prospects*. St. Petersburg, Naukojemkiye tekhnologii Publ., 2018. 898 p. (In Russian).
2. Makarenko S. I. *Information confrontation and electronic jamming in the netcentric warfare of the beginning of the 21st century*. St. Petersburg, Naukojemkiye tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (In Russian).
3. Testoyedov N. A., Kosenko V. E., Vygonskiy Yu. G., Kuzovnikov A. V., Mukhin V. A., Chebotarev V. E., Somov V. G. *Space relay systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 448 p. (In Russian).
4. Schowengerdt R. A. *Remote sensing. Models and methods for image processing*. 3rd ed. San Diego, CA, Academic Press, 2007. 560 p. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369407-2.X5000-1>
5. Baklanov A. I. Status analysis and progress trends of high- and ultra-high-resolution imaging systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva = Vestnik of Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev*, 2010, no 2 (22). pp. 80–91. (In Russian).
6. Garbuk S. V., Gershenzon V. E. *Space-based Earth observing systems*. Moscow, Inzhener.-tekhno. tsentr “SkanEks” Publ., A i B Publ., 1997. 296 p. (In Russian).
7. Kucheiko A. A. World industry of orbital survey in the results of satellite launches. *Zemlya iz kosmosa = Earth from Space*, 2016, no. 6 (22), pp. 55–65. (In Russian).
8. Sviridov K. N., Tyulin A. E. On the design of optoelectronic equipment for Earth remote sensing spacecrafts. *Informatsiya i Kosmos = Information and Space*, 2018, no. 4, pp. 136–145. (In Russian).

9. Alyab'ev A. A., Kobernichenko V. G. The use of the radiolocation space survey materials for the information provision of the spatial data monitoring. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and cartography*, 2007, no. 5, pp. 37–45. (In Russian).
10. Verba V. S., Neronsky L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Space-based radar systems of land survey*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 680 p. (In Russian).
11. Tyulin A. E., Betanov V. V., Larin V. K. *Information support for spacecraft control: system approach to problem solution*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2019. 272 p. (In Russian).
12. Gromov K. V., Vigonskiy U. G., Roskin S. M., Kuzovnikov A. V., Muhin V. A. Organization [of] through channel television space bridges with usage of multifunctional space system relaying “Luch”. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva = Siberian Aerospace Journal*, 2013, no. 6 (52), pp. 191–196. (In Russian).
13. Vygonskiy Ju. G., Lavrov V. I., Mukhin V. A., Matveenko S. P., Sivirin P. Ja. *Multifunctional space relay system for data communication with space and terrestrial users*. Patent 2503127 RF, publ. 27.12.2013, Bul. no. 36. 15 p. (In Russian).
14. Blagodarjashev I. V., Antokhin E. A., Fedulin A. M., Panichev V. A. Application experience of military operation simulation based on virtual reality techniques for military robotic systems evaluation. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 94–99. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31776/RTCJ.7202>
15. Fedulin A. M., Sadekov R. N. Algorithm for unmanned aerial vehicles navigation based on the location of air defense equipment. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2020, no. 3 (57), pp. 79–84. (In Russian).
16. Fedulin A. M., Nikandrov G. V. Prospects for the use of vision systems to increase the autonomy of large-sized unmanned aerial vehicles of long flight duration. *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii = Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation, 5th military and scientific conference proceedings*, Anapa, 2020, pp. 58–65. (In Russian).
17. Manuylov Yu. S. (auth., ed.), Pavlov A. N., Novikov E. A. et al. *System analysis and organization of automated spacecraft control*. St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2010. 266 p. (In Russian).
18. Uskov A. A., Kuz'min A. V. *Intelligent control technologies. Artificial neural networks and fuzzy logic*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 143 p. (In Russian).
19. Dolzhenkov N. N., Abramov A. V., Egorov A. T., Lomakin A. A., Pantenkov D. G. *Unmanned aerial vehicle radio terminal*. Utility patent 191165 RF, publ. 26.07.2019, Bul. no. 21. 8 p. (In Russian).
20. Pantenkov D. G., Lomakin A. A. Assessment of stability of the satellite channel of control of unmanned aerial vehicles at influence of intentional interference. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2019, vol. 83, no. 11 (17), pp. 43–50. (In Russian). doi: [https://doi.org/10.18127/j00338486-201911\(17\)-04](https://doi.org/10.18127/j00338486-201911(17)-04)
21. Egorov A., Lomakin A., Pantenkov D. Mathematical models of satellite communication systems with unmanned aerial vehicles and counter-means of radio control. Part 1. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi = Proceedings of Telecommunication Universities*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 19–26. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-3-19-26>
22. Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Mathematical models of satellite communication systems with unmanned aerial vehicles and counter-means of radio control. Part 2. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi = Proceedings of Telecommunication Universities*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 37–48. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48>
23. Doherty M. J. *Drones: An illustrated guide to the unmanned aircraft that are filling our skies*. London, Amber Books, 2015. 224 p.
24. Kuzovnikov A. V., Testoyedov N. A., Somov V. G., Semkin P. V. et al. *Modern radio monitoring technologies in satellite communication and relay systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 216 p. (In Russian).
25. Ivankin E. F. *Information systems with posterior processing of measurement results*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2008. 168 p. (In Russian).
26. Lepin V. N., Antipov V. N., Vikent'yev A. Yu. et al. *Interference protection of radio-electronic control systems for aircraft and weapons*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2017. 416 p. (In Russian).
27. Pantenkov D. G. Results of mathematical modeling of noise immunity of satellite radio communication systems under the influence of intentional interference. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2020, vol. 84, no. 5 (10), pp. 20–30. (In Russian). doi: [https://doi.org/10.18127/j00338486-202005\(10\)-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202005(10)-03)
28. Pantenkov D. G., Litvinenko V. P. Algorithms of formation and processing of radio signals of command and telemetry radio lines and technical proposals for their implementation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 90–105. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.2.014>

29. Tsvetkov K. Yu., Akmolov A. F., Viktorov E. A. Mathematical modeling of management channel organization for speech and data mixed traffic in multitude of satellites at miscellaneous height. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2012, no. 3 (58), pp. 63–70. (In Russian).

30. Zhuravlev V. I., Rudnev A. N. *Digital phase modulation*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 208 p. (In Russian).

31. Pantenkov D. G. Simulation and comparative analysis of transmission timeliness source-to-recipient information in a two-tier system satellite communications using spacecraft in low and geostationary orbits. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 192–219. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10407>

The review article was submitted 21.10.2021; approved after reviewing 27.11.2021; accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Dmitry G. Pantenkov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief Designer for Radio Communications, JSC “Kronshtadt” (Russia, 123060, Moscow, 1st Volokolamsky passage, 10/1), pantenkov88@mail.ru

Nikolai V. Gusakov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, JSC “Scientific Research Institute of Modern Telecommunication Technologies” (Russia, 214012, Smolensk, Novo-Leningradskaya st., 10), N.V.Gusakov@mail.ru

Andrei A. Lomakin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Engineer, JSC “Kronshtadt” (Russia, 123060, Moscow, 1st Volokolamsky passage, 10/1), lomakinandrej@yandex.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 – 2021 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>

К 90-летию со дня рождения Вернера Виталия Дмитриевича



1932 – 2016

6 января 2022 г. исполнилось 90 лет со дня рождения Виталия Дмитриевича Вернера, доктора физико-математических наук, профессора, ученого в области технологий микро- и наноэлектроники, ректора МИЭТ с 1988 по 1998 г., главного редактора журнала «Известия вузов. Электроника» с 1996 по 2016 г.

Трудовую деятельность В. Д. Вернер начал инженером на Пензенском дизельном заводе, где за два года стал начальником лаборатории. В 1958 г. поступил в аспирантуру, с 1961 г. работал на кафедре общей и теоретической физики в филиале МИСиС г. Электростали, в 1966–1967 гг. – доцент Всесоюзного заочного машиностроительного института.

С 1967 г. В. Д. Вернер трудился в МИЭТ доцентом, деканом факультета повышения квалификации, заведующим кафедрой общей физики и кафедрой физики и технологии интегральных микросхем, проректором по научной работе, ректором. С 1998 г. В. Д. Вернер работал в НПК «Технологический центр».

Под руководством В. Д. Вернера в МИЭТ были сформированы новые научные направления: разработка магниточувствительных полупроводниковых приборов и интегральных схем; разработка фоточувствительных полупроводниковых приборов; использова-

ние методов электронной микроскопии при исследовании материалов и структур компонентной базы микроэлектроники. В области технологий микроэлектроники основным направлением работ, разрабатываемым под руководством профессора В. Д. Вернера, стало использование и развитие методов самосамещения и самоформирования для минимизации размеров областей физической структуры элементов ИС при заданных литографических нормах.

В 1986 г. под руководством Виталия Дмитриевича была организована учебно-производственная технологическая лаборатория кафедры физики и технологии интегральных микросхем, в 1988–1990 гг. создан первый в системе Минвуза пилотный модуль микроэлектронного производства – НПК «Технологический центр».

Будучи ректором, профессор В. Д. Вернер много внимания уделял интеграции вуза с промышленностью. В результате в МИЭТ была сформирована разветвленная многоуровневая система подготовки научных и учебно-педагогических кадров.

Профессор В. Д. Вернер на протяжении многих лет возглавлял ведущие научные школы России: «Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники» и «Интегральный конструктивно-технологический базис систем на кремнии». Многие годы он посвятил становлению и развитию в России нового научно-технического направления – микросистемная техника. Результаты его исследований опубликованы более чем в 250 научных трудах, подтверждены 22 авторскими свидетельствами на изобретения и патентами, использованы ведущими предприятиями электронной промышленности.

Выдающийся труд В. Д. Вернера высоко оценен государством. Он награжден орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, медалями, удостоен звания лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники. Ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Редколлегия

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 декабря 2021 г.)

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

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

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

Основные рубрики:

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

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом **в двух экземплярах**.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

- печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт <https://inkscape.org>). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. Полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в формате TIFF (без компрессии). **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подписанные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

- русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miec.ru

<http://ivuz-e.ru>

ПОДПИСКА 2022

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

Периодичность журнала – 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». 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 «Урал-Пресс Округ»: 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>

29-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022»

Национальный исследовательский университет «МИЭТ» проводит **21–22 апреля 2022 года** в очно-заочной форме (в системе Zoom) 29-ю Всероссийскую межвузовскую научно-техническую конференцию студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2022».

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям):

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микромеханика, сенсоры, робототехнические комплексы.
5. Математическое моделирование процессов и технологий.
6. Автоматизированные информационные системы и информационные технологии.
7. Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства.
8. Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций.
9. Информационная безопасность.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические проблемы электроники и окружающей среды.
12. Менеджмент, маркетинг в электронике и информатике.

Форма участия в работе очно-заочной конференции – выступление с докладом на секции, продолжительность выступления в рамках 5–10 мин.

По итогам работы секций проводится конкурс работ студентов, авторами которых являются только студенты, и конкурс работ аспирантов, авторами которых являются только аспиранты. Лучшие работы будут отмечены дипломами лауреатов.

По материалам конференции предполагается издание сборника статей конференции с индексированием в РИНЦ. Отбор работ для опубликования в сборнике проводится Оргкомитетом конференции по результатам выступлений.

Ознакомиться с требованиями к представлению и оформлению тезисов и докладов можно на сайте МИЭТ в разделе «Наука и инновации», «Конференции и семинары»: <https://miet.ru/page/140891>.

Ответственный секретарь Оргкомитета – Харач Валентина Павловна.

Адрес Оргкомитета: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ОНТИ, на конференцию «МЭИнфо-2022».

Тел.: 8-499-720-85-30

E-mail: onti@miee.ru (для справок)