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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

МИЭТ – 60 лет

Том 30 № 5
Vol. 30 No. 5
сентябрь – октябрь
September – October
2025



Памятник-бюст министру электронной промышленности СССР А. И. Шокину (открыт 16 июля 1982 г.)

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Том 30, № 5, 2025
сентябрь – октябрь

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
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Громов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Мещеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434

© «Известия вузов. Электроника», 2025
© МИЭТ, 2025

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
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (г. Долгопрудный, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией ***И. М. Доронина***
Редактор ***А. В. Тихонова***
Корректор ***И. В. Проскурякова***
Верстка ***А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков***

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

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

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

Подписано в печать 13.10.2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 17,205 усл.печ.л., 15,316 уч.-изд.л. Тираж 200 экз. Заказ № 6. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)
1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)
1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)
1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)
2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)
2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)
2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)
2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Журнал включен в Russian Science Citation Index, 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.

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

СОДЕРЖАНИЕ

МИЭТ – 60 лет! 537

Фундаментальные исследования

Верюжский И. В., Приходько А. С., Усков Ф. А., Григорашвили Ю. Е., Боргардт Н. И. Импульсное лазерное осаждение и исследование методами электронной микроскопии гетероструктуры на основе сплава Гейслера CoFeMnSi и кобальта 543

Материалы электроники

Аникин А. В., Громов Д. Г., Лебедев Е. А., Боргардт Н. И., Волков Р. Л., Лавров И. В., Силибин М. В., Дубков С. В., Вигдорович Е. Н., Павликов А. В., Комленок М. С., Курочицкий Н. Д., Громов В. Д., Рязанов Р. М., Крохан Н. В., Шарипов Р. А., Новикова О. В., Гаврилов С. А., Подорожний О. В. Исследование процессов формирования и стабильности фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si для фотошаблонов под воздействием глубокого ультрафиолетового излучения с длиной волны 248 нм 552

Борисов А. Г., Вертянов Д. В., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г., Тимошенков С. П. Особенности свойств полимерных композитов на основе наноразмерной дисперсной фазы 566

Назаркина Ю. В., Шитова Д. Д., Дронов А. А., Еганова Е. М. Исследование влияния гидродинамических условий формирования на морфологию и фотокаталитические свойства анодного оксида вольфрама 575

Технологические процессы

Гагарина Л. Г., Шевнина Ю. С., Семенов М. Ю., Царапкин С. Ф., Минаков Е. И. Предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники с учетом стохастических факторов 586

Кульпинов М. С., Путря М. Г., Голишников А. А., Балашов А. Г. Причины возникновения LER-эффекта и методы его минимизации при изготовлении ИС 597

Схемотехника и проектирование

Чаплыгин Ю. А., Красюков А. Ю., Крупкина Т. Ю., Балашов А. Г., Лосев В. В. Разработка отечественной САПР приборно-технологического моделирования для микроэлектронных технологий 607

Электронное машиностроение

Переверзев А. Л., Петров В. Ф., Петров О. В., Симонов С. Б., Терентьев А. И. Системы автоматизированного управления технологическим оборудованием в электронном машиностроении 618

Интегральные радиоэлектронные устройства

Переверзев А. Л., Лялин К. С., Цветков В. К., Мелёшин Ю. М., Козлов В. А., Кузьмин И. А. Методы построения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов 628

Биомедицинская электроника

Гаврилов С. А., Герасименко А. Ю., Данилов А. А., Нездоровин О. В., Нездоровина В. Г., Нестеренко И. В., Переверзев А. Л., Пожар К. В., Рябкин Д. И., Селищев С. В. Нейроинтерфейсы живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг 641

Информационно-коммуникационные технологии

Соколова Т. Ю., Кулагин Б. Ю. Виртуальное прототипирование интерактивных симуляторов сложного оборудования и высокотехнологичных процессов микроэлектроники 657

Бахтин А. А., Волков А. С., Муратчаев С. С. Разработка алгоритма межуровневого взаимодействия в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET 667

К сведению авторов 675

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
The scientifical and technical journal
Volume 30, No. 5, 2025
September – October
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
Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Physics of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., NRC "Kurchatov Institute" (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
Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4563-9831
Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., President of RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2441-7455
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
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company "Synopsys Armenia" (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2025
© MIET, 2025

Roman V. Meshcheryakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1129-8434
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. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
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., Moscow Institute of Physics and Technology (Dolgoprudny, Russia), 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
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC "Technological Centre" (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
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.***
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, **website:** http://ivuz-e.ru

Publisher's and printery addresses: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET.

Signed to print 13.10.2025. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 17,205. Number of copies 200. Order no. 6. 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 specialties:

1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)
2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)
2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering Sciences)
2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)
2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)
2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)

The journal is included into the Russian Science Citation Index, 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-Service" – 38934.
The subscription index in catalogue "Periodicals. Newspapers and magazines" LLC "Ural-Press Okrug" – 47570.

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

CONTENTS

MIET celebrates 60 years! 537

Fundamental researches

Veriuzhskii I. V., Prihodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. Pulsed laser deposition and electron microscopy study of heterostructure based on Heusler CoFeMnSi alloy and cobalt 543

Electronics materials

Anikin A. V., Gromov D. G., Lebedev E. A., Borgardt N. I., Volkov R. L., Lavrov I. V., Silibin M. V., Dubkov S. V., Vigdorovich E. N., Pavlikov A. V., Komlenok M. S., Kurochitsky N. D., Gromov V. D., Ryazanov R. M., Krokhan N. V., Sharipov R. A., Novikova O. V., Gavrilov S. A., Podorozhniy O. V. Investigation of the formation process and stability of Mo-Si and Ta-Si based phase-shifting layers for photomasks under DUV with 248 nm wavelength exposure 552

Borisov A. G., Vertyanov D. V., Ilyasheva E. V., Osipenkova N. G., Timoshenkov S. P. Features of the properties of polymer composites based on a nanosized dispersed phase 566

Nazarkina Yu. V., Shitova D. D., Dronov A. A., Eganova E. M. Research on effect of hydrodynamic conditions during anodic tungsten oxide formation on its morphology and photocatalytic properties 575

Technological processes

Gagarina L. G., Shevnina Yu. S., Semenov M. Yu., Tsarapkin S. F., Minakov E. I. Predictive models of microelectronics manufacturing processes with account for stochastic factors 586

Kulpinov M. S., Putrya M. G., Golishnikov A. A., Balashov A. G. Causes of LER effect occurrence and methods for its minimization in IC manufacturing 597

Circuit engineering and design

Chaplygin Yu. A., Krasukov A. Yu., Krupkina T. Yu., Balashov A. G., Losev V. V. Development of domestic CAD system for instrument-technological modeling for microelectronic technologies 607

Electronic engineering

Pereverzev A. L., Petrov V. F., Petrov O. V., Simonov S. B., Terentyev A. I. Automated control systems for technological equipment in electronic engineering 618

Integrated radioelectronic devices

Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Tsvetkov V. K., Meleshin Yu. M., Kozlov V. A., Kuzmin I. A. Methods for constructing satellite radars with synthetic aperture for small spacecrafts 628

Biomedical electronics

Gavrilov S. A., Gerasimenko A. Yu., Danilov A. A., Nezdorovin O. V., Nezdorovina V. G., Nesterenko I. V., Pereverzev A. L., Pozhar K. V., Ryabkin D. I., Selishchev S. V. Neurointerfaces in bio-technical systems for the regulation of pain signal transmission to the brain 641

Information-communication technologies

Sokolova T. Yu., Kulagin B. Yu. Virtual prototyping of interactive simulators of complex equipment and high-tech microelectronics processes 657

Bakhtin A. A., Volkov A. S., Muratchaev S. S. Development of an algorithm for inter-layer interaction in decentralized self-organizing MANETs 667

Instructions for authors 675

Уважаемые читатели!

Настоящий номер журнала подготовлен к 60-летию МИЭТ. Журнал предоставил свои страницы специалистам МИЭТ и нашим коллегам – ученым в области электронной техники – из других вузов и организаций. В работах охвачен широкий спектр научно-технических задач, решаемых в различных направлениях развития электроники.

В журнале, в частности, отражены результаты исследований в области материаловедения, технологий микроэлектроники и интеллектуальных систем управления. Особое внимание уделено новым методам разработки и анализа перспективных материалов для создания современных электронных устройств. Рассмотрены инновационные технологии для космической аппаратуры и автоматизации машиностроения, вопросы проектирования электронной компонентной базы. Освещена актуальная тема биомедицинской электроники – создание имплантируемого нейростимулятора с биологической обратной связью. Информационно-телекоммуникационные технологии представлены статьями по виртуальному прототипированию интерактивных симуляторов сложного оборудования и созданию алгоритма взаимодействия в децентрализованных самоорганизующихся сетях.

Надеюсь, что этот номер журнала окажется полезным для вас и вдохновит на новые исследования и открытия, которые будут способствовать технологической независимости страны.

Главный редактор
академик РАН Ю. А. Чаплыгин







Архитектурно-художественная композиция в первом корпусе МИЭТ
«Становление человека разумного» Эрнста Неизвестного

МИЭТ – 60 лет!

МИЭТ сегодня – ведущий технический вуз России в области высоких технологий.

МИЭТ – лидер по подготовке специалистов в области микро- и наноэлектроники, телекоммуникаций и информационных технологий. Высокий профессионализм научно-педагогических работников, обеспеченность аудиторного фонда и учебно-лабораторной базы современным оборудованием и техническими средствами позволяют использовать новейшие образовательные методики и технологии, успешно применять компьютерные информационные системы организации, управления и поддержки учебного процесса.

МИЭТ – мощная наука, реализующая научно-исследовательские проекты, в том числе междисциплинарные, связанные с передовыми научными направлениями, и опытно-конструкторские работы в интересах индустриальных партнеров с последующим производством продукции.

МИЭТ – развитый инновационный комплекс с офисными, лабораторными и производственными объектами, на площадях которых размещены инновационные компании, созданные по инициативе МИЭТ, а также центры коллективного пользования и проектирования для осуществления полного цикла создания изделий электроники – от прикладных научных исследований до производства.

МИЭТ – участник ключевых национальных проектов и программ, в рамках реализации которых формируются новые компетенции, позволяющие на высоком уровне решать задачи подготовки кадров и создавать высокотехнологичную продукцию в интересах микроэлектронной отрасли.

МИЭТ – 60 лет! Достигнутый уровень научно-образовательной и инновационной деятельности стал возможен благодаря многолетнему самоотверженному труду тысяч сотрудников разных поколений и поддержке государства.

Решение о создании и начале деятельности МИЭТ определено документами высших органов государственной власти – Постановлением Совета Министров СССР от 26 ноября 1965 г., приказами министра высшего и среднего специального образования СССР В. П. Елютина и министра высшего и среднего специального образования РСФСР В. Н. Столетова от 9 декабря 1965 г.

Принятие распорядительных документов вышестоящих образовательных ведомств значительно ускорило выполнение программы строительства и оснащения МИЭТ. Так, в приказах Минвуза СССР и Минвуза РСФСР были обозначены конкретные поручения с исполнением в короткие сроки, касающиеся вопросов разработки заданий на проектирование, набора кадров, начала занятий в следующем учебном году и открытия аспирантуры.

В мае 1966 г. в МИЭТ был объявлен первый набор студентов. В июле коллегия Минвуза РСФСР заслушала сообщение исполняющего обязанности ректора МИЭТ Р. А. Волкова о готовности вуза к началу первого учебного года. На тот момент конкурс среди абитуриентов составлял 10 человек на место. В институт были зачислены первые 250 студентов. Учебный год в МИЭТ начался, как и планировалось, 1 сентября 1966 г.

Опыт преподавания в разных вузах, а также опыт работы преподавателей в промышленности, их активное участие в научных исследованиях позволили в короткие сроки создать новые образовательные программы, учебные планы, учебники и пособия для обучения микроэлектронике – наукоемкой и междисциплинарной по своей природе области электронной техники. Преподавателей – людей с разным жизненным опытом, но всегда инициативных, энергичных – надо было сплотить общими целями и стратегией развития вуза. С этой задачей блестяще справились ректор МИЭТ доктор технических наук, профессор Л. Н. Преснухин (член-корреспондент АН СССР с 1984 г., член-корреспондент РАН с 1991 г.) и его ближайший помощник – проректор по учебной работе доктор технических наук, профессор А. А. Сазонов. Многие из разработок МИЭТ по организации учебного процесса были одоб-

рены коллегией Минвуза СССР и рекомендованы для внедрения в других вузах.

Весной 1967 г. в г. Зеленограде началось строительство основного комплекса зданий вуза, первый корпус которого был сдан в эксплуатацию в 1969 г. На торжествах, посвященных открытию первого корпуса МИЭТ, в декабре 1971 г. присутствовали министр Минэлектронпрома СССР А. И. Шокин и министр Минвуза СССР В. П. Елютин. С 1971 г. вуз работает в комплексе зданий, спроектированных группой архитекторов под руководством Ф. А. Новикова (мастерская архитектора И. А. Покровского) и построенных зеленоградскими строителями. Украшением первого корпуса МИЭТ стала архитектурно-художественная композиция Эрнста Неизвестного «Становление человека разумного» площадью более 960 м^2.

1972 г. можно считать годом окончания формирования учебно-научно-производственного комплекса МИЭТ. К тому времени было полностью завершено формирование базовой учебной структуры МИЭТ – факультетов и кафедр, разработаны образовательные программы и учебные планы по всем направлениям подготовки специалистов. В марте 1972 г. состоялся первый выпуск студентов основного набора 1966 г., в августе того же года на первый курс дневного и вечернего обучения было принято 625 человек. Таким образом, МИЭТ достиг запланированных показателей и состоявшийся первый выпуск инженеров с дипломом МИЭТ стал тому реальным подтверждением.

Особенности построения учебного процесса, взаимосвязь с научными и промышленными предприятиями г. Зеленограда позволили МИЭТ быстро включиться в научно-исследовательскую деятельность. В 1972 г. совместным приказом Минвуза СССР и Миноборонпрома СССР в МИЭТ была создана первая отраслевая научно-исследова-тельская лаборатория вычислительных средств и систем управления. В дальнейшем такие лаборатории были организованы совместно с Минэлектронпромом СССР и другими министерствами. Всего в МИЭТ было создано 14 отраслевых лабораторий, на долю которых приходилось более 90 % общего объема научных исследований вуза. Такая система организации науки требовала завершения научных исследований конкретными результатами при значительном сокращении сроков внедрения разработок в промышленность. Поэтому к 1973 г., когда МИЭТ уже был готов к передаче в серийное производство опытных образцов по ряду разработок, назрела необходимость создания собственной производственной базы. Приказом Минвуза СССР был организован экспериментальный завод «Протон» МИЭТ.

За 18 лет развития при государственной поддержке МИЭТ добился значительных успехов не только как учреждение высшего профессионального образования, но и как крупный научный центр. С учетом достижений в организации учебного процесса и научной деятельности Постановлением Совета Министров СССР от 6 апреля 1978 г. № 271 МИЭТ был включен в число ведущих вузов страны. На базе научно-исследовательского сектора в институте была образована научно-исследовательская часть со статусом научного учреждения. В марте 1984 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР МИЭТ был награжден орденом Трудового Красного Знамени, а большая группа сотрудников института – государственными наградами.

В 1986 г. были выполнены проектные работы и начато строительство специального научно-лабораторного корпуса МИЭТ. Эта работа шла под руководством Минэлектронпром СССР. С вводом в эксплуатацию в 1988 г. этого корпуса МИЭТ стал единственным в составе Минвуза СССР учебным учреждением, располагающим собственной современной научно-лабораторной и производственной базой – уникальным технологическим модулем микроэлектроники, отвечающим необходимым требованиям к классу и параметрам специальных помещений. Для проведения на базе этого модуля научных исследований и учебных занятий по технологическим направлениям микроэлектроники в том же году в МИЭТ было создано новое структурное подразделение – Научно-производственный комплекс «Технологический центр».

С 1988 по 1998 гг. в условиях глобальных политических и экономических изменений в стране МИЭТ возглавлял доктор физико-математических наук, профессор В. Д. Вернер. Команда ректората под его



Лабораторный практикум по проектированию чистых помещений в Институте перспективных материалов и технологий МИЭТ



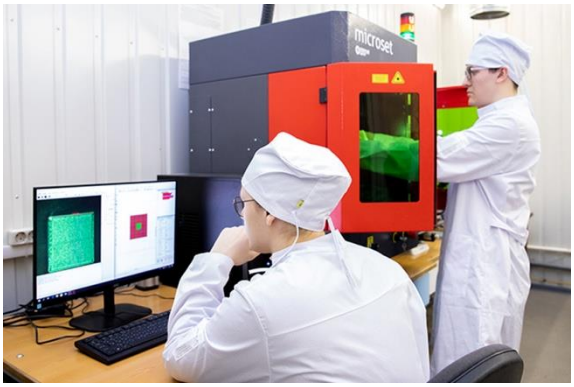
Работа с высокочастотным измерительным оборудованием в лаборатории Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина МИЭТ



Лекция по анатомии в Институте биомедицинских систем МИЭТ



Практические занятия в учебной лаборатории по проектированию интегральных схем Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева МИЭТ



Выполнение технологической операции с помощью системы позиционирования прецизионной лазерной микрообработки материалов в Институте нано- и микросистемной техники МИЭТ



Соревнования программистов и маркетологов с участием студентов Института системной и программной инженерии и информационных технологий МИЭТ

мудрым руководством смогла сохранить ведущие позиции МИЭТ среди вузов России. В 1990-е гг. резко сократилось финансирование как учебного процесса, так и научных исследований. На изменившемся рынке труда наибольшим спросом стали пользоваться специалисты, обслуживающие бизнес, поэтому было принято решение расширить перечень специальностей, по которым организовывалось обучение в МИЭТ. Для этого в вузе был создан экономико-гуманитарный факультет, выпускающий инженеров-экономистов, и организованы платные курсы по изучению английского языка. В МИЭТ были введены и новые технические направления обучения, например по биомедицинским приборам и системам.

В 1994 г. МИЭТ приступил к внедрению кардинального нововведения в системе российского образования – Государственного образовательного стандарта (ГОС) высшей школы, устанавливающего многоуровневую структуру высшего образования. В связи с введением в стране системы государственной аттестации и аккредитации вузов МИЭТ в 1996 г. подтвердил статус технического университета. В 1998 г. в университете началась активная перестройка структуры и учебного процесса, связанная с расширением спектра программ подготовки специалистов и внедрением новых ГОС. При этом МИЭТ сохранил свой основной статус технического университета, развивая новые направления подготовки специалистов в области высоких технологий.

С начала 1990-х гг. МИЭТ стал активно заниматься инновационной деятельностью, в которой быстро занял лидирующие позиции. В 1991 г. был создан Зеленоградский научно-технологический парк (ЗНТП) под учредительством МИЭТ. Первоначальную задачу – оказание содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере – ЗНТП выполнил уже в первые годы своего существования, приняв участие в создании и становлении более чем двух десятков малых высокотехнологичных компаний.

С начала 2000-х гг. под руководством ректора МИЭТ доктора технических наук, профессора Ю. А. Чаплыгина (академик РАН с 2016 г.) стал развиваться инновационный комплекс МИЭТ. В 1998 г. на базе МИЭТ был создан и в 2000 г. размещен в новом корпусе Зеленоградский инновационно-технологический центр (ОАО «ЗИТЦ»). В 2001 г. при поддержке Государственного фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Минобразования России и префектуры Зеленоградского АО г. Москвы был принят к реализации проект создания первой в России Технологической деревни площадью 18 тыс. м^2 – новой современной научно-производственной структуры, позволяющей обеспечить участников инновационной деятельности научно-производственной базой и комплексом необходимых услуг для успешного создания, производства и продвижения на зарубежный рынок конкурентоспособной научно-технической продукции электроники и микроэлектроники. В 2005 г. первая очередь проекта Технологической деревни МИЭТ была введена в эксплуатацию.

Деятельность МИЭТ в качестве технического университета получила высокую оценку государства и общественности. Так, 8 февраля 2000 г., в День российской науки, МИЭТ посетил исполняющий обязанности Президента Российской Федерации В. В. Путин, который принял участие в открытии ОАО «ЗИТЦ». В 2002 г. группа ученых вуза (впервые как коллектив МИЭТ) в составе А. С. Басаева, В. Д. Вернера, С. В. Гаврилова, А. И. Галушкова, А. Н. Денисова, В. В. Ермака, В. В. Коняхина, Е. В. Кузнецова, А. Н. Саурова, Ю. А. Чаплыгина, Н. А. Шелепина удостоена премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за цикл работ по созданию элементной базы для радиоэлектронной аппаратуры нового поколения. В 2003 г. ректор МИЭТ Ю. А. Чаплыгин избран членом-корреспондентом РАН. Впервые профессора университета Ю. П. Анискин и Н. К. Моисеева в 2004 г. удостоены премии Правительства Российской Федерации в области образования за комплексное исследование «Инновационная модель и система опережающей подготовки специалистов для конкурентоспособного развития России в XXI веке». В 2005 г. ученые и профессора МИЭТ впервые получили премию Президента Российской Федерации в области образования: В. А. Бархоткин, В. А. Беспалов, Ю. А. Чаплыгин – за научно-

практическую разработку «Университетский учебно-научный производственный комплекс как основа развития образования, экономики и социальной сферы региона»; Ю. В. Копаев – за работу для образовательных учреждений высшего профессионального образования «Учебно-научный центр “Фундаментальная оптика и спектроскопия” – комплекс подготовки кадров высшей квалификации, новых научных и образовательных технологий».

Наличие в МИЭТ мощной инновационной структуры стало решающим фактором для того, чтобы в создаваемой с 2005 г. в соответствии с решением Правительства Российской Федерации Особой экономической зоне (ОЭЗ) технико-внедренческого типа «Зеленоград» одна из площадок располагалась на территории Инновационного комплекса МИЭТ на площади 5,15 га.

В 2006 г. МИЭТ в составе первой группы из 17 российских вузов, внедряющих инновационные образовательные программы (ИОП), стал победителем конкурса в рамках национального проекта «Образование». В ходе реализации в 2006–2007 гг. ИОП МИЭТ «Современное профессиональное образование для российской инновационной системы в области электроники» разработана и внедрена инновационная система высшего профессионального образования в области электроники, обеспечивающая решение текущих и стратегических задач подготовки высококвалифицированных кадров для российских предприятий радиоэлектронной промышленности, научных и образовательных учреждений. В результате реализации программы к 2008 г. в университете фактически завершено формирование отраслевого кластера электроники – совокупности самостоятельных научных, образовательных, производственных и инновационных структур. НПК «Технологический центр», АО «Завод ПРОТОН», АО «ЗИТЦ» становятся ядром инновационного комплекса.

В 2010 г. при участии МИЭТ, АО «ЗИТЦ» и корпорации «Роснано» для формирования и развития технологических стартапов в области нано- и микроэлектроники создан Зеленоградский нанотехнологический центр (АО «ЗНТЦ»), который расположен на площадке «МИЭТ» ОЭЗ «Технополис Москва».

Высокий уровень развития инновационной структуры, масштабы и содержание выполняемых комплексных инновационных проектов определили фактическое соответствие МИЭТ основным критериям национального исследовательского университета, сформулированным Минобразования России. В апреле 2010 г. МИЭТ стал победителем в конкурсе программ развития университетов, распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.05.2010 г. № 812-р Московскому государственному институту электронной техники (техническому университету) присвоена категория «Национальный исследовательский университет».

В 2011 г. проведена НИОКР по разработке технологий создания имплантируемого насоса крови, на основе которого создан первый отечественный носимый аппарат вспомогательного кровообращения АВК-Н «Спутник» для замены транспортной функции левого желудочка у больных с тяжелыми формами сердечной недостаточности. К настоящему времени в медицинских центрах России проведены десятки успешных операций по имплантации аппарата.

В 2015 г. по инициативе МИЭТ была создана Ассоциация вузов, осуществляющих подготовку кадров в области электронной компонентной базы (Ассоциация вузов ЭКБ). Ее учредителями стали 14 отечественных университетов, реализующих образовательные программы по электронике и микроэлектронике. В настоящее время в Ассоциацию входят 44 организации, из которых 37 – отечественные университеты, 5 – научные организации, 2 – коммерческие компании. Совет Ассоциации регулярно проводит научные семинары, конференции и выставки, где обсуждаются проблемы подготовки кадров. Ассоциация взаимодействует с ведомствами, предприятиями и профессиональными сообществами, поддерживает проекты, направленные на повышение качества обучения на всех уровнях высшего образования.

В 2016 г. ректором МИЭТ избран доктор технических наук, профессор В. А. Беспалов (член-корреспондент РАН с 2022 г.). По его инициативе началась реструктуризация факультетов в институты. В это время МИЭТ становится участником крупнейших государственных программ Минобрнауки России.

В 2018 г. Конкурсная комиссия Минобрнауки России объявила МИЭТ победителем конкурса Национальной технологической инициативы по направлению сквозной технологии «Технологии сенсорики». 20 декабря того же года в МИЭТ был открыт Центр компетенций Национальной технологической инициативы по сквозной технологии «Сенсорика».

Согласно стратегии современного международного университета нового поколения в 2020 г. на базе МИЭТ учреждено АО «Международный научно-технологический центр», в рамках которого сформирован научно-учебный и опытно-производственный кластер с целью дальнейшего развития как национальной, так и межуниверситетской научно-образовательной кооперации в области электроники. В 2024 г. началась работа по созданию маршрутов базового уровня для проектирования цифровых СБИС на основе библиотек стандартных ячеек, ПЛИС и БМК. В работе задействованы и преподаватели, и студенты – стажеры специализированных научных лабораторий МИЭТ.

Для обеспечения промышленных предприятий квалифицированными специалистами в 2023 г. на базе МИЭТ по решению Совета по развитию электронной промышленности Минпромторга России создан Координационный центр «Кадровое обеспечение микроэлектроники», который в настоящее время играет ключевую роль в системном прогнозировании кадровых потребностей отрасли.

В 2024 г. с целью подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для электронной промышленности во взаимодействии с профильными высокотехнологичными компаниями, а также создания научно-технического задела для развития критически важных технологий проектирования и производства электронной компонентной базы в МИЭТ создан Институт «Передовая инженерная школа “Средства проектирования и производства электронной компонентной базы”».

На сегодняшний день, благодаря стратегической государственной поддержке, в частности программе «Приоритет 2030» (с 2021 г.), проекту «Передовые инженерные школы» (с 2024 г.), тесной интеграции с высокотехнологичными компаниями и активной модернизации образовательных программ, МИЭТ демонстрирует уверенный рост интереса абитуриентов. Об этом свидетельствуют ключевые показатели, такие как стабильно высокий средний балл ЕГЭ зачисленных, большой спрос на новые инженерные профили Передовой инженерной школы МИЭТ, где готовят специалистов для критически важных областей – электронное машиностроение и разработка САПР для микроэлектроники.

В МИЭТ реализуются стратегические технологические проекты, направленные на достижение технологического лидерства страны в таких областях, как доверенная микроэлектроника, имплантируемые медицинские приборы, технологии дистанционного зондирования Земли и управления беспилотными системами, а также в сфере широкополосного доступа в Интернет. МИЭТ совместно с индустриальными партнерами АО «НИИМЭ», АО «Микрон», НПК «Технологический центр», ООО «КНС Групп», АО «МНТЦ», ООО «НМ-Тех», ООО «Бюро 1440», ГК «Роскосмос», АО «Завод ПРОТОН», АО «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева», ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» реализует комплексную программу мероприятий, направленную на подготовку кадров, развитие компетенций и технологий, разработку и коммерциализацию продуктов. Перспективные продукты: технологии энергоэффективной и доверенной ЭКБ, нейростимулятор спинного мозга, имплантируемые системы гемодиализа, система спутникового скоростного доступа в Интернет, сервис доступа и аналитики данных систем дистанционного зондирования Земли. Реализация стратегических проектов и инициатив позволит университету стать высокотехнологичной площадкой для опережающей подготовки кадров, распространения знаний и создания технологий микроэлектроники и информационных технологий.

За 60 лет деятельности в МИЭТ сформирован прочный фундамент для стратегического развития, направленного на научное, образовательное и технологическое лидерство. К 2030 г. университет должен стать глобальной, открытой площадкой для притяжения талантливой молодежи, генерации и трансфера знаний и технологий, а также передовым научно-образовательным центром, создающим перспективный задел для технологического лидерства страны.

Ректор МИЭТ
доктор технических наук,
профессор С. А. Гаврилов

Научная статья
УДК 620.3:548.5
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-543-551
EDN: XTOSWE

Импульсное лазерное осаждение и исследование методами электронной микроскопии гетероструктуры на основе сплава Гейслера CoFeMnSi и кобальта

И. В. Верюжский**, *А. С. Приходько, Ф. А. Усков, Ю. Е. Григорашвили, Н. И. Боргардт

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

* *vervan2005@mail.ru*

Аннотация. Четверные сплавы Гейслера CoFeMnSi (CFMS) относятся к спиновым бесщелевым полупроводникам. CFMS обладают близкой к 100 % спиновой поляризацией носителей заряда и являются перспективными материалами для создания современных устройств спинтроники. В таких устройствах кобальт и его сплавы широко применяются для формирования ферромагнитных слоев. Одновременное использование данных материалов для изготовления магнитных туннельных переходов может значительно повысить эффект туннельного магнитного сопротивления, что обусловливает необходимость создания технологии изготовления многослойных структур на их основе. В работе рассмотрен метод импульсного лазерного осаждения для выращивания гетероструктуры на основе пленки CFMS и слоя кобальта на подложке MgO(100). Электронно-микроскопические исследования образцов поперечного сечения показали, что полученные слои CFMS и кобальта имеют совершенную кристаллическую структуру, при этом в слое кобальта обнаружено содержание атомов железа. Установлено, что толщина пленки CFMS примерно 10 нм, слоя Co/Fe 2 нм и между ними образуется атомарно-гладкая граница. Это свидетельствует о реализации эпитаксиального роста верхнего слоя гетероструктуры. В области границы раздела между подложкой MgO и пленкой CFMS, протяженность которой в перпендикулярном поверхности подложки направлении около 1 нм, выявлено обеднение атомами CFMS. Наличие железа в верхнем слое и образование обедненной атомами области на границе между пленкой CFMS и подложкой MgO обусловливает необходимость дальнейшей оптимизации метода импульсного лазерного осаждения для формирования гетероструктур.

© И. В. Верюжский, А. С. Приходько, Ф. А. Усков, Ю. Е. Григорашвили, Н. И Боргардт, 2025

Ключевые слова: магнитный туннельный переход, гетероструктуры, бесщелевой полупроводник, спинтроника, тонкие пленки, лазерное осаждение, эпитаксия, монокристалл, спиновый бесщелевой полупроводник, сплав CoFeMnSi

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2024-0004) с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов».

Для цитирования: Верюжский И. В., Приходько А. С., Усков Ф. А., Григорашвили Ю. Е., Боргардт Н. И. Импульсное лазерное осаждение и исследование методами электронной микроскопии гетероструктуры на основе сплава Гейслера CoFeMnSi и кобальта. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):543–551. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-543-551. EDN: XTOSWE.

Original article

Pulsed laser deposition and electron microscopy study of heterostructure based on Heusler CoFeMnSi alloy and cobalt

I. V. Veriuzhskii**, A. S. Prihodko, F. A. Uskov, Yu. E. Grigorashvili, N. I. Borgardt

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *vervan2005@mail.ru*

Abstract. Quaternary Heusler alloys CoFeMnSi (CFMS) pertain to spin gapless semiconductors. CFMS have close to 100 % spin polarization of charge carriers and are promising materials for creating modern spintronic devices. Cobalt and its alloys are widely used to form ferromagnetic layers in such devices. The combined use of these materials for the manufacture of magnetic tunnel junctions can significantly increase the effect of tunnel magnetic resistance, which necessitates the creation of a technology for the manufacture of multilayer structures based on them. In this work, the pulsed laser deposition method used to grow a heterostructure based on a CFMS film and a Co layer on an MgO(100) substrate is considered. Electron microscopic studies of cross-sectional samples showed that the obtained CFMS and Co layers have a perfect crystalline structure, while the Co layer was found to contain Fe atoms. It has been established that the thickness of the CFMS film was approximately 10 nm, and the Co/Fe layer was 2 nm, and an atomically smooth boundary was formed between them. It indicates the implementation of epitaxial growth of the upper layer of the heterostructure. In the region of the interface between the MgO substrate and the CFMS film, the length of which in the direction perpendicular to the substrate surface is about 1 nm, depletion of CFMS atoms was revealed. The presence of iron in the upper layer and the formation of an atom-depleted region at the boundary between the CFMS film and the MgO substrate condition further optimization of the pulsed laser deposition method for forming heterostructures.

Keywords: magnetic tunnel junction, heterostructures, gapless semiconductor, spintronics, thin films, laser deposition, epitaxy, single crystal, spin gapless semiconductor, CoFeMnSi alloy

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the state assignment (Agreement FSMR-2024-0004) using the equipment of the Collective Use Center “Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjects”.

For citation: Veriuzhskii I. V., Prihodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. Pulsed laser deposition and electron microscopy study of heterostructure based on Heusler CoFeMnSi alloy and cobalt. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):543–551. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-543-551.

Введение. Многослойные гетероструктуры на основе сплавов Гейслера и ферромагнитных металлов широко применяются для изготовления устройств спинтроники [1–5]. Основной элемент таких устройств – магнитные туннельные переходы (МТП), которые состоят из ферромагнитных слоев, разделенных тонким барьерным слоем изолятора. Для создания МТП с высоким значением туннельного магнетосопротивления необходимо обеспечить 100%-ную спиновую поляризацию носителей тока в магнитных слоях, выбрать материалы для изготовления опорного, свободного и барьерного слоев и использовать технологический процесс, позволяющий получать гетероструктуры, состоящие из последовательно выращенных монокристаллических слоев. На свойства МТП критическое влияние оказывает кристаллическое совершенство слоев, наличие дефектов и примесей. Кроме того, вероятность туннелирования поляризованных носителей заряда зависит от качества границ раздела слоев, их резкости, латеральной гладкости и отсутствия парамагнитной фазы [6].

Перспективными материалами для опорного и свободного слоев являются спиновые бесщелевые полупроводники, сочетающие в себе свойства полуметаллических ферромагнетиков и бесщелевых полупроводников [7, 8]. Один из таких материалов – четверной сплав Гейслера CoFeMnSi (CFMS), который благодаря своей зонной структуре обеспечивает возможность 100%-ной спиновой поляризации и позволяет использовать эффект Холла для разделения спин-поляризованных электронов и дырок [9]. Пленки CFMS характеризуются высокой температурой Кюри $T_C \approx 778$ К и намагниченностью насыщения $M_s \approx 3{,}42$ μ_B/f.u. (μ_B – магнетон Бора, f.u. – формульная единица) [10], которая подчиняется правилу Слэтера – Полинга [11].

Для получения проводящего слоя на поверхности пленок CFMS могут использоваться ферромагнитные металлы и их сплавы, применяемые в устройствах спинтроники. К ним относится кобальт, который является ферромагнитным металлом с относительно высокой спиновой поляризацией носителей заряда и высокой температурой Кюри, достигающей 1388 К [12, 13]. Тонкие пленки кобальта с перпендикулярной магнитной анизотропией могут быть использованы в качестве источника высокополяризованного тока в магнитных запоминающих устройствах [14]. Осаждение слоя кобальта на опорный или свободный слой позволяет изменить их коэрцитивную силу и реализовать антипараллельную намагниченность слоев МТП [15]. Магнитные свойства кобальта в виде слоев наноразмерной толщины зависят от качества его кристаллической структуры [16]. Такое требование обусловливает необходимость получения слоя кобальта на поверхности CFMS с использованием технологического процесса, позволяющего выращивать кристаллически совершенные гетероструктуры CoFeMnSi/Co на подложке без последующего отжига.

В настоящей работе определяются оптимальные параметры процесса последовательного формирования на подложке MgO(100) гетероструктуры CoFeMnSi/Co мето-

дом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Кристаллическое совершенство каждого из ее слоев во время роста оценивается методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Детальные исследования структуры выращенных слоев и определение их химического состава проводятся с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Эксперимент и методы исследования. Для изготовления гетероструктуры CoFeMnSi/Co использовали установку ИЛО и две мишени, материал которых последовательно распылялся под воздействием лазерного облучения и осаждался на монокристаллическую подложку MgO(100). Одна из мишеней представляет собой полупроводниковый четверной сплав CFMS с атомарным соотношением Co:Fe:Mn:Si = 1:1:1:1, а вторая – металлический кобальт. Чистота материалов в мишенях составляет 99,9 %.

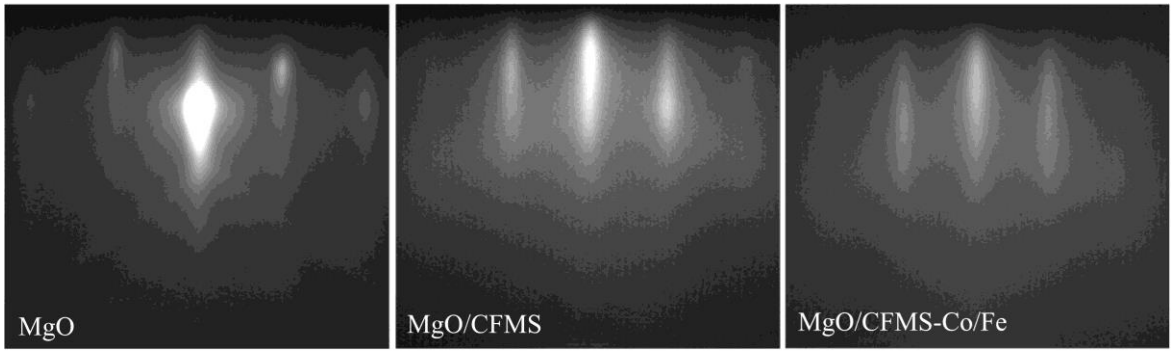
Испарение материала мишени проводили импульсным KrF-лазером с длиной волны излучения 248 нм и длительностью импульса 20 нс. Структуру формируемых слоев в процессе их роста оценивали *in-situ* с помощью ДБЭО-системы. Для контроля состава атмосферы в ростовой камере использовали масс-спектрометр. Измерение температуры осуществляли двумя оптическими пирометрами с обеих сторон подложки. Для равномерности испарения материала облучаемая мишень вращалась со скоростью 10 об./мин с постепенным смещением от ее центра на расстояние 25 мм в пределах диаметра мишени.

Для электронно-микроскопических исследований выращенной гетероструктуры образцы поперечного сечения, параллельного плоскости MgO(001), приготавливали методом *in-situ lift-out* [17] в электронно-ионном микроскопе Helios Nanolab 650. Структурные исследования проводили методами ПЭМ с помощью микроскопа FEI Titan Themis 200 с корректором сферической аберрации в режиме получения изображений при ускоряющем напряжении 200 кВ. Состав сформированных слоев определяли в режиме просвечивающей растровой электронной микроскопии методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

Осаждение слоев для формирования гетероструктур в установке ИЛО выполняли в едином технологическом процессе в две стадии. На первой стадии выращивали пленку CFMS на поверхности подложки MgO(100). На второй стадии на поверхность выращенной пленки CFMS осаждали слой кобальта. Размеры используемых подложек MgO(100) 10 × 10 мм, толщина 0,5 мм. Подложки имеют одностороннюю полировку со средними размерами шероховатости поверхности менее 0,5 нм.

Мишени CFMS, кобальта и подложки MgO(100) устанавливали в ростовую камеру через камеру загрузки, использование которой позволяет сохранять постоянный уровень вакуума в ростовой камере. Выбор и смена мишени в процессе роста одного из слоев осуществлялись автоматически по заданному программному алгоритму с помощью механизма револьверного типа, конструкция которого рассчитана на размещение и использование до шести мишеней. Перед процессом формирования каждого слоя проводили «тренировку» мишеней, т. е. предварительное осаждение материала мишеней на закрытую заслонку. При этом образовавшиеся при облучении частицы не достигали подложки. Для испарения материала мишени на них воздействовали лазерными импульсами с частотой 1 Гц в количестве 3000.

Перед выращиванием пленки CFMS подложку MgO(100) нагревали до температуры 1000 ºС и выдерживали 3 ч в атмосфере кислорода при давлении в камере 10^{-2} Па. Далее ее охлаждали со скоростью 5 ºС/мин до температуры 650 ºС и выдерживали при данной температуре 1 ч. Кристаллическое состояние приповерхностной области подложки оценивали по рефлексам на ДБЭО-картинах (рис. 1, *а*). Пленки CFMS выраща-



а ***б*** ***в***

Рис. 1. ДБЭО-картины на этапах формирования гетероструктуры CoFeMnSi/Co:
а – подложка MgO(100); *б* – пленка CoFeMnSi; *в* – слой кобальта
Fig. 1. Reflection high-energy electron diffraction patterns at the stages of formation of the CoFeMnSi/Co heterostructure: *a* – MgO(100) substrate; *b* – CoFeMnSi film; *c* – Co layer

вали на подготовленной подложке MgO(100) при остаточном давлении в ростовой камере 10^{-5} Па. Энергию лазерного импульса устанавливали равной 150 мДж, расстояние мишень – подложка составляло 55 мм. Общее количество лазерных импульсов, облучающих мишень CFMS, варьировали от 15 до 20 тыс. на частоте 0,5 Гц, при этом после каждых 65 импульсов делали паузы длительностью не более 2 мин. Выбор параметров и режимов роста пленки CFMS на подложке MgO(100) методом ИЛО определяли с учетом результатов исследований, представленных в работах [18, 19]. В результате была сформирована однородная пленка с монокристаллической структурой, что подтверждается непрерывными тяжами на ДБЭО-картине (рис. 1, *б*).

После изготовления гетероструктуры на поверхность пленки CFMS сразу осаждали слой кобальта при температуре 650 ºС. Энергию импульса лазерного излучения не изменяли (150 мДж), а частоту увеличивали до 1 Гц. Количество импульсов, облучающих мишень кобальта, 5000, временные паузы после каждых 65 импульсов не превышали 2 мин. Полученные рефлексы от слоя кобальта на картине ДБЭО (рис. 1, *в*) указывают на сохранение непрерывных тяжей в процессе его роста на поверхности CFMS. Наличие тяжей свидетельствует в первую очередь о сохранении режима послойного роста для выращиваемого слоя на поверхности CFMS и формировании сплошной пленки с монокристаллической структурой.

Результаты и их обсуждение. Высокоразрешающие ПЭМ-микрофотографии поперечного сечения электронно-микроскопического образца (рис. 2, *а*) наглядно показывают, что выращенные пленка CFMS и слой кобальта являются сплошными и атомарно гладкими с толщиной примерно 10 и 2 нм соответственно. Увеличенный фрагмент изображения пленки CFMS в области А (рис. 2, *б*) визуализирует ее совершенную кристаллическую структуру. На рис. 2, *г* (увеличенная область Б) видны различия в распределениях интенсивностей на изображениях пленки CFMS и слоя кобальта. Отсутствие дефектов на границе между ними указывает на хорошее согласование параметров их кристаллических решеток.

На рис. 2, *в* показаны профили концентраций *C* атомов в гетероструктуре, которые вычисляли путем усреднения вдоль границы двумерных карт распределений химических элементов, полученных методом энерегодисперсионного рентгеновского микроанализа. Видно, что в области подложки MgO концентрация атомов магния несколько превышает стехиометрическое значение 50 %. Это может быть связано с артефактным

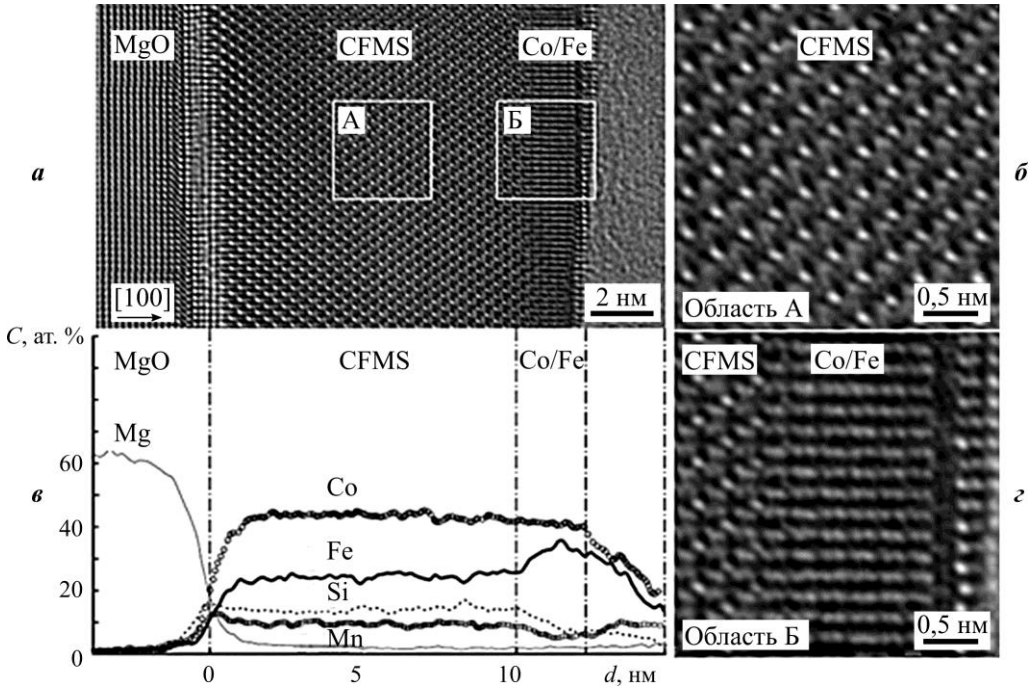


Рис. 2. Высокоразрешающее ПЭМ-микрофотография поперечного сечения гетероструктуры CFMS/Co/Fe на подложке MgO (*а*), увеличенные фрагменты изображения кристаллической структуры пленки CFMS в области А (*б*) и границы раздела между пленкой CFMS и слоем Co/Fe в области Б (*г*), профили концентраций атомов Mg, Co, Fe, Si, Mn в зависимости от расстояния *d* между подложкой MgO и пленкой CFMS (*в*). Штрихпунктирные линии – границы сформированных слоев гетероструктуры

Fig. 2. High-resolution TEM micrograph of the cross-section of the CFMS/Co/Fe heterostructure on the MgO substrate (*a*), enlarged fragments of the image of the crystal structure of the CFMS film in region A (*b*) and the interface between the CFMS film and the Co/Fe layer in region Б (*d*), profiles of the concentrations of Mg, Co, Fe, Si, Mn atoms from the distance *d* from the interface between the MgO substrate and the CFMS film (*c*). The dash-dotted lines show the boundaries of the formed layers of the heterostructure

занижением концентрации сравнительно легких атомов кислорода, возникающим при проведении микроанализа тонкого электронно-микроскопического образца толщиной около 10 нм. На приведенных концентрационных профилях в области границы между MgO и CFMS, протяженность которой составляет примерно 1 нм в перпендикулярном поверхности подложки направлении, выявляется некоторое снижение общего количества атомов. Оно объясняется частичным примыканием выращенной пленки CFMS к поверхности подложки, что непосредственно визуализируется на электронно-микроскопических микрофотографиях больших областей образца, полученных при увеличениях, меньших, чем на рис. 2, *а*. По-видимому, из-за быстрого охлаждения образца после процесса роста происходит локальное отслаивание слоя от подложки вследствие механических напряжений, возникающих на границе раздела из-за различия параметров кристаллических решеток MgO и CFMS. Профили концентрации на рис. 2, *в* также свидетельствуют о том, что, хотя атомарное соотношение Co:Fe:Mn:Si в распыляемой лазерным пучком мишени 1:1:1:1, выращенная пленка состоит примерно из 50 % атомов кобальта, 25 % атомов железа, 15 % атомов кремния и 10 % атомов марганца. Как видно из рис. 2, *в*, слой, осажденный на поверхность CFMS, образован атомами кобальта и железа, причем их суммарная концентрация составляет примерно 80 %. Полученное значение концентрации этих атомов (менее 100 %) обусловлено ма-

лой толщиной выращенного слоя Co/Fe и возбуждением характеристического рентгеновского излучения в приграничных с выращенным слоем областях в процессе микроанализа, а именно в пленке CFMS и защитном эпоксидном покрытии.

Содержание железа в выращенном слое, вероятно, обусловлено наличием остаточных атомов в рабочей камере после воздействия лазерным пучком на мишень CFMS во время осаждения слоя бесщелевого полупроводника. Поскольку слой кобальта осаждали сразу после выращивания пленки CFMS, в которой концентрация атомов кобальта и железа выше, чем концентрация атомов других элементов, можно предположить, что в процессе роста этого слоя остаточные атомы, в основном железа, участвовали в его формировании. По-видимому, для уменьшения влияния остаточных атомов на формируемый слой кобальта необходимо некоторое время выдерживать рабочую камеру под глубоким вакуумом для полного удаления вакуумной системой частиц мишени CFMS, возникших при лазерном облучении. Следует отметить, что пленки Co/Fe применяются в устройствах МТП для формирования буферного слоя, а также для изменения магнитных свойств свободного или опорного слоев МТП [20].

Заключение. Применение методов ИЛО и ПЭМ позволило установить оптимальные параметры выращивания слоев CFMS и Co/Fe на подложке MgO(100) и сформировать на их основе многослойную гетероструктуру с высоким кристаллическим совершенством. Полученные результаты могут быть использованы при создании более сложных гетероструктур методом ИЛО и изготовлении МТП на их основе.

Литература / References

1. Фетисов Ю. К., Сигов А. С. Спинтроника: физические основы и устройства. *РЭНСИТ.* 2018;10(3):343–356. https://doi.org/10.17725/rensit.2018.10.343. EDN: YPXQLJ.
   Fetisov Yu. K., Sigov A. S. Spintronics: Physical foundations and devices. *RENSIT.* 2018;10(3):343–356. https://doi.org/10.17725/rensit.2018.10.343
2. Heinonen O. G., Singleton E. W., Karr B. W., Gao Zh., Hae Seok Cho, Chen Y. Review of the physics of magnetoresistive readers. *IEEE Trans. Magn.* 2008;44(11):2465–2471. https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2002373
3. Slaughter J. M. Materials for magnetoresistive random access memory. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2009;39:277–296. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145355
4. Worledge D. C., Hu G. Spin-transfer torque magnetoresistive random access memory technology status and future directions. *Nat. Rev. Electr. Eng.* 2024;1:730–747. https://doi.org/10.1038/s44287-024-00111-z
5. Wu H., Chen A., Zhang P., He H., Nance J., Guo Ch. et al. Magnetic memory driven by topological insulators. *Nat. Commun.* 2021;12:6251. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26478-3
6. Зюбин А. Ю., Асташенок А. В., Куприянова Г. С. Применение радиофизических методов для диагностики функциональных свойств магнитных туннельных переходов. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта.* 2013;(4):43–51. EDN: QAHLZZ.
   Zubin A., Astashenok A., Kupriyanova G. Application of radio physical methods for diagnostics of functional properties of magnetic tunnel transitions. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta.* 2013;(4):43–51. (In Russ.).
7. Elphick K., Frost W., Samiepour M., Kubota T., Takanashi K., Sukegawa H. et al. Heusler alloys for spintronic devices: Review on recent development and future perspectives. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2021;22(1):235–271. https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1812364
8. Rani D., Bainsla L., Alam A., Suresh K. G. Spin-gapless semiconductors: Fundamental and applied aspects. *J. Appl. Phys.* 2020;128(22):220902. https://doi.org/10.1063/5.0028918
9. Han J., Feng Y., Yao K., Gao G. Y. Spin transport properties based on spin gapless semiconductor CoFeMnSi. *Appl. Phys. Lett.* 2017;111(13):132402. https://doi.org/10.1063/1.4999288
10. Mishra V., Barwal V., Pandey L., Gupta N. K., Hait S., Kumar A. et al. Investigation of spin gapless semiconducting behaviour in quaternary CoFeMnSi Heusler alloy thin films on Si(100). *J. Magn. Magn. Mater.* 2022;547:168837. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168837

11. Tan X., You J., Liu P.-F., Wang Y. Theoretical study of the electronic, magnetic, mechanical and thermodynamic properties of the spin gapless semiconductor CoFeMnSi. *Crystals.* 2019;9(12):678. https://doi.org/10.3390/cryst9120678
12. Crangle J. LIX. The magnetic moments of cobalt-copper alloys. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 1955;46(376):499–513. https://doi.org/10.1080/14786440508520586
13. Schneider C. M., Bressler P., Schuster P., Kirschner J., Miguel J. J. de, Miranda R. Curie temperature of ultrathin films of fcc-cobalt epitaxially grown on atomically flat Cu(100) surfaces. *Phys. Rev. Lett.* 1990;64(9):1059–1062. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.1059
14. Carcia P. F., Zeper W. B. Sputtered Pt/Co multilayers for magneto-optical recording. *IEEE Trans. Magn.* 1990;26(5):1703–1705. https://doi.org/10.1109/20.104498
15. Yuasa S., Nagahama T., Fukushima A., Suzuki Y., Ando K. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. *Nat. Mater.* 2004;3:868–871. https://doi.org/10.1038/nmat1257
16. He C., Masuda K., Song J., Scheike Th., Wen Zh., Miura Y. et al. Nano-crystal domains in Co-based fcc(111) epitaxial magnetic junctions and their impact on tunnel magnetoresistance. *Acta Mater.* 2023;261:119394. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119394
17. Giannuzzi L. A., Stevie F. A. A review of focused ion beam milling techniques for TEM specimen preparation. *Micron.* 1999;30(3):197–204. https://doi.org/10.1016/S0968-4328(99)00005-0
18. Veryuzhskii I. V., Prikhodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. Fabrication of monocrystalline CoFeMnSi Heusler alloy film on MgO substrate. *Tech. Phys. Lett.* 2024;50(11):112–114. https://doi.org/10.61011/TPL.2024.11.59681.20019
19. Veryuzhsky I. V., Prikhodko A. S., Uskov F. A., Grigorashvili Yu. E., Borgardt N. I. On the pulsed laser deposition of single-crystal films of the CoFeMnSi Heusler alloy on a MgO substrate. *Semiconductors.* 2024;58(Suppl1):S1–S6. https://doi.org/10.1134/S1063782625700010
20. Liu H., Kawami T., Moges K., Uemura T., Yamamoto M., Shi F., Voyles P. M. Influence of film composition in quaternary Heusler alloy Co_2(Mn,Fe)Si thin films on tunnelling magnetoresistance of Co_2(Mn,Fe)Si/MgO-based magnetic tunnel junctions. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015;48(16):164001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/16/164001

Информация об авторах

Верюжский Иван Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Сверхпроводниковая микроэлектроника» Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vervan2005@mail.ru

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

Усков Филипп Александрович – аспирант НИЛ «Сверхпроводниковая микроэлектроника» Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), phil1997@inbox.ru

Григорашвили Юрий Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник НИЛ «Сверхпроводниковая микроэлектроника» Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yegrig@rambler.ru

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

Information about the authors

Ivan V. Veriuzhskii – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory "Superconductor Microelectronics", Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vervan2005@mail.ru

Alexander S. Prihodko – Cand. Sci. (Phys.-Math)., Assoc. Prof., Senior Scientific Researcher of the Research Laboratory "Electron Microscopy", Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sashaprixodko@gmail.com

Filip A. Uskov – PhD student of the Research Laboratory "Superconductor Microelectronics", Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), phil1997@inbox.ru

Yury E. Grigorashvili – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory "Superconductor Microelectronics", Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yegrig@rambler.ru

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

Поступила в редакцию / Received 01.04.2025
Поступила после рецензирования / Revised 05.05.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 539.231
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-552-565
EDN: XWQFVN

Исследование процессов формирования и стабильности фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si для фотошаблонов под воздействием глубокого ультрафиолетового излучения с длиной волны 248 нм

А. В. Аникин[1], Д. Г. Громов[1,2*], Е. А. Лебедев[1], Н. И. Боргардт[1], Р. Л. Волков[1], И. В. Лавров[1], М. В. Силибин[1], С. В. Дубков[1], Е. Н. Вигдорович[1], А. В. Павликов[3], М. С. Комленок[4], Н. Д. Курочицкий[4], В. Д. Громов[1], Р. М. Рязанов[1,5], Н. В. Крохан[1], Р. А. Шарипов[1], О. В. Новикова[1], О. В. Подорожний[1], С. А. Гаврилов[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия
[3]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[4]Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[5]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

[*] gromadima@gmail.com

Аннотация. В условиях масштабируемости фотолитографических технологий и перехода к разрешению менее 180 нм возникает необходимость в преодолении дифракционных ограничений, связанных с использованием глубокого ультрафиолетового излучения. Одно из эффективных решений этой проблемы – применение фазосдвигающих фотошаблонов, позволяющих повысить разрешающую способность за счет управления фазой проходящего света. Важным элементом таких фотошаблонов являются фазосдвигающие слои, оптические характеристики и стойкость к глубокому ультрафиолету которых критически влияют на качество элементов, формируемых в резисте. В работе проведен анализ выбранного состава фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si, полученных методом магнетронного распыления в азотсодержащей среде. Определены оптические характеристики, стабильность при воздействии глубокого ультрафиолетового излучения и пригодность данных материалов для использования в

© А. В. Аникин, Д. Г. Громов, Е. А. Лебедев, Н. И. Боргардт, Р. Л. Волков, И. В. Лавров, М. В. Силибин, С. В. Дубков, Е. Н. Вигдорович, А. В. Павликов, М. С. Комленок, Н. Д. Курочицкий, В. Д. Громов, Р. М. Рязанов, Н. В. Крохан, Р. А. Шарипов, О. В. Новикова, О. В. Подорожний, С. А. Гаврилов, 2025

фотолитографии. Изучено влияние концентрации азота в рабочей газовой смеси на состав и свойства образующихся пленок. Измерены показатели преломления, коэффициента экстинкции, пропускания и фазового сдвига сформированных слоев. Проанализирована их радиационная стойкость при облучении KrF-лазером (248 нм). Показано, что слои на основе Mo-Si и Ta-Si незначительно изменяют свои оптические свойства в интервале доз облучения 0–2,5 кДж/см^2. Это делает их пригодными для использования в производстве фотошаблонов. Выявлено, что при повышенных дозах облучения начинается деградация оптических свойств, обусловленная частичным окислением слоев. Проведено моделирование дифракционной картины и дана оценка оптического контраста, достижимого при использовании предложенных материалов в структуре фотошаблона. Моделирование показало, что при использовании полученных фазосдвигающих материалов на основе Mo-Si и Ta-Si можно получить высокий (близкий к 1) оптический контраст для линий и щелей с шагом 120 нм.

Ключевые слова: фазосдвигающие фотошаблоны, магнетронное распыление, глубокое ультрафиолетовое излучение, фотолитография

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2025-0006).

Для цитирования: Аникин А. В., Громов Д. Г., Лебедев Е. А., Боргардт Н. И., Волков Р. Л., Лавров И. В. и др. Исследование процессов формирования и стабильности фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si для фотошаблонов под воздействием глубокого ультрафиолетового излучения с длиной волны 248 нм. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):552–565. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-552-565. EDN: XWQFVN.

Original article

Investigation of the formation process and stability of Mo-Si and Ta-Si based phase-shifting layers for photomasks under DUV with 248 nm wavelength exposure

A. V. Anikin[1], D. G. Gromov[1,2*], E. A. Lebedev[1], N. I. Borgardt[1], R. L. Volkov[1], I. V. Lavrov[1], M. V. Silibin[1], S. V. Dubkov[1], E. N. Vigdorovich[1], A. V. Pavlikov[3], M. S. Komlenok[4], N. D. Kurochitsky[4], V. D. Gromov[1], R. M. Ryazanov[1,5], N. V. Krokhan[1], R. A. Sharipov[1], O. V. Novikova[1], O. V. Podorozhniy[1], S. A. Gavrilov[1]

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia*
[3]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[4]*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[5]*SMC "Technological Centre", Moscow, Russia*

[*] *gromadima@gmail.com*

Abstract. With the continuous scaling of photolithography technologies and the transition to resolutions below 180 nm, it becomes necessary to overcome diffraction limitations related to deep ultraviolet (DUV) radiation usage. One of the most effective solutions to this problem is the application of phase-shifting photomasks, which allow increasing resolution by controlling the phase of transmitted light. A key component of such photomasks is the phase-shifting layer, the optical characteristics and resistance to DUV radiation of which critically affect the quality of the features formed in the resist. In this work, the analysis of selected composition of phase-shifting layers based on Mo-Si and Ta-Si deposited by magnetron sputtering in a nitrogen-containing atmosphere is performed. The optical characteristics of these materials, their stability under DUV exposure, and suitability for photolithography applications were determined. The effect of nitrogen concentration in the process gas mixture on the composition and properties of the resulting films was investigated. The refractive index, extinction coefficient, transmittance, and phase shift of the formed layers were measured. These layers' radiation stability under KrF laser radiation (248 nm) exposure was analyzed. It was demonstrated that layers based on Mo-Si and Ta-Si exhibit minimal changes in their optical properties at irradiation doses from 0 to 2.5 kJ/cm^2. This makes them suitable for use in photomask fabrication. It was found out that at higher irradiation doses, degradation of optical properties starts, which is attributed to partial oxidation of the layers. The diffraction pattern simulation was performed and the optical contrast achievable when using the proposed materials in a photomask structure was evaluated. The simulation has demonstrated that the use of the proposed phase-shifting materials based on Mo-Si and Ta-Si makes it possible to get high optical contrast (close to 1) for 120 nm line and space patterns.

Keywords: phase-shifting photomask, magnetron sputtering, deep ultraviolet exposure, photolithography

Funding: the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment (Agreement FSMR-2025-0006).

For citation: Anikin A. V., Gromov D. G., Lebedev E. A., Borgardt N. I., Volkov R. L., Lavrov I. V. et al. Investigation of the formation process and stability of Mo-Si and Ta-Si based phase-shifting layers for photomasks under DUV with 248 nm wavelength exposure. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):552–565. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-552-565.

Введение. Полутоновые фазосдвигающие фотошаблоны (Embedded Attenuated Phase-Shift Masks, EAPSM), применяемые в фотолитографии, помимо стандартного поглощающего слоя хрома, содержат фазосдвигающий слой, позволяющий не только модулировать амплитуду рабочего излучения, но и изменять его фазу. Это способствует значительному повышению разрешающей способности и увеличению глубины фокуса в проекционной фотолитографии по сравнению с бинарными фотошаблонами (Binary Intensive Mask, BIM) [1]. Основное требование к фазосдвигающему слою фотошаблона – сдвиг фазы световой волны на 180° при прохождении через него, что определяется оптическими свойствами материала и его толщиной. Среди оптических свойств материала важным параметром является пропускание. Расчеты показывают, что высокая прозрачность (до 35 %) позволяет достичь более высокой оптической контрастности

рисунка [2]. Однако на практике при производстве полутоновых фазосдвигающих фотошаблонов прозрачность составляет ~ 6 % [1, 3–5].

В качестве материала для фазосдвигающих слоев в коммерческих фотошаблонных заготовках применяется аморфный материал MoSiN, который по составу соответствует нитриду кремния с добавкой молибдена (в публикациях его, как правило, называют силицидом молибдена) [3–5]. Отметим, что для данных целей изучены CrO, CrOH, $TaSiO_x$, TiSi, композит A1N-CrN, кермет Al-A1N, мультислойные структуры RuO_2/HfO_2 и CrN/A1N [1, 6–8].

TaSiN – диффузионно-барьерный материал. Диффузионные барьеры необходимы для предотвращения нежелательной миграции атомов меди, алюминия, кремния или кислорода между слоями материалов в ИС. Это критично для обеспечения надежности и долговечности электронных устройств. Исследования подтверждают, что TaSiN эффективен благодаря своей аморфной структуре, которая исключает диффузию по границам зерен и обеспечивает высокую термическую и химическую стабильность, а также низкие механические напряжения на границе раздела с медью [9, 10]. Помимо этого, TaSiN с низким содержанием кремния характеризуется хорошей адгезионной прочностью с медью [11]. Таким образом, TaSiN может использоваться как фазосдвигающий материал с высокой радиационной стойкостью к воздействию высокоэнергетического глубокого ультрафиолетового (ГУФ) излучения.

В настоящей работе проводится сравнение оптических характеристик фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si, в частности определяются значения показателя преломления, коэффициента поглощения, фазового сдвига на длине волны 248 нм. Изучается изменение оптических свойств при воздействии ГУФ-излучения лазера с длиной волны 248 нм для оценки стабильности материалов в условиях длительного накопления дозы экспонирующего излучения.

Эксперимент. В качестве подложек использовали кварцевое стекло толщиной 6,35 мм с габаритными размерами 15 × 20 мм. Подложки последовательно отмывали в ацетоне в ультразвуковой ванне, растворе Каро, затем промывали в деионизованной воде и сушили в парах изопропилового спирта. Для определения элементного состава формируемых слоев в качестве подложек использовали титановую фольгу толщиной 30 мкм. Выбор фольги титана в качестве подложки обусловлен упрощением процесса определения состава формируемой пленки, поскольку титан не входит в ее состав, и на фоне сигнала от подложки можно корректно оценивать соотношение компонентов в слое. Титановую фольгу предварительно промывали в ацетоне в ультразвуковой ванне, а для удаления слоя естественного оксида проводили ее травление в растворе HF:HNO3:H2O = 1:2:6. После этого подложки тщательно промывали в деионизованной воде и сушили в парах изопропилового спирта.

Все исследуемые пленки формировали методом магнетронного распыления мишеней в вакууме. Осаждение проводили на установке УРМ-026 при остаточном давлении газа $7 \cdot 10^{-5}$ торр. Подложкодержатели устанавливали на карусели с планетарным вращением. Перед нанесением поверхность подложек подвергали бомбардировке ионами аргона с помощью ионного источника ИИ-4-015 (ионный ток 40 мА, время обработки 120 с). Мишени Mo, Ta и Si распыляли в газовой смеси аргона и азота. Давление аргона в процессе распыления составляло $3 \cdot 10^{-3}$ торр, парциальное давление азота варьировали от 0 до $3 \cdot 10^{-3}$ торр. Процесс распыления контролировали с помощью блоков питания «ИВЭ 141» (ООО «ПлазмаТех»), работающих в режиме стабилизации мощности с возможностью измерения текущих значений напряжения и силы тока.

На начальном этапе изучали влияние режимов одновременного распыления мишеней Ta и Si на скорость осаждения и состав формируемых слоев. Для слоев на основе Mo-Si аналогичные результаты получены ранее [5]. Рабочий контроль толщины осажденных слоев осуществляли путем измерений с применением атомно-силового микроскопа AIST-NT SmartSPM в полуконтактном режиме. Для этого перед нанесением пленки поверхность подложки частично маскировали, а измерения проводили на границе областей с осажденным слоем и без него после удаления маски. Скорость осаждения материала определяли с учетом времени распыления. Морфология и элементный состав нанесенных слоев на этом этапе исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6010 Plus/LA с интегрированным рентгеновским энергодисперсионным детектором. Ускоряющее напряжение в процессе энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDXS) варьировали с целью минимизации сигнала от подложки.

Для проведения детальных исследований оптических свойств слоев на основе Ta-Si и Mo-Si и их стабильности выбраны составы, наиболее близкие по соотношению компонентов к коммерческим составам фазосдвигающих слоев. Поэтому слои на основе Ta-Si формировали при мощности распыления мишеней Ta и Si 300 и 500 Вт соответственно и парциальном давлении N_2, равном $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ торр. Слои на основе Mo-Si формировали при мощности распыления мишеней Mo и Si 100 и 600 Вт соответственно и парциальном давлении N_2, равном $7 \cdot 10^{-4}$ торр.

Устойчивость пленок к воздействию когерентного ГУФ-излучения на длине волны 248 нм исследовали с использованием эксимерного KrF-лазера CL 7100 (ООО «Оптосистемы»). При облучении образцов проводили измерение оптического пропускания в процентах в зависимости от количества импульсов. Схема измерений представлена на рис. 1.

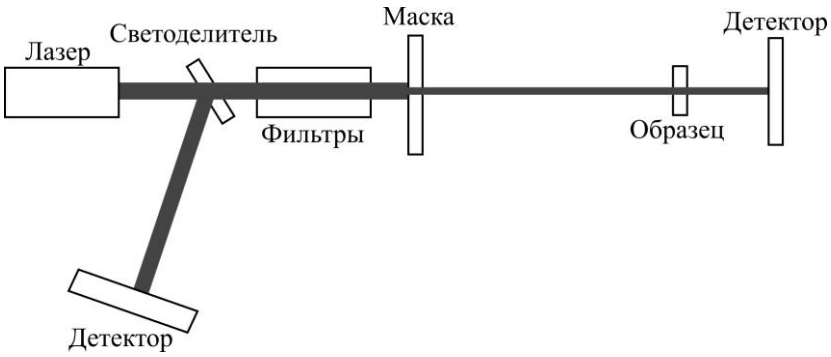


Рис. 1. Схема измерений оптического пропускания
Fig. 1. Measurement scheme of optical transmission

После выхода из окна излучателя лазерный луч попадает на светоделительную пластину, которая отражает малую долю излучения на опорный чувствительный измеритель энергии. Основная часть излучения проходит через светоделитель к набору фильтров, применяемых для уменьшения энергии пучка. В качестве фильтров использовали подложки из фторида кальция с нанесенными на поверхность интерференционными покрытиями. Профиль лазерного излучения имеет прямоугольную сильно вытянутую по одной оси форму с равномерным распределением интенсивности по длинной оси и гауссовым распределением по короткой. Для получения пятна с равномерным распре-

делением энергии использовали квадратную маску размером 4 × 4 мм, которая вырезает центральную часть пучка. Далее излучение попадает на образец, закрепленный в держателе на механическом столике, подвижном в трех измерениях. С задней стороны образца размещали детектор прошедшего излучения.

Данные от двух измерителей энергии передавали в персональный компьютер и записывали с помощью программы StarLab в текстовые файлы. Использование опорного сигнала, отраженного от светоделительной пластины, позволяет учитывать изменения интенсивности лазерного излучения от импульса к импульсу, которые составляют не более 7 %. В отсутствие образца измеряли энергию лазера и подбирали фильтры для обеспечения необходимой плотности энергии излучения, равной 25 мДж/см^2 за один импульс. Исследуемые области образов последовательно подвергали воздействиям серий из 20, 40, 60, 80 и 100 тыс. импульсов. В результате для последующих исследований получены области с накопленной дозой экспонирования 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 кДж/см^2 соответственно.

Оптические характеристики образцов до и после облучения исследовали с помощью спектроскопического эллипсометра SER 850 DUV с диапазоном измерения 190–3500 нм. На основе экспериментально измеренных поляризационных зависимостей отражения с учетом формул Френеля рассчитывали отношения амплитуд и сдвиги фаз падающей и отраженной волн. По результатам этих измерений с использованием моделей Друде – Лоренца или Тауца – Лоренца определяли спектральные зависимости показателя преломления слоя n на длине волны λ и коэффициента экстинкции k, толщину фазосдвигающего слоя d. Сдвиг фазы световой волны рассчитывали по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1) .$$

Приготовление образцов в виде поперечного сечения (cross-section) для исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) выполняли с помощью фокусированного ионного пучка методом *in-situ lift-out* [12] на электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650, оснащенном системой локального осаждения платины и микроманипулятором Kleindick MM3A-EM. Для получения микрофотографий и исследования распределения состава в образцах при ускоряющем напряжении 200 кВ применяли просвечивающий электронный микроскоп Titan Themis 200, оснащенный корректором аберраций объективной линзы, кольцевым детектором электронов M3000 (Fischione Instruments), рассеянных на большие углы, и энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения Super-X.

Результаты и их обсуждение. Состав, толщину и распределение элементов по толщине пленок изучали методом ПЭМ. Исследование поперечного сечения образцов показало, что исходные пленки Mo-Si-N и Ta-Si-N не содержат кристаллических включений и полностью аморфные. При картировании поперечного среза по элементам Mo, Si, N, O, Ta с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа выявлено их равномерное распределение (рис. 2, *а*, *б*). Таким образом, получены тонкие пленки на основе Mo-Si и Ta-Si, близкие по составу и по толщине, что дает возможность сравнивать между собой их оптические свойства. Однако на поверхности тонких пленок обоих материалов изначально присутствует слой, насыщенный кислородом, толщиной 4–5 нм (рис. 2, *в*, *г*).

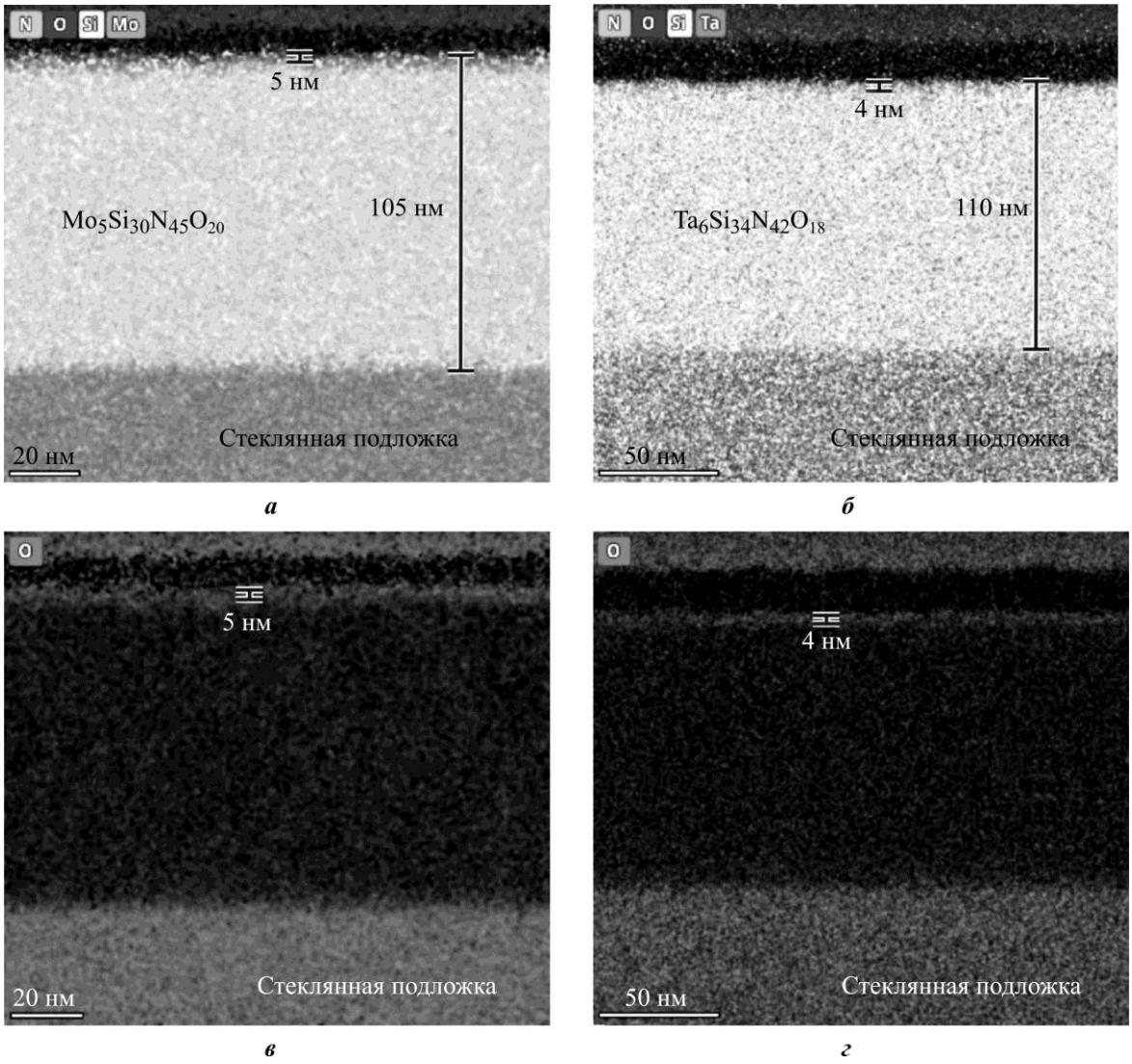


Рис. 2. Карты распределения элементов Ta, Mo, Si, N, O (*а*, *б*) и O (*в*, *г*) на поперечном сечении исходных пленок Mo-Si-N (*а*, *в*) и Ta-Si-N (*б*, *г*)
Fig. 2. Elemental distribution maps of Ta, Mo, Si, N, O (*a*, *b*) and O (*c*, *d*) in the cross-section of the initial Mo-Si-N (*a*, *c*) and Ta-Si-N (*b*, *d*) films

Полученные образцы слоев $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ подвергали импульсному воздействию излучения эксимерного KrF-лазера с длиной волны 248 нм с дозами экспонирования от 20 000 до 100 000 импульсов. Энергия одного импульса составляет 25 мДж/см^2, что примерно соответствует энергии одного экспонирования в фотолитографическом процессе. На рис. 3 и 4 продемонстрированы изменения основных характеристик фазосдвигающих слоев – пропускания и фазового сдвига – в зависимости от суммарной дозы воздействия лазерного излучения. Фазовый сдвиг рассчитан из экспериментальных данных показателя преломления и толщины, полученных путем эллипсометрии.

Сравнение материалов показывает, что при близких элементном составе и толщине пленок $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ характеризуется более высоким пропусканием и значительнее сдвигает фазу световой волны, чем $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$. При этом накопление воздействия излучения по-разному влияет на рассматриваемые материалы. Пропускание $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ в процессе воздействия серии до 40 000 импульсов несколько увеличива-

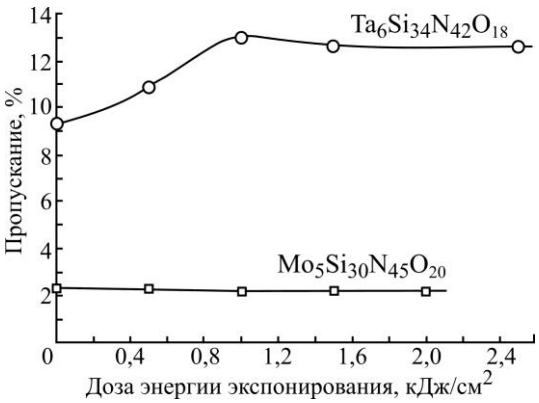


Рис. 3. Зависимость пропускания фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si от накопленной дозы энергетического воздействия излучения эксимерного лазера KrF с длиной волны 248 нм

Fig. 3. Dependence of the transmission of phase-shifting layers based on Mo-Si and Ta-Si on the accumulated energy dose of KrF excimer laser radiation with a wavelength of 248 nm

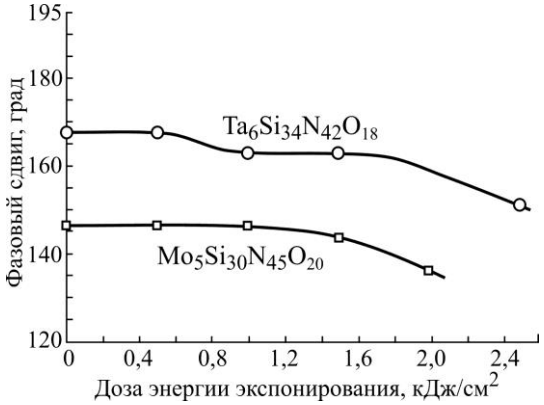


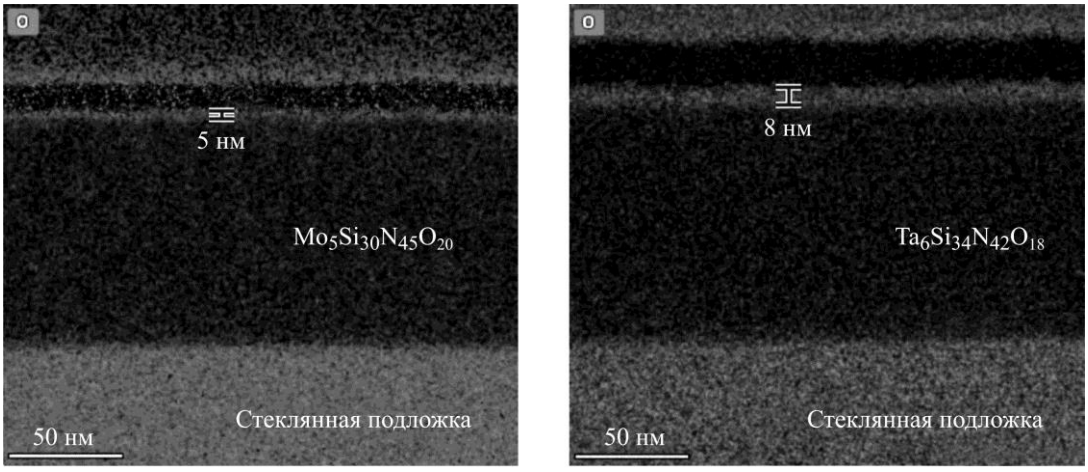
Рис. 4. Изменение фазового сдвига излучения при прохождении через слои на основе Mo-Si и Ta-Si в процессе накопления дозы энергетического воздействия излучения эксимерного лазера KrF с длиной волны 248 нм

Fig. 4. Change in the phase shift of radiation passing through layers based on Mo-Si and Ta-Si during the accumulation of the energy dose of KrF excimer laser radiation with a wavelength of 248 nm

ется, а далее становится неизменным даже после воздействия серии из 100 000 импульсов. Пропускание $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ незначительно, но плавно снижается при увеличении количества импульсов воздействия. Тем не менее, как видно из рис. 4, можно констатировать, что оба материала выдерживают энергетическое воздействие излучения с длиной волны 248 нм: значимые изменения в фазовом сдвиге, что существенно для фазосдвигающих слоев, у данных материалов начинаются после воздействия серии из 60 000 импульсов с энергией 25 мДж.

Области $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$, проэкспонированные с суммарной энергией 2,0 и 2,5 кДж соответственно и подвергшиеся интенсивному воздействию излучения эксимерного KrF-лазера и изменившие оптические свойства, исследованы посредством ПЭМ. Это важно с точки зрения использования данных полутоновых фазосдвигающих слоев для фотошаблонов. Изменений в структуре и составе пленок не обнаружено. На рис. 5 показано распределение кислорода на поперечных срезах этих образцов. Видно, что после обработки излучением слоя $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ толщина оксидного слоя на поверхности не изменилась и осталась на уровне 5 нм, как и у исходного образца. После обработки излучением слоя $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ толщина оксидного слоя на поверхности увеличилась в два раза (от 4 до 8 нм).

При детальном анализе экспериментальных данных, полученных эллипсометрическими измерениями, выявлено, что наиболее точно они описываются моделью с шероховатым слоем сверху основной пленки фазосдвигающего материала. В этом случае интерпретация результатов показывает, что толщина шероховатого слоя исходных образцов на слоях $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ составляет 3–5 нм. На слоях $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$, подвергнутых наибольшей дозе экспонирования, толщина шероховатого слоя составляет 15 и 18 нм соответственно. Таким образом, принимая во внимание результаты ПЭМ и эллипсометрии, можно заключить, что причиной изменения оптических свойств $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ при больших дозах экспонирования излучением с длиной волны 248 нм является окисление поверхности.



а *б*

Рис. 5. Карты распределения кислорода в поперечном сечении облученных пленок Mo-Si-N (*а*) и Ta-Si-N (*б*)

Fig. 5. Oxygen distribution maps in the cross-section of irradiated Mo-Si-N (*a*) and Ta-Si-N (*b*) films

Моделирование передачи изображения с использованием полутоновых фазосдвигающих слоев на основе Mo-Si и Ta-Si. С применением полученных экспериментально оптических характеристик слоев $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ проведено моделирование дифракционных картин от одномерных шаблонных структур на основе этих материалов при воздействии излучения с длиной волны 248 нм. Экспериментально полученные характеристики пленок $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$, использованные для расчетов, приведены в таблице.

Характеристики пленок $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ и $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ до и после воздействия излучения с длиной волны 248 нм и суммарной дозой до 2,5 кДж
Characteristics of $Mo_5Si_{30}N_{45}O_{20}$ and $Ta_6Si_{34}N_{42}O_{18}$ films before and after exposure to radiation with a wavelength of 248 nm with a total dose of up to 2.5 kJ

Материал	Толщина слоя, нм	Коэффициент пропускания на длине волны 248 нм, %	Показатель преломления	Сдвиг фазы, град
MoSiN	107	2,3/1,9	2,04/1,97	146/136
TaSiN	113	9,5/12,5	2,11/2,0	168/151

Подробное описание метода расчета дифракционной картины, создаваемой одномерной шаблонной структурой при нормальном падении на нее плоской волны, приведено в работе [2]. При моделировании использовали внеосевой источник излучения, от которого волны падают на шаблон не нормально, а под некоторым углом к нормали, что позволяет улучшить разрешение в воздушном изображении от шаблонной структуры [13]. Ширину полос a принимали равной 110 нм, ширина щелей между ними $b = 1{,}2a = 132$ нм, числовая апертура объектива NA = 0,8, направляющие косинусы внеосевого излучения дипольного типа $\cos(a_x) = \pm 0{,}24$, длина волны 248 нм. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, показывает, что для обоих материалов фазосдвигающих слоев воздушные изображения от шаблонной структуры при использовании внеосевого источника излучения получаются с хорошей контрастностью как в центре, так и по краям изображений. Максимумы интенсивности выше для шаблона с полосами MoSiON, но при этом минимумы контрастности ниже для шаблона

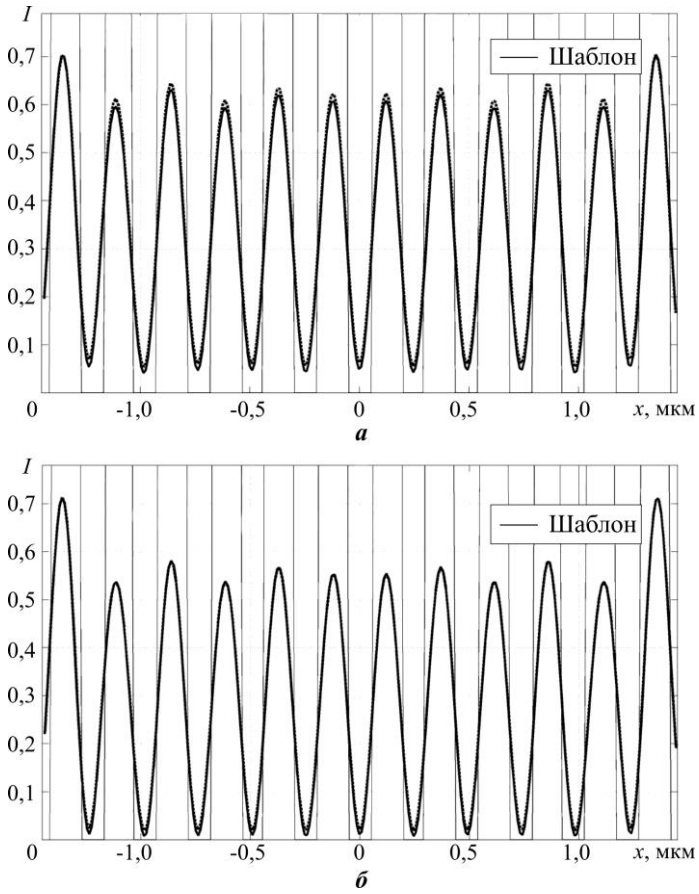


Рис. 6. Дифракционные картины, полученные от шаблонных структур с 12 бесконечными щелями шириной b = 132 нм с фазосдвигающими полосами между ними шириной a = 110 нм, расположенными на расстоянии z = 0 от плоскости экрана (xy), до (сплошные кривые) и после длительного воздействия ГУФ-излучением (штриховые кривые) при λ = 248 нм: *а* – пленка MoSiN; *б* – пленка TaSiN

Fig. 6. Diffraction patterns from template structures with 12 infinite slits of width b = 132 nm, with phase-shifting stripes between them of width a = 110 nm, at a distance z = 0 from the screen plane (xy) before (solid curves) and after prolonged DUV irradiation (dashed curves) at λ = 248 nm: *a* – MoSiN film; *b* – TaSiN film

с полосами TaSiON, что в итоге обусловливает более высокие значения оптической контрастности: 0,85 для пленки MoSiON и 0,96 для пленки TaSiON. Полосы из TaSiON имеют большее пропускание по сравнению с MoSiON, а также больший сдвиг фазы при примерно одинаковой толщине пленки, что приводит к лучшим показателям вблизи предела разрешения. Следует отметить, что пленки MoSiON и TaSiON демонстрируют хорошую устойчивость к воздействию ГУФ-излучения в процессе эксплуатации. Несмотря на некоторые изменения оптических свойств в результате воздействия ГУФ-изучения, в обоих случаях зависимости интенсивностей до и после обработки различаются незначительно (см. рис. 6). Это также подтверждается расчетом оптической контрастности: для пленки MoSiON она снижается до 0,83, для пленки TaSiON она остается более высокой и снижается до 0,93.

Заключение. Фотошаблоны на основе слоев MoSiON и TaSiON позволяют при длине волны излучения 248 нм и внеосевом источнике получать изображения с разрешением 110 нм с высокой оптической контрастностью. Воздействие излучения с дли-

ной волны 248 нм на оптические характеристики рассматриваемых материалов не оказывает заметного влияния на оптический контраст дифракционной картины. При использовании в фотошаблонах пленка TaSiON имеет характеристики лучшие, чем характеристики пленки MoSiON.

Литература / References

1. Балан Н. Н., Иванов В. В., Кузовков А. В., Шамин Е. С. Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии. *Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника.* 2019;(2):54–63. EDN: NSJGMW.
   Balan N. N., Ivanov V. V., Kuzovkov A. V., Shamin E. S. Phase shifting masks in modern semiconductor technology. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3: Mikroelektronika = Electronic Engineering. Ser. 3: Microelectronics.* 2019;(2):54–63. (In Russ.).
2. Лавров И. В., Дронова Д. А., Силибин М. В., Аникин А. В., Дубков С. В., Лебедев Е. А. и др. Моделирование дифракционных эффектов при использовании фазосдвигающих слоев в фотолитографии. *Изв. вузов. Электроника.* 2024;29(6):736–751. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-736-751. EDN: DVEATM.
   Lavrov I. V., Dronova D. A., Silibin M. V., Anikin A. V., Dubkov S. V., Lebedev E. A. et al. Simulation of the diffraction effects using phase-shifting layers in photolithography. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2024;29(6):736–751. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-736-751
3. Hibbs M. S., Ushida M., Babich K., Mitsui H., Bourov A. Evaluation of molybdenum silicide for use as a 193-nm phase-shifting absorber in photomask manufacturing. *Proc. SPIE.* 2001;4186:444. https://doi.org/10.1117/12.410721
4. Ushida M., Kobayashi H. HOYA deep-UV EAPSM blanks development status. *Proc. SPIE.* 1999;3665:9. https://doi.org/10.1117/12.346216
5. Громов Д. Г., Гаврилов С. А., Лебедев Е. А., Силибин М. В., Дубков С. В., Аникин А. В. и др. Управление составом тонких пленок Mo-Si-N-O при реактивном магнетронном распылении. *Изв. вузов. Электроника.* 2023;28(6):745–761. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-745-761. EDN: WRKMQW.
   Gromov D. G., Gavrilov S. A., Lebedev E. A., Silibin M. V., Dubkov S. V., Anikin A. V. et al. Composition control of Mo-Si-N-O thin films during reactive magnetron sputtering. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2023;28(6):745–761. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-6-745-761
6. Motonaga T., Ohtsuki M., Kinase Y., Nakagawa H., Yokoyama T., Mohri H. et al. Development of bi-layered $TaSiO_x$-HTPSM: I. *Proc. SPIE.* 2001;4409:438337. https://doi.org/10.1117/12.438337
7. Reynolds G. A. M., French R. H., Carcia P. F., Torardi C. C., Hughes G. P., Jones D. J. et al. TiSi-nitride attenuating phase-shift photomask for 193-nm lithography. *Proc. SPIE.* 1998;3546:514–523. https://doi.org/10.1117/12.332857
8. Carcia P. F., French R. H., Sharp K. G., Meth J. S., Smith B. W. Materials screening for attenuating embedded phase-shift photoblanks for DUV and 193-nm photolithography. *Proc. SPIE.* 1996;2884:255–263. https://doi.org/10.1117/12.262809
9. Bian Z., Shaffer E. O., Geer R. E. Development of TaSiN diffusion barriers for Cu/SiLK metallization schemes. In: *Proc. of the IEEE 2001 International Interconnect Technology Conference (Cat. No.01EX461).* Burlingame, CA: IEEE; 2001, pp. 204–206. https://doi.org/10.1109/IITC.2001.930061
10. Hara T., Namiki K. Effect of TaSiN barrier layer composition on resistivity of electroplated copper interconnection layers. *Electrochem. Solid-State Lett.* 2004;7(5):C57. https://doi.org/10.1149/1.1675952
11. Maniruzzaman Md., Alam S. S., Ahsan Md. S., Hasan Md. T., Haque A. K. M. A. Adhesion of copper with diffusion barrier layer for copper interconnection. *Khulna Univ. Stud.* 2007;08(1):43–48. https://doi.org/10.53808/KUS.2007.8.1.0636-E
12. Giannuzzi L. A., Stevie F. A. (eds). *Introduction to focused ion beams: Instrumentation, theory, techniques, and practice.* New York: Springer; 2004. xvii, 357 p. https://doi.org/10.1007/b101190
13. Ивин В. В., Махвиладзе Т. М., Валиев К. А. Теоретическое рассмотрение вопросов выбора оптимальной формы источника в оптической нанолитографии. *Микроэлектроника.* 2004;33(3):163–174. EDN: OWNIVL.
   Ivin V. V., Makhviladze T. M., Valiev K. A. Optimizing light-source aperture for off-axis illumination in optical nanolithography: Theoretical consideration. *Russ. Microelectron.* 2004;33(3):127–136. https://doi.org/10.1023/B:RUMI.0000026169.36599.03

Информация об авторах

Аникин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, директор Научно-технологического центра фотошаблонов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), anikin_a@rambler.ru

Громов Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1); старший научный сотрудник Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4), gromadima@gmail.com

Лебедев Егор Александрович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Dr.beefheart@gmail.com

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

Волков Роман Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики, старший научный сотрудник НИЛ электронной микроскопии Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), r.l.volkov@org.miet.ru

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

Силибин Максим Викторович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sil_m@mail.ru

Дубков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sv.dubkov@gmail.com

Вигдорович Евгений Наумович – доктор технических наук, профессор, член диссертационного совета Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), evgvig@mail.ru

Павликов Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2), pavlikovav@my.msu.ru

Комленок Максим Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38), komlenok@nsc.gpi.ru

Курочицкий Николай Дмитриевич – техник Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38), kuronick@mail.ru

Громов Владислав Дмитриевич – лаборант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), 124498, grovla2002@mail.ru

Рязанов Роман Михайлович – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1); младший научный сотрудник НИЛ перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), r.m.ryazanov@gmail.com

Крохан Никита Вячеславович – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, инженер Научно-технологического центра фотошаблонов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), windex88@mail.ru

Шарипов Рустем Асгатович – аспирант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, инженер Научно-технологического центра фотошаблонов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sharipov769@mail.ru

Новикова Оксана Вячеславовна – магистрант Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, инженер Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kamatjama@mail.ru

Подорожний Олег Витальевич – аспирант Института физики и прикладной математики, младший научный сотрудник НИЛ электронной микроскопии, Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, ректор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pcfme@miee.ru

Information about the authors

Andrey V. Anikin – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Technical Center for Photomask Blanks, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), anikin_a@rambler.ru

Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1); Senior Researcher, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Russia, 119435, Moscow, Bolshaya Pirogovskaya st., 2, bld. 4), gromadima@gmail.com

Egor A. Lebedev – Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Dr.beefheart@gmail.com

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

Roman L. Volkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Senior Researcher of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), r.l.volkov@org.miet.ru

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

Maksim V. Silibin – Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sil_m@mail.ru

Sergey V. Dubkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sv.dubkov@gmail.com

Evgeny N. Vigdorovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Member of the Dissertation Council, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), evgvig@mail.ru

Aleksandr V. Pavlikov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Physics Faculty, Lomonosov Moscow State University (Russia, 119991, GSP-1, Moscow, Leninskie gory, 1, bld. 2), pavlikovav@my.msu.ru

Maksim S. Komlenok – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Vavilova st., 38), komlenok@nsc.gpi.ru

Nikolay D. Kurochitsky – Technician, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Vavilova st., 38), kuronick@mail.ru

Vladislav D. Gromov – Laboratory Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), grovla2002@mail.ru

Roman M. Ryazanov – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1); Junior Researcher of the Scientific Laboratory of Advanced Processes, SMC “Technological Centre” (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), r.m.ryazanov@gmail.com

Nikita V. Krokhan – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, Engineer of the Scientific and Technological Center of Photomasks, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), windex88@mail.ru

Rustem A. Sharipov – PhD student of the Institute of Integrated Electronics, engineer of the Scientific and Technological Center of Photomasks, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sharipov769@mail.ru

Oksana V. Novikova – Master’s degree student of the Institute of Integrated Electronics, Engineer of the Center for Collective Use “Microsystem Technology and Electronic Component Base”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kamatjama@mail.ru

Oleg V. Podorozhniy – PhD student of the Institute of Physics and Applied Mathematics, Junior Researcher of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), podorozhniy_oleg@rambler.ru

Sergey A. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pcf-me@miee.ru

Поступила в редакцию / Received 12.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Научная статья
УДК 620.22-022.532
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-566-574
EDN: YEUJVM

Особенности свойств полимерных композитов на основе наноразмерной дисперсной фазы

А. Г. Борисов*, Д. В. Вертянов, Е. В. Ильяшева, Н. Г. Осипенкова, С. П. Тимошенков

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

* *borisov_a.g@mail.ru*

Аннотация. В зависимости от типа наночастиц, вводимых в полимерные материалы в низкой концентрации, нанокомпозиты приобретают особые химические, электрофизические, термические и трибологические свойства, что открывает широкие возможности для их использования в технологии электронной техники. Однако при увеличении объемной доли дисперсной фазы выше определенного значения происходят резкие изменения физико-химических свойств материала. Наблюдаемые явления могут быть объяснены перестройкой структуры нанокомпозита, обусловленной процессами агломерации частиц дисперсной фазы либо образования структуры накокомпозита в виде непрерывной сетки. В работе проведена теоретическая оценка критической объемной доли дисперсной фазы в нанокомпозите, при которой начинается структурная перестройка, в зависимости от размера частиц этой фазы. Расчетными методами на основе представлений о возможных формах молекул полимеров на поверхности твердой фазы оценены толщины мономолекулярных слоев различных полимерных матриц. По результатам расчетов построены графики зависимости критической объемной доли дисперсной фазы нанокомпозита от размера ее частиц для матриц на основе полиимида и эпоксидных смол. Показано, что рассчитанная зависимость для толщины слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы, равной 200 нм, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: нанокомпозит, полимер, слои перераспределения, микросборка, внутренний монтаж кристаллов

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-29-00964).

Для цитирования: Борисов А. Г., Вертянов Д. В., Ильяшева Е. В., Осипенкова Н. Г., Тимошенков С. П. Особенности свойств полимерных композитов на основе наноразмерной дисперсной фазы. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):566–574. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-566-574. EDN: YEUJVM.

© А. Г. Борисов, Д. В. Вертянов, Е. В. Ильяшева, Н. Г. Осипенкова, С. П. Тимошенков, 2025

Original article

Features of the properties of polymer composites based on a nanosized dispersed phase

A. G. Borisov**, D. V. Vertyanov, E. V. Ilyasheva, N. G. Osipenkova, S. P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *borisov_a.g@mail.ru*

Abstract. Depending on the type of nanoparticles introduced into polymeric materials in low concentrations, nanocomposites acquire special chemical, electrophysical, thermal and tribological properties, which opens up wide possibilities for their use in electronic engineering technology. However, with an increase in the volume fraction of the dispersed phase above a certain value, sharp changes in the physicochemical properties of the material occur. The observed phenomenon can be explained by the rearrangement of the nanocomposite structure due to the processes of agglomeration of dispersed phase particles, or of a nanocomposite structure formation in the form of a continuous network. In this work, a theoretical assessment is performed of the critical value of the dispersed phase volume fraction in the nanocomposite, at which the specified structural rearrangement begins, depending on the size of the particles of this phase. The thicknesses of monomolecular layers of various polymer matrices are estimated using calculation methods based on ideas about the possible shapes of polymer molecules on the surface of the solid phase. Based on the calculation results, graphs of the dependence of the critical value of the volume fraction of the dispersed phase of the nanocomposite on the size of its particles for matrices based on polyimide and epoxy resins were constructed. It has been demonstrated that calculated dependence for the thickness of oligomer layer around dispersed phase particle equal to 200 nm found good agreement with experimental record.

Keywords: nanocomposite, polymer, redistribution layers, microassembly, internal assembly of crystals

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project 23-29-00964).

For citation: Borisov A. G., Vertyanov D. V., Ilyasheva E. V., Osipenkova N. G., Timoshenkov S. P. Features of the properties of polymer composites based on a nanosized dispersed phase. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):566–574. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-566-574.

Введение. Полимерные композиты на основе наноразмерной дисперсной фазы представляют собой материалы, в которых полимерная матрица модифицирована наночастицами, что придает им уникальные физико-химические и механические свойства. В настоящее время создание прикладных композитных материалов на основе полимеров путем введения в них наночастиц находится в центре внимания материаловедческих и физико-химических исследований. Это связано в первую очередь с возможностью управления функциональными свойствами данных материалов в широких пределах за счет введения в них различных наноразмерных добавок, которые являются промежу-

точными по своим характеристикам между индивидуальными молекулами и макроскопической фазой. Это обусловливает особенности универсальных и специфических взаимодействий нанонаполнитель – матрица на микроуровне и, как следствие, макроскопических физических свойств полимерных нанокомпозитов. Подобные материалы активно разрабатываются, и их применение расширяется благодаря сочетанию уникальных свойств полимеров и функциональности нанонаполнителей. Однако при объемной доли дисперсной фазы выше определенного значения наблюдаются резкие изменения физико-химических свойств материала.

В настоящей работе проводится оценка критического значения объемной доли дисперсной фазы в нанокомпозите, при котором начинается структурная перестройка материала.

Постановка задачи. Полимерные композиты на основе эпоксидных смол, полиимидов и кремнийорганических полимеров широко используются в технологиях электронной техники при изготовлении высокоинтегрированных микросборок, многокристальных модулей и электронных модулей типа система в корпусе, коммутационных плат, слоев перераспределения при внутреннем монтаже и/или корпусировании кристаллов ИС [1–3]. Их роль и место в технологиях определяют особые требования к физико-химическим, электрофизическим и тепловым свойствам материалов, в частности к вязкости, диэлектрическим свойствам, коэффициенту теплопроводности. Как правило, обеспечение этих свойств осуществляется соответствующим выбором материала, размера и формы частиц дисперсной фазы, ее объемной доли в композите.

Применение в составе композита наноразмерных порошков дисперсной фазы обусловлено уникальными свойствами полимерных композитов на их основе (нанокомпозитов), которые объясняются большой удельной поверхностью и высокой поверхностной энергией частиц наполнителя. Частицы с нанометровыми размерами в отличие от микро- и более крупных включений не являются концентраторами напряжений, что способствует существенному повышению механических свойств нанокомпозитов. Прозрачность нанокомпозитов по сравнению с соответствующими полимерами не снижается, так как наночастицы не рассеивают свет по причине их малого размера. В зависимости от типа наночастиц, вводимых в полимерные материалы, в частности, в низкой концентрации, нанокомпозиты приобретают особые химические, электрофизические, термические и трибологические свойства, что дает возможность использовать их в технологиях электронной техники [4]. При этом уменьшение размеров частиц дисперсной фазы в композите улучшает пространственную однородность его свойств как на макро-, так и на микроуровне и повышает его способность заполнять микрозазоры и неоднородности рельефа.

Как показали эксперименты, независимо от природы материала матрицы и дисперсной фазы нанокомпозита при объемной доле последней порядка 0,1 наблюдаются резкие изменения физико-химических свойств материала, в частности возрастает вязкость [5]. Данное явление может быть объяснено перестройкой структуры нанокомпозита при объемном содержании дисперсной фазы вследствие процессов агломерации частиц дисперсной фазы либо образования непрерывной сетки из этих частиц.

Теоретическая оценка критического значения объемной доли дисперсной фазы φ_{max} в нанокомпозите, при котором начинается указанная структурная перестройка, в зависимости от размера частиц этой фазы – актуальная задача.

Методика и результаты исследования. Предполагается, что частицы дисперсной фазы равномерно диспергированы в объеме материала матрицы, имеют одинаковую сферическую форму, непроницаемы для дисперсионной среды и отделены друг от дру-

га слоем полимера толщиной h. Толщина этого слоя не может быть меньше толщины мономолекулярного слоя полимера. В противном случае между частицами дисперсной фазы возникают «сухие» контакты, что приводит либо к объединению наночастиц в более крупные агломераты и переходу нанокомпозита в состояние микрокомпозита, либо к образованию сетчатой структуры из частиц дисперсной фазы. Минимальный объем материала матрицы, необходимый для формирования монослоя вокруг частиц дисперсной фазы, определяется соотношением

$$(1-\varphi_{max}) = \varphi_{max} h_{мс} S,$$

где φ_{max} – критическое значение объемной доли дисперсной фазы; $h_{мс}$ – толщина монослоя материала дисперсионной среды; S – удельная поверхность дисперсной фазы.

Тогда критическое значение объемной доли дисперсной фазы в нанокомпозите равно:

$$\varphi_{max} = \frac{1}{1+h_{мс}S}.$$

При сферической форме частиц дисперсной фазы радиусом r и $S = 3/r$ имеем

$$\varphi_{max} = \frac{r}{r+3h_{мс}}.$$

Оценим критическое значение объемной доли дисперсной фазы в зависимости от радиуса ее частиц для широко применяемых в настоящее время в технологиях электронной техники композитов на основе полиимидов и эпоксидных смол.

Нанокомпозиты на основе разных полиимидов используются для формирования слоев перераспределения при внутреннем монтаже кристаллов и/или корпусировании ИС, межслойной изоляции в процессе изготовления микросборок и многоуровневых коммутационных плат [1–3]. Для определения среднего размера молекул полиимида и, соответственно, минимальной толщины слоя полимера на поверхности частиц дисперсной фазы в нанокомпозите предполагается, что молекулы имеют форму гауссова клубка (рис. 1).

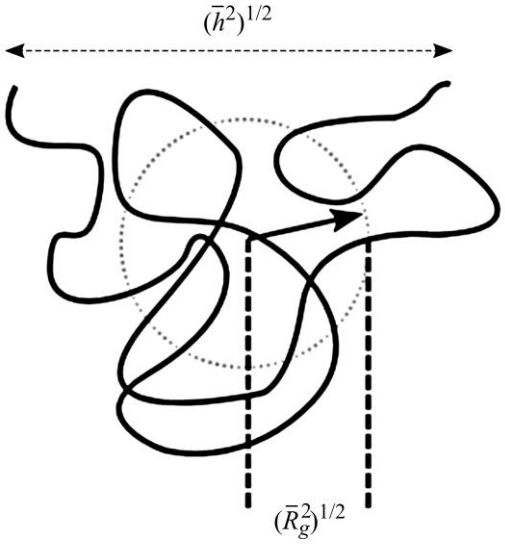


Рис. 1. Форма молекул полиимида в монослое вокруг частиц дисперсной фазы в композите
Fig. 1. The shape of polyimide molecules in a monolayer around dispersed phase particles in a composite

При использовании полиимидов гауссов клубок может менять форму и разворачиваться, а в силу значительного межмолекулярного взаимодействия между фрагментами цепей молекул полиимида слой полимера вокруг частиц дисперсной фазы в композите одновременно могут формировать несколько молекул дисперсионной среды. При этом толщина слоя полимера на поверхности частиц дисперсной фазы будет больше, чем в случае формы молекул в виде гауссова клубка. При определении верхнего предела содержания дисперсной фазы в нанокомпозите оценка ведется с учетом минимально возможной толщины слоя, соответствующей размеру молекулы в форме гауссова клубка. Тогда размеры молекулы полимера, следовательно, и толщина монослоя могут быть

охарактеризованы среднеквадратичным расстоянием между концами цепи $(\overline{h^2})^{1/2}$ или среднеквадратичным радиусом инерции $(\overline{R_g^2})^{1/2}$, т. е. средним расстоянием от центра массы макромолекулы до любого из ее звеньев (см. рис. 1) [6].

Оценка размеров макромолекулярного клубка включает в себя набор параметров, в который в зависимости от используемой модели могут входить количество связей в цепи, длина этих связей, валентные углы, углы заторможенного внутреннего вращения, множитель кооперативного вращения. Отметим, что для простейших карбоцепных полимеров, основная цепь которых построена из одинарных углерод-углеродных связей, подобные расчеты являются непростой задачей. Ситуация значительно усложняется при переходе к гетероцепным полимерам, особенно к полимерам, содержащим атомные группы, способные к специфическим взаимодействиям, например к образованию водородных связей.

Для упрощения расчетов средних размеров макромолекулы используют понятие «статистический сегмент», или «сегмент Куна» [4]. В полимерной цепи, разбитой на N сегментов Куна длиной A (сегментированная цепь), тепловое движение сегментов квазинезависимо. Поэтому сегментированная цепь может быть описана в рамках модели свободно сочлененной цепи, расстояние между концами которой выражается как $\sqrt{h^2} = \sqrt{N}A$. Кроме того, для макромолекул линейных полимеров обычно выполняется соотношение $\overline{R_g^2} = \overline{h^2}/6$.

Таким образом, приведенные уравнения позволяют просто и корректно оценить размеры реальной макромолекулы, если известно значение статистического сегмента A, которое для растворимого полиимида, согласно литературным данным, равно 2–5 нм, а число мономерных звеньев в сегменте составляет от 3 до 6 [7–9].

Будем считать, что степень полимеризации получаемых полимеров близка к степени полимеризации полиамидокислоты, которая, по данным [9], как правило, имеет молекулярную массу ~ 100 000 и степень полимеризации ~ 140. Для оценки будем использовать типичные значения размеров молекул. Пусть степень полимеризации 140, число мономерных звеньев в сегменте Куна 6, а длина статистического сегмента 3 нм. Тогда в молекуле из 140 мономерных звеньев укладывается N = 47 сегментов Куна. Откуда

$$\sqrt{h^2} = \sqrt{N}A = \sqrt{47}\cdot 6 = 41{,}1\ \text{нм}.$$

Тогда среднеквадратичный радиус инерции равен:

$$\overline{R_g^2} = \frac{\overline{h^2}}{6}, \quad \overline{R_g^2} = \frac{\overline{41{,}1^2}}{6} \approx 16{,}7\ \text{нм}.$$

Размер молекулы полимера (эффективный диаметр глобулы) можно оценить как d = 33, 4 нм.

Помимо применения модели сегментированной цепи, оценить размеры молекул можно с помощью расчетных формул, основанных на теории связи вязкости растворов полимеров с их молекулярно-массовыми характеристиками. Согласно уравнению Флори – Фокса [10]

$$[\eta] = \Phi\frac{\langle h^3\rangle}{M},$$

где [η] – характеристическая вязкость, см^3/г; M – молекулярная масса полимера, г/моль; Ф = $2{,}1\cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ – постоянная Флори – Фокса.

Для расчета возьмем приведенные в работе [11] данные по полиимидному материалу с молекулярной массой 111 000 и вязкостью 168 см^3/г:

$$h = \sqrt[3]{\frac{168 \cdot 111\,000}{2{,}1 \cdot 10^{23}}} = 4{,}46 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 44{,}6 \text{ нм}.$$

Тогда среднеквадратичный радиус инерции для глобулы равен:

$$R_g = \sqrt{\frac{(44{,}6)^2}{6}} \approx 18{,}2 \text{ нм}.$$

Диаметр при этом составит 36,4 нм.

Таким образом, оценка размеров частиц глобул полиимида, проведенная разными методами, дает схожие результаты.

На рис. 2 представлены результаты расчета критического значения объемной доли дисперсной фазы в нанокомпозите на основе полиимида для толщины слоя полимера на поверхности частицы дисперсной фазы, равной среднему значению (35 нм).

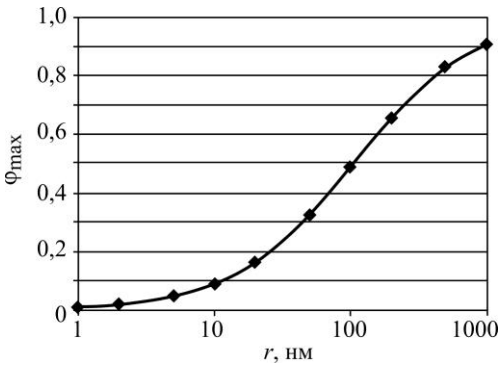
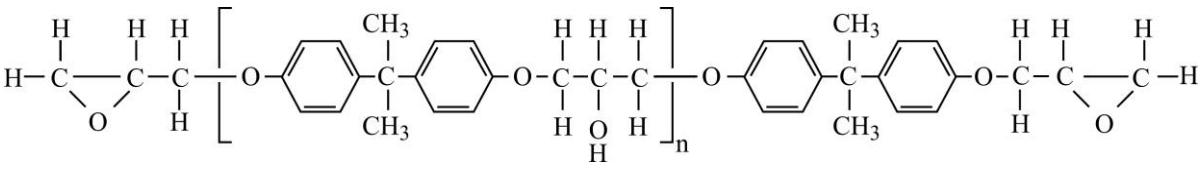


Рис. 2. Зависимость критического значения объемной доли дисперсной фазы φ_{max} в нанокомпозите на основе полиимида от радиуса ее частиц r для молекулы размером 35 нм

Fig. 2. Dependence of the critical value of the volume fraction of the dispersed phase φ_{max} in a polyimide-based nanocomposite on the dispersed phase particle radius r for a molecule size of 35 nm

Нанокомпозиты на основе эпоксидных смол используются в технологиях электронной техники в качестве материалов для заливки пространства между кристаллом и подложкой, инкапсуляции печатных плат, а также компонентных клеев, изоляционных покрытий, модифицирующих добавок при производстве полимерных подложек печатных плат и других полимерных материалов [12]. Данные по размерам сегмента Куна для эпоксидных смол в литературе отсутствуют. Однако экспериментальные исследования показали, что глобула является единственной морфологической единицей структуры олигомеров [13]. При этом, например, глобулы в эпоксидной смоле марки ЭД-8 имеют вытянутую форму и плотно упакованы, а их средний размер составляет 180–190 нм. Таким образом, если предположить, что в образовании монослоя участвуют глобулы, то толщина слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы будет около 200 нм.

По данным работы [4], молекулы олигомеров эпоксидных смол при формировании монослоя выстраиваются практически перпендикулярно поверхности твердой фазы. В этом случае толщина слоя рассчитывается как линейный размер молекулы исходя из суммы всех длин связей [14]. Например, для типичного эпоксидного полимера с общей формулой [4]



длина молекулы L, нм, как сумма связей равна: $L = (2{,}76 + 1{,}6n)$.

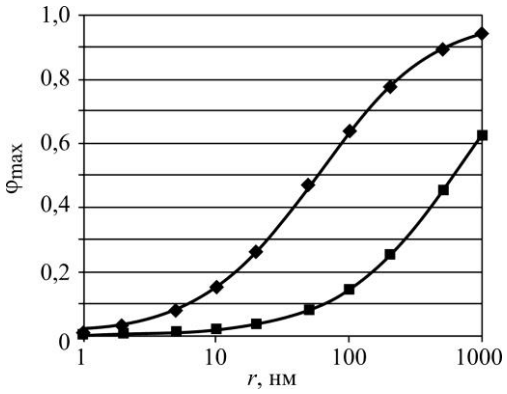


Рис. 3. Зависимость критического значения объемной доли дисперсной фазы φ_{max} в эпоксидном нанокомпозите от радиуса ее частиц *r* для слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы толщиной 18,8 нм (-♦-) и 200 нм (-■-)

Fig. 3. Dependence of the critical value of the volume fraction of the dispersed phase φ_{max} in an epoxy nanocomposite on its particle radius *r* for an oligomer layer around a particle of the dispersed phase with a thickness of 18.8 nm (-♦-) and 200 nm (-■-)

Эпоксидные олигомеры имеют низкие значения числа полимеризации (n = 1...10) и, соответственно, небольшую молекулярную массу (380–3500). Поэтому для n = 10 длина молекулы будет составлять 18,8 нм. Отметим, что наличие в молекулах эпоксидных олигомеров ароматических ядер, полярных групп, являющихся донорами или акцепторами водорода (гидроксильных, эпоксидных, феноксильных), способствует образованию водородных и донорно-акцепторных связей и ассоциатов [4, 15]. В этом случае толщина слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы может быть значительно больше, чем это следует из расчетов.

На рис. 3 представлена зависимость критического значения объемной доли дисперсной фазы в эпоксидном нанокомпозите от радиуса ее частиц, рассчитанная для слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы толщиной 18,8 и 200 нм.

Из результатов проведенных экспериментов по изучению свойств нанокомпозитов на основе эпоксидных олигомеров следует, что зависимость, рассчитанная для толщины слоя олигомера вокруг частицы дисперсной фазы, равной 200 нм, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Заключение. Оценка верхней границы значения критической объемной доли дисперсной фазы в нанокомпозитах на основе полиимида и эпоксидных смол в зависимости от размеров ее частиц проведена на основании теоретического расчета толщины слоя полимера, ассоциированного с частицей дисперсной фазы нанокомпозита. На практике толщина слоя полимера может быть значительно больше и, например, для эпоксидных композитов достигает 1 мкм [4]. Соответственно, реальные значения критической объемной доли могут быть меньше рассчитанных.

Полученные результаты могут служить ориентиром при выборе состава композита для разных технологических целей.

Литература / References

1. Белоус А. И., Паньков А. А. *Корпусирование микроэлектронных приборов: технологии, конструкции, оборудование.* М.: Техносфера; 2023. 558 с. EDN: DPSQGT.
Belous A. I., Pankov A. A. *Packaging of microelectronic devices: Technologies, constructions, equipment.* Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2023. 558 p. (In Russ.).
2. Кравцова В. Д., Умерзакова М. Б., Коробова Н. Е., Вертянов Д. В. Медьсодержащие композиции на основе алициклического полиимида для микроэлектроники. *Изв. вузов. Электроника.* 2017;22(6):509–517. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-6-509-517. EDN: ZWPZIJ.
Kravtsova V. D., Umerzakova M. B., Korobova N. E., Vertyanov D. V. Copper-containing compositions based on alicyclic polyimide for microelectronics. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2017;22(6):509–517. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-6-509-517
3. Vertyanov D. V., Korobova N. E., Pogudkin A. V., Kravtsova V. D. Physical and technological characteristic features of the process of installation of dies onto a temporary foundation in internal wiring technology. *Tech. Phys.* 2020;65(10):1677–1684. https://doi.org/10.1134/S1063784220100230

4. Иржак В. И. *Эпоксидные полимеры и нанокомпозиты.* Черноголовка: ИПХФ РАН; 2021. 318 с.
Irzhak V. I. *Epoxy polymers and nanocomposites.* Chernogolovka: IPKhF RAN Publ.; 2021. 318 p. (In Russ.).
5. Кербер М. Л. (ред.). *Технология переработки полимеров. Физические и химические процессы:* учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт; 2024. 316 с.
Kerber M. L. (ed.). *Polymer processing technology. Physical and chemical processes:* study guide for universities. 2nd ed., rev. and upd. Moscow: Yurait Publ.; 2024. 316 p. (In Russ.).
6. Тагер А. А. *Физико-химия полимеров.* Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Научный мир, 2007. 576 с. EDN: QKBTHB.
Tager A. A. *Physical chemistry of polymers.* 4th ed., rev. and upd. Moscow: Nauchnyy mir Publ.; 2007. 576 p. (In Russ.).
7. Аржаков М. С., Зезин А. Б. (авт., ред.), Антипина А. Д. и др. *Высокомолекулярные соединения:* учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт; 2024. 386 с.
Arzhakov M. S., Zezin A. B. (auth., ed.), Antipina A. D. et al. *Macromolecular compounds:* textbook and practical course for universities. Moscow: Yurait Publ.; 2024. 386 p. (In Russ.).
8. Василенко Н. А., Ахметьева Е. И., Свиридов Е. Б., Берендяев В. И., Рогожкина Е. Д., Алкаева О. Ф. и др. Растворимые полиимиды на основе 4,4'-диаминотрифениламина. Синтез, молекулярно-массовые характеристики, свойства растворов. *Высокомолекулярные соединения. Серия А.* 1991;33(7):1549–1560. EDN: XOJCRO.
Vasilenko N. A., Akhmet'eva Ye. I., Sviridov Ye. B., Berendyayev V. I., Rogozhkina Ye. D., Alkayeva O. F. et al. Soluble polyimides based on 4,4′-diaminotriphenylamine. Synthesis, molecular mass characteristics and solution properties. *Polymer Science U.S.S.R.* 1991;33(7):1439–1450. https://doi.org/10.1016/0032-3950(91)90333-L
9. Адрова Н. А., Бессонов М. И., Лайус Л. А., Рудаков А. П. *Полиимиды – новый класс термостойких полимеров.* Л.: Наука; 1968. 211 с.
Adrova N. A. et al. *Polyimides: New class of heat-resistant polymers.* Jerusalem: IPST, 1969. 168 p.
10. Масимов Э. А., Пашаев Б. Г., Раджабов М. Р. Определение конформации и размеров макромолекул ПЭГ в системах вода–ПЭГ–NaOH методом вискозиметрии. *Журнал физической химии.* 2021;95(1):57–62. https://doi.org/10.31857/S0044453721010180. EDN: KNPHLW.
Masimov E. A., Pashayev B. G., Rajabov M. R. Determining the conformation and dimensions of the PEG macromolecule in water–PEG–NaOH systems via vicosometry. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2021;95(1):84–89. https://doi.org/10.1134/S0036024421010180
11. Морозова С. М. *Ионные конденсационные полимеры:* дис. … канд. хим. наук. М., 2018. 182 с. EDN: ULTJBP.
Morozova S. M. *Ionic condensation polymers:* diss. for the Cand. Sci. (Chem.). Moscow, 2018. 182 p. (In Russ.).
12. Conformal coating. *DeepMaterial.* Available at: https://www.pottingcompound.com/conformal-coating/ (accessed: 16.06.2025).
13. Хозин В. Г. *Усиление эпоксидных полимеров.* Казань: Дом печати; 2004. 446 с.
Khozin V. G. *Strengthening of epoxy polymers.* Kazan: Dom pechati Publ.; 2004. 446 p. (In Russ.).
14. Равдель А. А., Пономарева А. М. (ред.) *Краткий справочник физико-химических величин*. 10-е изд., испр. и доп. СПб.: Иван Федоров; 2002. 237 с.
Ravdel A. A., Ponomareva A. M. (ed.) *Short reference book of physical and chemical quantities*. 10th ed., rev. and upd. St. Petersburg: Ivan Fedorov; 2002. 237 p. (In Russ.).
15. Хозин В. Г. Олигомерная предыстория структурообразования эпоксидных полимеров. *Бутлеровские сообщения*. 2006;8(3):36–49. EDN: KXSTGD.
Khozin V. G. Oligomer prehistory of structure formation of epoxy polymers. *Butlerov Communications.* 2006;8(3):36–49. (In Russ.). ROI: JBC-01/6-8-3-36.

Информация об авторах

Борисов Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), borisov_a.g@mail.ru

Вертянов Денис Васильевич – кандидат технических наук, начальник НИЛ «Передовые технологии корпусирования и производства 3D микросистем» Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vdv.vertyanov@gmail.com

Ильяшева Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), amt.miet@gmail.com

Осипенкова Наталья Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), amt.miet@gmail.com

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt111@mail.ru

Information about the authors

Alexander G. Borisov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), borisov_a.g@mail.ru

Denis V. Vertyanov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory “Advanced Technologies of 3D Microsystems Packaging and Manufacturing”, Institute of Nano- and Microsystem Engineering, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vdv.vertyanov@gmail.com

Ekaterina V. Ilyasheva – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), amt.miet@gmail.com

Natalia G. Osipenkova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), amt.miet@gmail.com

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

Поступила в редакцию / Received 31.10.2024
Поступила после рецензирования / Revised 13.11.2024
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Научная статья
УДК 544.653.23:546.786
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-575-585
EDN: YMTSVO

Исследование влияния гидродинамических условий формирования на морфологию и фотокаталитические свойства анодного оксида вольфрама

Ю. В. Назаркина[1*], Д. Д. Шитова[1], А. А. Дронов[1], Е. М. Еганова[2]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

[*] *engvel@mail.ru*

Аннотация. Анодирование переходных металлов – широко используемый метод изготовления наноструктурированных оксидов с высоким аспектным отношением, например пористого оксида алюминия или титана. Однако при синтезе пористого оксида вольфрама в процессе электрохимического окисления возникают сложности вследствие диффузионных ограничений: затрудненного подвода реагентов и отвода продуктов реакции. Технологические режимы анодного окисления вольфрама, которые позволяют формировать слои пористого оксида вольфрама с высокой удельной площадью поверхности путем изменения гидродинамических условий процесса, в том числе вращения электрода, на данный момент слабо изучены и практически не представлены в литературе. В работе рассмотрено влияние гидродинамических условий анодирования вольфрама на кинетику роста и морфологию пористого оксида вольфрама WO_x в ячейке с вращающимся дисковым электродом. Методом растровой электронной микроскопии исследована морфология полученных слоев анодного оксида вольфрама WO_x. Показано, что в диапазоне скоростей вращения вольфрамового электрода 500–750 об./мин возможно формирование пористых структур WO_x с диаметром пор 40–70 нм и высокой удельной площадью поверхности. Продемонстрировано, что такие оксидные структуры обладают наибольшей фотокаталитической активностью по сравнению с образцами, полученными при других скоростях вращения электрода.

Ключевые слова: оксид вольфрама, вращающийся дисковый электрод, наноматериалы, фотокаталитические покрытия

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (Соглашение FSMR-2023-0003).

Для цитирования: Назаркина Ю. В., Шитова Д. Д., Дронов А. А., Еганова Е. М. Исследование влияния гидродинамических условий формирования на морфологию и фотокаталитические свойства анодного оксида вольфрама. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):575–585. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-575-585. EDN: YMTSVO.

© Ю. В. Назаркина, Д. Д. Шитова, А. А. Дронов, Е. М. Еганова, 2025

Original article

Research on effect of hydrodynamic conditions during anodic tungsten oxide formation on its morphology and photocatalytic properties

Yu. V. Nazarkina[1*], D. D. Shitova[1], A. A. Dronov[1], E. M. Eganova[2]

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[*] *engvel@mail.ru*

Abstract. Anodization of transition metals is an effective method for manufacturing of nanostructured oxides with a high aspect ratio, such as porous aluminum or titanium oxide. However, when synthesizing porous tungsten oxide, the formation of such layers implies difficulties due to diffusion limitations: hindered delivery of reactants and removal of reaction products during the electrochemical oxidation of tungsten. The technological modes of tungsten anodization allowing formation of porous WO_x layers with a high specific surface area are scarcely represented in the literature. Existing sources do not consider the effect of hydrodynamic conditions, including electrode rotation, on the growth kinetics of porous tungsten oxide. In this work, the effect of hydrodynamic conditions during tungsten anodization on the growth kinetics and morphology of the porous tungsten oxide WO_x using a rotating disk electrode cell is investigated. The morphology of the obtained anodic oxide layers was studied using scanning electron microscopy, and it was shown that, within the range of tungsten electrode rotation speeds of 500–750 rpm, it is possible to form porous WO_x structures with pore diameters of 40–70 nm and a high specific surface area. It has been demonstrated that such oxide structures exhibit the highest photocatalytic activity compared to samples obtained at other electrode rotation speeds.

Keywords: tungsten oxide, rotating disk electrode, nanomaterials, photocatalytic coatings

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the state assignment (Agreement FSMR-2023-0003).

For citation: Nazarkina Yu. V., Shitova D. D., Dronov A. A., Eganova E. M. Research on effect of hydrodynamic conditions during anodic tungsten oxide formation on its morphology and photocatalytic properties. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):575–585. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-575-585.

Введение. Вольфрамовые оксидные пленки широко применяются в электронной технике благодаря газочувствительным, электрохромным и фотокаталитическим свойствам (пленки поглощают излучение в видимом диапазоне длин волн) [1–6]. Эффективность газочувствительных структур и фотокатализаторов зависит от их морфологии, в том числе от удельной площади поверхности [6–8]. В связи с этим разработка мето-

дик синтеза наноструктурированного оксида вольфрама с большой удельной площадью поверхности – важная задача.

Анодирование является одним из эффективных и технологичных методов формирования наноструктурированных оксидов [9, 10]. Метод не требует создания вакуума и выдержки при высоких температурах и позволяет формировать слои оксидов, закрепленных на подложках, что облегчает их дальнейшую модификацию и транспортировку. Однако при синтезе пористого оксида вольфрама возникают сложности, в частности при формировании слоев более нескольких сотен нанометров в процессе анодирования или последующего отжига образуются трещины, что уменьшает возможность получения слоев с высокой удельной площадью поверхности [8, 11, 12]. Причины этого, предположительно, заключаются в диффузионных ограничениях: затруднен подвод реагентов и отвод продуктов реакции в процессе электрохимического окисления вольфрама [11, 12]. Решать возникающие проблемы предлагается преимущественно использованием теплых концентрированных кислот в составе электролитов, что нетехнологично и неэкологично, либо подачей тока в виде импульсов для снижения разницы между скоростью истинной электрохимической реакции и отводом продуктов реакции [11–13]. В то же время на скорость диффузии существенно влияют гидродинамические условия, такие как перемешивание раствора или вращение электрода. Варьируя их, можно добиться существенных изменений морфологии поверхности анодных оксидов, в частности увеличить удельную площадь их поверхности, что позволит улучшить функциональные характеристики слоя в фотокатализаторах или сенсорах, как это было сделано, например, для оксида титана [14, 15]. Так, в работе [16] приведены результаты анодного окисления вольфрама с использованием вращающегося дискового электрода в водных электролитах на основе H_2SO_4 с добавлением NaF и без него. Для других электролитов исследования не проводились.

Цель настоящей работы – изучение кинетики анодного окисления вольфрамового вращающегося электрода при разных скоростях вращения в электролите, состоящем из нитрата аммония NH_4NO_3, этиленгликоля и воды.

Методика формирования образцов. Вольфрамовые листы чистотой 99,99 % и толщиной 0,1 мм нарезали на подложки площадью 1 см^2. Подложки обрабатывали в ацетоне в ультразвуковой ванне в течение 10 мин для удаления органических загрязнений с поверхности. Далее образцы подвергали электрохимической полировке в течение 40 с в 2,5 М растворе NaOH, а затем промывали в деионизованной воде и сушили на воздухе.

Анодное окисление проводили в растворе, состоящем из 0,1 М NH_4NO_3, этиленгликоля $HOCH_2CH_2OH$ и 1 % H_2O. Смесь нитрата аммония – безопасный электролит для использования в промышленных масштабах. В качестве катода применяли платиновую сетку. Процесс проводили при заданной с помощью термостата Termex КРИО-ВТ-01 температуре, равной 40 °С. Платиновый электрод и вольфрамовый анод размещали на фиксированных высоте и расстоянии друг от друга. Анодирование осуществляли при напряжении 40 В в течение 120 мин. Для оценки влияния гидродинамических условий на процесс анодного окисления вольфрама использовали методику вращающегося дискового электрода. Вольфрамовый дисковый электрод помещали во фторопластовую ячейку, которую соединяли с установкой Autolab RDE. Скорость вращения электрода варьировали в диапазоне 0–1000 об./мин, что соответствует числам Рейнольдса 0–400. Таким образом, исследование влияния скорости вращения электрода проводили в условиях ламинарного потока.

Изготовленные образцы подвергали термической обработке в муфельной печи ПЛ 20 (напряжение 220 В, мощность 3 кВт) при температуре 500 °С в течение 2 ч на воздухе. Затем образцы медленно остужали.

Исследование морфологии и фотокаталитических свойств слоев анодного оксида вольфрама. Морфологию полученных слоев анодного оксида вольфрама WO_x изучали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Helios NanoLab 650. Съемку проводили при ускоряющем напряжении 5,0 кВ, токе пучка 50 пА, давлении в камере от $9{,}55 \cdot 10^{-5}$ Па до $3{,}44 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочей дистанции 4,0 мм и угле наклона 0º. Полученные РЭМ-изображения изучали с помощью программного обеспечения Fiji.

Отожженные образцы наноструктурированного оксида вольфрама опускали в раствор метиленового голубого объемом 20 мл и концентрацией 7,815 мкмоль/л. Образцы в растворе выдерживали в течение 30 мин. При этом стакан с раствором и образцом помещали в темное место, чтобы избежать фотокаталитического разложения раствора до начала измерений. Для того чтобы учесть влияние адсорбции на фотодеградацию метиленового голубого, пробы раствора измеряли с помощью спектрофотометра СФ-102 сразу после изготовления через 15 и 30 мин выдержки стакана с образцом в темноте и до начала измерений при освещении (точка 0). За 30 мин выдержки пропускание раствора переставало изменяться, затем проводили измерения фотокаталитических свойств образцов.

Образцы и раствор метиленового голубого перемещали в термостатируемый стакан объемом 100 мл. Фотокаталитическую реакцию разложения метиленового голубого под действием образцов WO_x стимулировали с использованием ксеноновой лампы мощностью 150 Вт (Newport, mod. 6255) с программируемым блоком питания Newport Power Supply 69907. В течение 1 ч каждые 15 мин измеряли пропускание аликвоты раствора метиленового голубого.

Результаты и их обсуждение. Хроноамперометрические зависимости процессов анодного окисления вольфрамового электрода при скоростях вращения 0–1000 об./мин представлены на рис. 1. На первой минуте анодного окисления наблюдается пик, обусловленный скачком тока при включении источника (так как в начальный момент времени цепь состоит только из проводящих элементов) и последующим резким спадом тока в связи с появлением резистивного слоя WO_x (E_g = 2,8 эВ) в ходе электрохимической реакции. Далее по мере проведения процесса анодного окисления ток снова начинает возрастать, что может свидетельствовать о постепенном растворении барьерного слоя оксида. Наибольшее значение тока отмечается при вращении электрода со скоростью 500 об./мин, а наименьший повторный максимум – при 150 об./мин. На *I*–*t*-кривых, полученных для анодных процессов, проводимых при скоростях вращения электрода 150 и 500 об./мин, наблюдаются осцилляции и некоторое снижение тока. Это может быть обусловлено образованием «горящих точек» – локальных участков в области анодного окисления, в которых происходит пробой оксидной пленки вследствие спонтанной локализации тока и последующего ускоренного расхода металла (в рассматриваемом случае вольфрама) [17, 18].

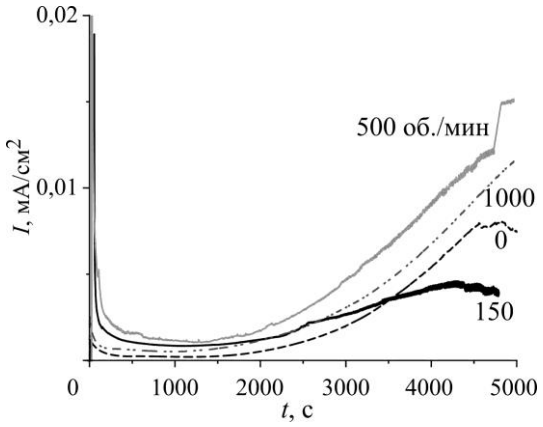


Рис. 1. Хроноамперометрическая зависимость процессов анодного окисления вольфрамового электрода при скоростях вращения 0–1000 об./мин

Fig. 1. Chronoamperometric curve of the tungsten electrode rotation rates of 0–1000 rpm

Данные предположения подтверждаются результатами РЭМ (рис. 2). Установлено, что, когда электрод не вращается, поверхность WO_x равномерно окисляется. Однако при длительном анодном окислении или в процессе отжига оксид растрескивается. Трещины на поверхности образцов выявляются как на РЭМ-изображениях, так и визуально (рис. 2, *а*). Это может быть обусловлено низкой скоростью растворения оксида, из-за чего слои WO_x имеют низкую пористость, недостаточную для снижения механических напряжений в растущем слое. При вращении электрода со скоростями 150–1000 об./мин формируются слои WO_x с более выраженной пористой структурой. Трещины не образуются, но обнаружены области «горящих точек» (рис. 2, *б–г*). Это области, более глубоко протравленные, с отличающейся от «негорящей» области морфологией.

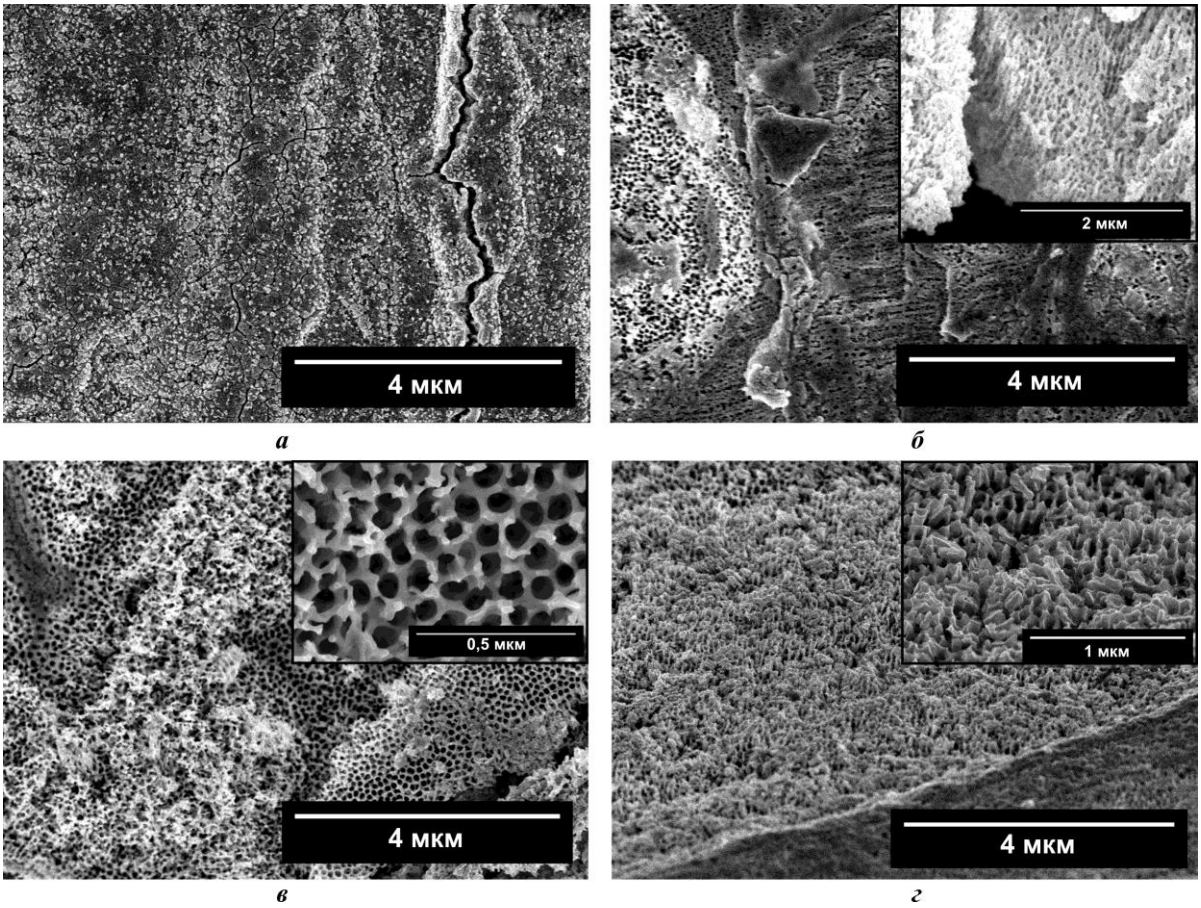


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности образцов анодного WO_x, полученных при разных скоростях вращения электрода, об./мин: 0 (*а*); 150 (*б*); 500 (*в*); 1000 (*г*). Вставки – укрупненные изображения областей «горящих точек»

Fig. 2. SEM images of the surface of anodic WO_x samples, obtained at various electrode rotation rate, rpm: 0 (*a*); 150 (*b*); 500 (*c*); 1000 (*d*). Insets show magnified images of “burning” areas

Важно отметить, что в областях «горящих точек» WO_x имеет пористую структуру с цилиндрическими порами, расположенными перпендикулярно поверхности подложки (см. рис. 2). Диаметр пор варьируется от 50 до 90 нм. Таким образом, в областях «го-

рящих точек» формируется упорядоченная мезопористая структура с высокой удельной площадью поверхности. Это коррелирует с результатами исследований «горящих точек» на пористом оксиде алюминия [19]. Установлено, что анодное окисление при условиях, близких к условиям горения, позволяет формировать наиболее упорядоченные пористые структуры и при недеструктивном «горении» в областях «горящих точек» формируются упорядоченные пористые оксиды. Такая пористая структура позволяет пропускать жидкости, например, с крупными органическими молекулами, что может быть перспективно для фото- и электрокаталитических применений.

Несмотря на то что общую площадь областей «горящих точек» и их долю в общей площади образца точно определить проблематично ввиду трудоемкости такого исследования методом РЭМ, можно констатировать следующее: количество «горящих точек» и площадь таких областей напрямую коррелируют со скоростью вращения дискового электрода. При низких скоростях вращения электрода «горящие» области локализуются на небольшой площади, однако происходит локальное сквозное травление металлической подложки (обнаружены при скорости 150 об./мин, рис. 2, *б*). С увеличением скорости вращения области «горящих точек» распространяются на площади порядка нескольких десятков квадратных микрометров, но при этом сквозного травления фольги не происходит (рис. 2, *в–г*).

С увеличением скорости вращения диаметр оксидных ячеек в областях «горящих точек» становится немного меньше с увеличением скорости вращения электрода. Диаметр пор растет из-за уменьшения толщины стенок пористой структуры, вероятно, вследствие увеличения скорости химического травления. При вращении 1000 об./мин усиление химического травления образца приводит к разрушению пористых стенок и структура надламывается.

В областях вне «горящих точек» WO_x пористый, поры расположены без выраженной симметрии. В образцах, полученных без вращения электрода, пористая структура имеет губчатую морфологию. С увеличением скорости вращения электрода пористая структура приобретает форму, близкую к цилиндрической, а диаметр пор увеличивается от (17 ± 4) до 35–40 нм (рис. 3).

При рассмотрении боковых срезов сформированных образцов WO_x выявлено, что с увеличением скорости вращения дискового электрода растет толщина оксидного слоя (рис. 4). Это, очевидно, должно происходить в областях «горящих точек» ввиду увеличения расхода металла из-за локализации тока [17, 18]. Однако обычно образование «горящих точек» приводит к уменьшению толщины пористых слоев вне областей горения [18]. В исследуемом процессе наблюдается рост пористого слоя и в областях вне «горящих точек»: толщина оксидного слоя увеличивается начиная с 400 нм без вращения электрода до 1100 нм при вращении электрода со скоростью 1000 об./мин. Это обусловлено не только увеличением тока в определенной локальной зоне реакции, но и ускорением реакции образования оксида в целом. Таким образом, общий рост толщины WO_x может свидетельствовать о том, что лимитирующей стадией анодного окисления вольфрама является диффузия исходных реагентов в зону реакции и/или отвод продуктов реакции электрохимического окисления вольфрама. Увеличение скорости вращения вольфрамового дискового электрода приводит к более интенсивной диффузии компонентов электрохимической системы и, следовательно, к ускорению электрохимической реакции.

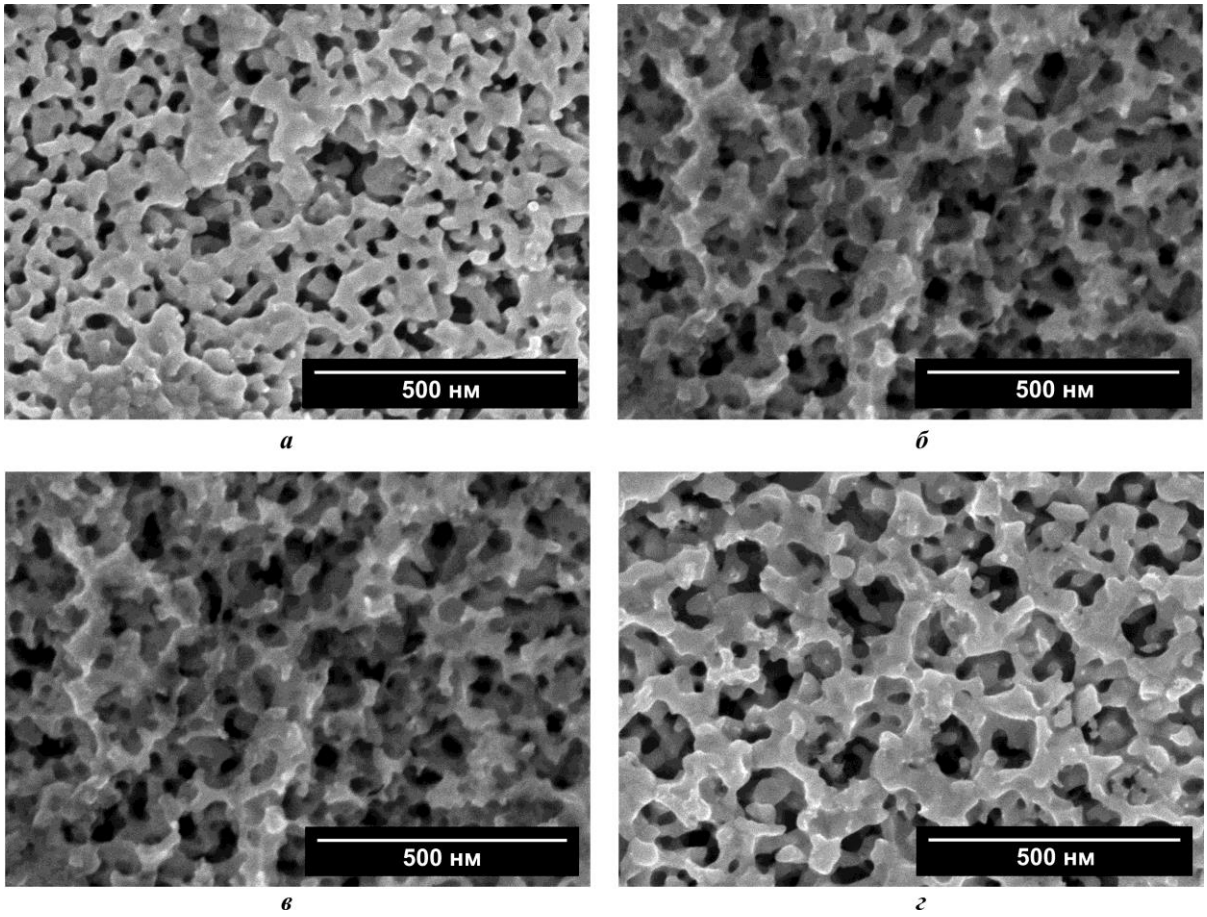


Рис. 3. РЭМ-изображения вне «горящих точек» поверхности образцов анодного WO_x, сформированных при разных скоростях вращения электрода, об./мин: 0 (*а*); 150 (*б*); 500 (*в*); 1000 (*г*)
Fig. 3. SEM images of the surface in "nonburning" areas, obtained for anodic WO_x samples formed at various electrode rotation rate, rpm: 0 (*a*); 150 (*b*); 500 (*c*); 1000 (*d*)

Исходя из РЭМ-изображений боковых срезов образцов можно установить, что слои анодного WO_x состоят из двух подслоев: нижнего, более плотного и губчатого, и верхнего пористого слоя. С увеличением скорости вращения вольфрамового электрода растет толщина обоих подслоев, но толщина нижнего подслоя в данном случае увеличивается значительнее (от 300 до 850 нм) относительно верхнего слоя (от 100 до 250 нм). При скорости вращения 500 об./мин и более общая толщина оксида и толщина пористого слоя практически постоянны. Это может быть связано с тем, что при высоких скоростях вращения, с одной стороны, увеличивается скорость электрохимической реакции, с другой стороны, увеличивается площадь областей «горящих точек». Это приводит к тому, что заряд преимущественно расходуется на электрохимические реакции в «горящих точках».

На рис. 5 представлены результаты исследования фотокаталитических свойств полученных образцов пористого WO_x. Для всех образцов зафиксировано более активное снижение концентрации метиленового голубого по сравнению с разложением при отсутствии фотокатализаторов. При этом наименьшей фотокаталитической активностью обладают образцы, полученные без вращения электрода, а наибольшей – образцы, полученные при скорости вращения 500 и 750 об./мин.

Результаты измерений геометрических параметров образцов анодного WO_x и их фотокаталитической активности приведены в таблице.

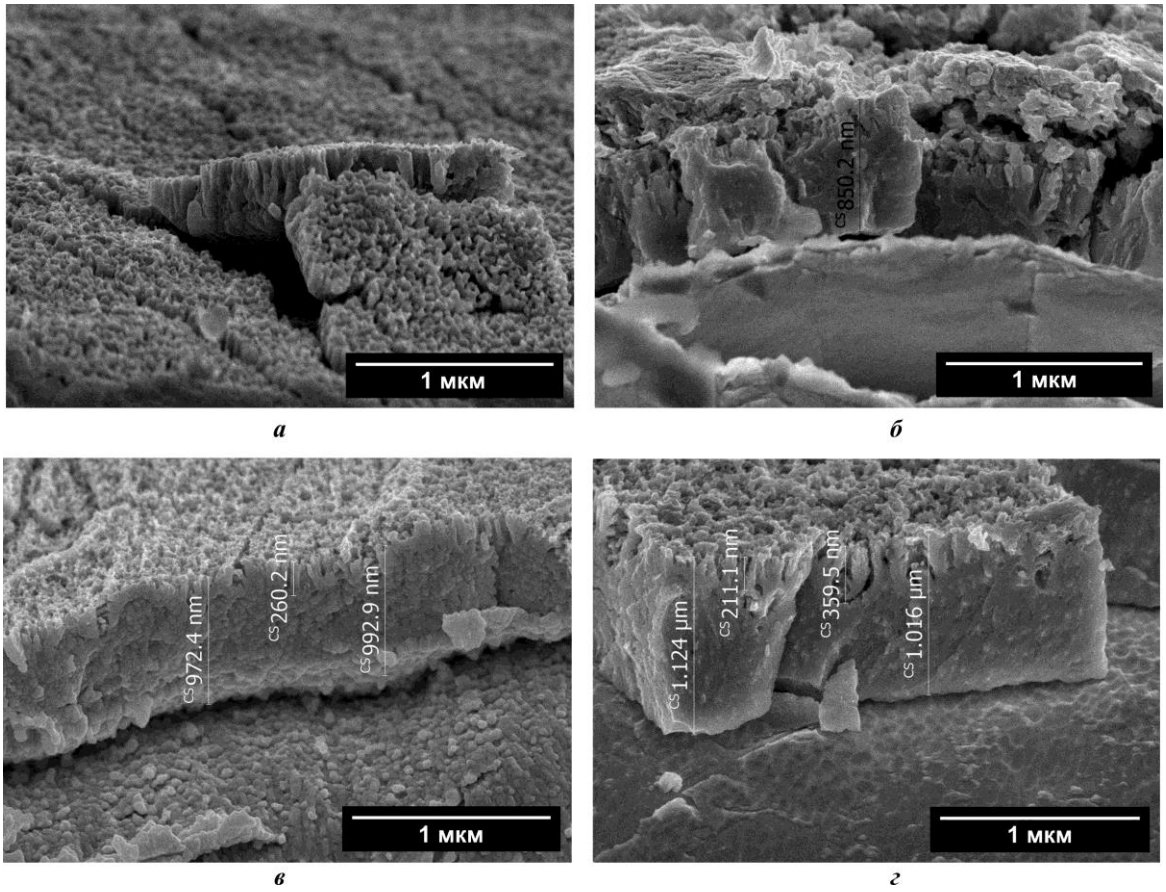


Рис. 4. РЭМ-изображения боковых сколов образцов анодного WO_x, сформированных при разных скоростях вращения электрода, об./мин: 0 (*а*); 150 (*б*); 500 (*в*); 1000 (*г*)

Fig. 4. Cross section SEM images of anodic WO_x samples, formed at various electrode rotation rate, rpm: 0 (*a*); 150 (*b*); 500 (*c*); 1000 (*d*)

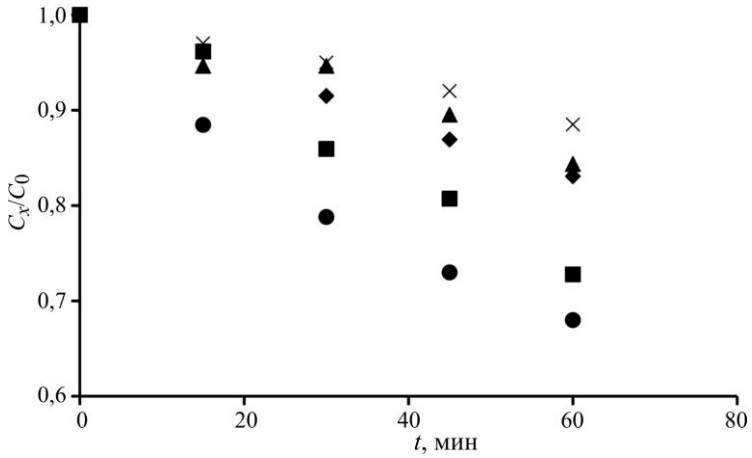


Рис. 5. Зависимость разложения метиленового голубого при температуре фотокатализа 20 °С и наличии фотокатализаторов (слоев анодного WO_x), изготовленных при разных скоростях вращения электрода, об./мин: 0 (×); 150 (♦); 500 (■); 750 (●); 1000 (▲); C_0 – концентрация раствора в начале процесса фотокатализа, C_x – концентрация раствора в момент времени t_i

Fig. 5. Dependence of methylene blue degradation at a photocatalysis temperature of 20 °C in the presence of photocatalysts (anodic WO_x layers) fabricated at various electrode rotation rate, rpm: 0 (×); 150 (♦); 500 (■); 750 (●); 1000 (▲); C_0 – solution concentration in the beginning of photocatalytic process, C_x – solution concentration at duration t_i

Значения геометрических параметров и константы фотодеградации образцов анодного WO_x, полученных при разных скоростях вращения вольфрамового электрода

Values of the geometric parameters and photodegradation constants determined for anodic WO_x samples obtained at various rotation rate of the tungsten electrode

Скорость вращения, об./мин	Число Рейнольдса	Диаметр пор, нм	Диаметр пор в области «горящих точек», нм	Толщина пористого слоя, мкм	Общая толщина слоя WO_x, мкм	Константа фотодеградации метиленового голубого
0	0	17 ± 4	–	105 ± 20	420 ± 50	0,0009
150	60	23 ± 5	51 ± 2	175 ± 20	850 ± 50	0,0031
500	200	40 ± 5	76 ± 5	260 ± 30	980 ± 60	0,0075
750	300	35 ± 5	78 ± 5	250 ± 50	970 ± 60	0,0061
1000	400	38 ± 7	79 ± 6	250 ± 50	1090 ± 60	0,0020

Как видно из таблицы, фотокаталитическая активность образцов коррелирует с толщиной оксида вне «горящих точек». В то же время при скорости вращения 1000 об./мин константа деградации снижается. Это может быть обусловлено тем, что влияние на константу деградации оказывает и площадь поверхности в области «горящих точек». Несмотря на то что площадь участков слоя WO_x, занятая «горящими точками», больше у образцов, полученных при скорости вращения 1000 об./мин, пористая структура в этих областях оказывается разрушенной из-за интенсивного растворения стенок. Таким образом, константа фотодеградации метиленового голубого пропорциональна удельной площади поверхности, наибольшей при скорости вращения 500 об./мин.

Заключение. В результате исследования влияния скорости вращения дискового вольфрамового электрода на кинетику роста, морфологию оксида и фотокаталитические свойства анодного WO_x установлено, что вращение способствует ускорению диффузии компонентов электролита в зоне реакции. Это приводит к увеличению скорости как электрохимического окисления вольфрама, так и растворения оксида вольфрама. При скоростях вращения электрода 150–750 об./мин увеличение скорости диффузионных процессов позволяет получить слои пористого WO_x по всей площади окисляемой поверхности без образования трещин. Кроме того, скорость роста оксида увеличивается и наблюдаются области «горящих точек» с высокой удельной площадью поверхности и диаметром пор порядка 80 нм, что позитивно влияет на фотокаталитические свойства WO_x, в частности увеличивается константа фотодеградации метиленового голубого при наличии образцов WO_x. При скорости вращения 1000 об./мин и более увеличение скорости химического травления оксида приводит к разрушению пористой структуры и снижению фотокаталитической активности из-за уменьшения удельной площади поверхности образцов.

Литература / References

1. Li Y., Zhou W., Li D., Xu J. Multifunctional non-stoichiometric tungsten oxides: Synthesis, properties and application. *J. Power Sources.* 2025;631:236222. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236222
2. Zheng H., Ou J. Z., Strano M. S., Kaner R. B., Mitchell A., Kalantar-zadeh K. Nanostructured tungsten oxide – properties, synthesis, and applications. *Adv. Funct. Mater.* 2011;21(12):2175–2196. https://doi.org/10.1002/adfm.201002477

3. Bignozzi C. A., Caramori S., Cristino V., Argazzi R., Meda L., Tacca A. Nanostructured photoelectrodes based on WO_3: Applications to photooxidation of aqueous electrolytes. *Chem. Soc. Rev.* 2013;42(6):2228–2246. https://doi.org/10.1039/C2CS35373C
4. Li X., Fu L., Karimi-Maleh H., Chen F., Zhao S. Innovations in WO_3 gas sensors: Nanostructure engineering, functionalization, and future perspectives. *Heliyon.* 2024;10(6):e27740. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27740
5. Syrek K., Wierzbicka E., Zych M., Piecha D., Szczerba M., Sołtys-Mróz M. et al. Band gap engineering of tungsten oxide-based nanomaterials. *J. Photochem. Photobiol. C.* 2025;62:100681. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2024.100681
6. Caramori S., Cristino V., Meda L., Tacca A., Argazzi R., Bignozzi C. A. Efficient anodically grown WO_3 for photoelectrochemical water splitting. *Energy Procedia.* 2012;22:127–136. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.214
7. Lai C. W. WO_3 nanoplates film: Formation and photocatalytic oxidation studies. *J. Nanomater.* 2015;2015:563587. https://doi.org/10.1155/2015/563587
8. Tacconi N. R. de, Chenthamarakshan C. R., Yogeeswaran G., Watcharenwong A., Zoysa R. S. de, Basit N. A., Rajeshwar K. Nanoporous TiO_2 and WO_3 films by anodization of titanium and tungsten substrates: Influence of process variables on morphology and photoelectrochemical response. *J. Phys. Chem. B.* 2006;110(50):25347–25355. https://doi.org/10.1021/jp064527v
9. Brzózka A., Brudzisz A., Rajska D., Bogusz J., Palowska R., Wójcikiewicz D., Sulka G. D. Chapter two – Recent trends in synthesis of nanoporous anodic aluminum oxides. In: *Nanostructured anodic metal oxides: Synthesis and applications.* Ed. G. D. Sulka. Amsterdam: Elsevier; 2020, pp. 35–88. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816706-9.00002-9
10. Grimes C. A., Mor G. K. Fabrication of TiO_2 nanotube arrays by electrochemical anodization: Four synthesis generations. In: Grimes C. A., Mor G. K. *TiO_2 nanotube arrays.* Boston, MA: Springer; 2009, pp. 1–66. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0068-5_1
11. Yang M., Shrestha N. K., Schmuki P. Thick porous tungsten trioxide films by anodization of tungsten in fluoride containing phosphoric acid electrolyte. *Electrochem. Commun.* 2009;11(10):1908–1911. https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.08.014
12. Nazarkina Y., Rusakov V., Salnikov A., Dronov A., Dronova D. Influence of anodic oxidation and post-processing conditions on the morphology and photocatalytic properties of nanostructured WO_3 layers. In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2019; pp. 1951–1955. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657293
13. Lu H., Yan Y., Zhang M., Tan H., Geng P., Le S. et al. The effects of adjusting pulse anodization parameters on the surface morphology and properties of a WO_3 photoanode for photoelectrochemical water splitting. *J. Solid State Electrochem.* 2018;22:2169–2181. https://doi.org/10.1007/s10008-018-3911-5
14. Sánchez-Tovar R., Paramasivam I., Lee K., Schmuki P. Influence of hydrodynamic conditions on growth and geometry of anodic TiO_2 nanotubes and their use towards optimized DSSCs. *J. Mater. Chem.* 2012;22(25):12792–12795. https://doi.org/10.1039/C2JM31246H
15. Sánchez-Tovar R., Fernández-Domene R. M., García-García D. M., García-Antón J. Enhancement of photoelectrochemical activity for water splitting by controlling hydrodynamic conditions on titanium anodization. *J. Power Sources.* 2015;286:224–231. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.174
16. Fernández-Domene R. M., Sánchez-Tovar R., Segura-Sanchís E., García-Antón J. Novel tree-like WO_3 nanoplatelets with very high surface area synthesized by anodization under controlled hydrodynamic conditions. *Chem. Eng. J.* 2016;286:59–67. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.069
17. Patermarakis G., Kapiris G. Processes, parameters and mechanisms controlling the normal and abnormal growth of porous anodic alumina films. *J. Solid State Electrochem.* 2013;17:1133–1158. https://doi.org/10.1007/s10008-012-1976-0
18. Aerts T., De Graeve I., Terryn H. Study of initiation and development of local burning phenomena during anodizing of aluminium under controlled convection. *Electrochim. Acta.* 2008;54(2):270–279. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.08.004
19. Ono S., Saito M., Asoh H. Self-ordering of anodic porous alumina induced by local current concentration: Burning. *Electrochem. Solid-State Lett.* 2004;7(7):B21. https://doi.org/10.1149/1.1738553

Информация об авторах

Назаркина Юлия Валерьевна – старший преподаватель, младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), engvel@mail.ru

Шитова Дарья Дмитриевна – студентка, лаборант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), shitova.miet@bk.ru

Дронов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий, проректор по научной работе Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), noiz@mail.ru

Еганова Елена Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела микро- и наноэлектроники и биосенсорики Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А, стр. 11), eganovaem@mail.ru

Information about the authors

Yulia V. Nazarkina – Senior Lecturer, Junior Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), engvel@mail.ru

Darya D. Shitova – Student, Laboratory Assistant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), shitova.miet@bk.ru

Aleksey A. Dronov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, Vice-Rector for Scientific Work, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), noiz@mail.ru

Elena M. Eganova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Micro- and Nanoelectronics and Biosensorics Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16A, bld. 11), eganovaem@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 17.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 28.03.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES

Научная статья
УДК 004.9
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-586-596
EDN: XEWUED

Предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники с учетом стохастических факторов

Л. Г. Гагарина[1], Ю. С. Шевнина[1*], М. Ю. Семенов[2], С. Ф. Царапкин[1], Е. И. Минаков[3]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]ООО «НМ-Тех», г. Москва, Россия
[3]Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

[*] *yusm@rambler.ru*

Аннотация. Прогнозирование поведения производственных процессов микроэлектроники с высокой степенью неопределенности и вариативности условий требует применения гибких и адаптивных подходов. Исследование предиктивных моделей, которые учитывают стохастические факторы, влияющие на эффективность и качество производственных процессов микроэлектроники, – актуальная задача. В работе рассмотрены вопросы повышения степени адекватности предиктивных моделей, способных учитывать стохастические факторы в производственных процессах микроэлектроники. Полученные на основе стохастических дифференциальных систем предиктивные модели позволяют учитывать множество параметров, их нелинейность и взаимное влияние. Для моделирования процессов фотолитографии предложено использовать линейные стохастические дифференциальные системы, для процессов травления – билинейные стохастические дифференциальные системы. Для оценки устойчивости производственного процесса разработана предиктивная модель на основе уравнений Лурье. Дан прогноз поведения динамических систем случайной структуры, примером которых являются современные ИС и системы на кристалле. Показана необходимость интеграции стохастических подходов в процессы моделирования производственных процессов микроэлектроники, что позволит значительно повысить эффективность управления производством в условиях неопределенности и качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: предиктивные модели, производственные процессы, стохастические факторы, стохастические дифференциальные системы, марковские процессы

© Л. Г. Гагарина, Ю. С. Шевнина, М. Ю. Семенов, С. Ф. Царапкин, Е. И. Минаков, 2025

Для цитирования: Гагарина Л. Г., Шевнина Ю. С., Семенов М. Ю., Царапкин С. Ф., Минаков Е. И. Предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники с учетом стохастических факторов. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5): 586–596. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-586-596. EDN: XEWUED.

Original article

Predictive models of microelectronics manufacturing processes with account for stochastic factors

L. G. Gagarina[1], Yu. S. Shevnina[1*], M. Yu. Semenov[2], S. F. Tsarapkin[1], E. I. Minakov[3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]NM-Tech LLC, Moscow, Russia
[3]Tula State University, Tula, Russia

[*] *yusm@rambler.ru*

Abstract. The prediction of behavior of microelectronics manufacturing processes with a high degree of uncertainty and variability of conditions requires the use of flexible and adaptive approaches. Studying predictive models that account for stochastic factors affecting the efficiency and quality of microelectronics manufacturing processes is a critical task. In this work, the issues of enhancing adequacy of a predictive model capable to account for stochastic factors in microelectronics manufacturing processes are considered. Predictive models obtained on the basis of stochastic differential systems make it possible to account for many parameters, their nonlinearities and mutual influence. It is proposed to use linear stochastic differential systems for simulating photolithography processes, and bilinear stochastic differential systems for etching processes. A predictive model based on the Lurie equations has been developed to assess the production process stability. The issues of predicting the behavior of dynamic systems of random structure, the examples of which are modern ICs and systems on a chip, were considered. The need to integrate stochastic approaches into the simulation of microelectronics production processes is demonstrated: this would allow significant increase in efficiency of production management under uncertainty and in the quality of manufactured products.

Keywords: predictive models, production processes, stochastic factors, stochastic differential systems, Markov processes

For citation: Gagarina L. G., Shevnina Yu. S., Semenov M. Yu., Tsarapkin S. F., Minakov E. I. Predictive models of microelectronics manufacturing processes with account for stochastic factors. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):586–596. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-586-596.

Введение. В условиях современного производства микроэлектроники учет стохастических факторов – одна из важных составляющих при разработке эффективных предиктивных моделей как процесса в целом, так и отдельных операций. Актуальность исследования обусловлена высокой степенью неопределенности, присущей производственным процессам, особенно подверженным влиянию случайных факторов, таких

как колебания температуры, вариации качества сырья и изменения технологических параметров. Как правило, такие стохастические факторы приводят к существенному снижению качества продукции и увеличению материальных затрат. В частности, даже незначительные отклонения в температурном режиме вызывают дефекты в полупроводниках, что негативно сказывается на выходе и надежности конечной продукции [1, 2].

Существующие методы учета стохастических факторов, как правило, основываются на детерминированных моделях, в результате ограничивается их способность адекватно отражать реальную динамику производственных процессов. Эти подходы не всегда учитывают взаимодействие разных стохастических переменных, что вызывает недооценку рисков и неопределенности.

В настоящей работе рассматриваются способы повышения степени адекватности предиктивных моделей, способных учитывать стохастические факторы в производственных процессах микроэлектроники.

Постановка задачи. Предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники должны отражать действие разных случайных факторов (рис. 1). Рассмотрим предиктивные модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнений в конечных разностях. При учете указанных стохастических факторов в этих уравнениях появляются случайные функции.

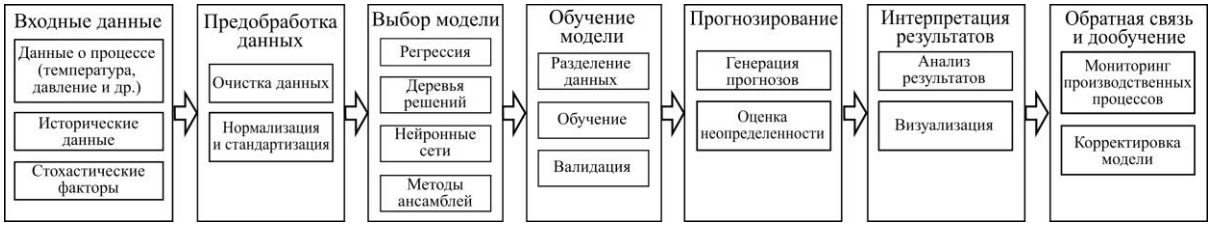


Рис. 1. Структура предиктивной модели производственного процесса
Fig. 1. Structure of the predictive model of manufacturing process

Введем следующие обозначения: $x(t)=\left[x_1(t)x_2(t)\ldots x_n(t)\right]'$ – вектор состояния производственного процесса микроэлектроники; $u(t)=\left[u_1(t)u_2(t)\ldots u_k(t)\right]'$ – векторный входной сигнал процесса; $y(t)=\left[y_1(t)y_2(t)\ldots y_m(t)\right]'$ – векторный выходной сигнал процесса. Таким образом, дифференциальное уравнение, описывающее поведение производственного процесса, в общем случае имеет вид

$$\dot{x}(t)=f(x,u,t),\ y(t)=g(x,t), \tag{1}$$

где f – n-мерная векторная функция векторных аргументов x, u и времени t; g – m-мерная векторная функция векторного аргумента x и времени t. Вектор состояния, векторы входных и выходных сигналов являются конечномерными.

При учете стохастических факторов предиктивная модель производственного процесса следующая:

$$\dot{X}=F(X,U,t),\ Y=G(X,t), \tag{2}$$

где F и G – случайные функции.

Вследствие случайности правых частей уравнения (2) и, возможно, входного сигнала $U(t)$ и начального состояния $X_0 = X(t_0)$ вектор состояния производственного процесса $X(t)$ и выходной сигнал $Y(t)$ в каждый фиксированный момент времени t представляют собой случайные величины. В каждой итерации производственного процесса случайные функции F и G реализуются в виде конкретных (неслучайных) функций, которые соответствуют реализации $x(t)$ и $y(t)$, определяемых уравнением (1). Следовательно, для построения адекватных предиктивных моделей производственных процессов микроэлектроники из общей модели (2) необходимо выделить наиболее характерные классы состояний процесса. Для этого введем ограничение, при котором все неопределенные величины в правой части уравнения считаются случайными функциями времени. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\dot{X} = f\left(X, U, V_1(t), t\right),\ Y = g\left(X, V_2(t), t\right), \tag{3}$$

где f и g – детерминированные функции, в число аргументов которых входят случайные функции времени $V_1(t)$ и $V_2(t)$. Начальный вектор состояния является случайной величиной, независимой от случайных функций $V_1(t)$ и $V_2(t)$.

Линейные стохастические предиктивные модели производственных процессов. Рассмотрим процесс фотолитографии, используемый для создания микросхем и других полупроводниковых устройств. Определим стохастические параметры, оказывающие наибольшее влияние на процесс фотолитографии: температура, влажность, световая интенсивность, время экспонирования и качество исходных материалов. Даже незначительные изменения температуры влияют на скорость реакции и свойства материалов, что приводит к неоднородности при нанесении фоторезиста и его экспонировании. Высокая влажность негативно сказывается на адгезии фоторезиста и его свойствах, это является одной из причин дефектов в структуре микросхем. Переменная световая интенсивность предполагает недостаточное или избыточное экспонирование, отражающееся на качестве рисунка микросхемы. Изменения во времени экспонирования влекут за собой изменения в структуре фоторезиста. Различия в качестве исходных материалов влияют на характеристики процесса, такие как реакция на свет.

Для моделирования процесса фотолитографии возможно использование линейных стохастических предиктивных моделей (ЛСПМ), поскольку они учитывают влияние разных факторов с разделением на этапы процесса [3, 4]. Кроме того, ЛСПМ учитывают вариации случайных параметров и предсказывают их влияние на конечный результат. С увеличением объемов данных, собираемых в процессе фотолитографии, ЛСПМ могут быть применены для анализа этих данных и выявления закономерностей. Это позволяет не только улучшить текущие процессы, но и сделать выводы для дальнейших разработок и технологий.

ЛСПМ с аддитивными воздействиями на входе и выходе обычно называется линейной стохастической дифференциальной системой. Такая система осуществляет линейное детерминированное преобразование случайных сигналов, ее математическое представление имеет вид

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DV_1(t),\ Y(t) = CX(t) + EV_2(t), \tag{4}$$

где $X(t)$ – n-мерный вектор состояния; $U(t)$ – k-мерный входной вектор; $Y(t)$ – m-мерный выходной вектор; $V_1(t)$ и $V_2(t)$ – векторы случайных воздействий на входе

и выходе системы размерностей n_1 и n_2; A, B, C, D, E – матрицы соответствующих размеров.

Отметим, что если все указанные матрицы или некоторые из них зависят от времени, то, как и в детерминированном случае, состояния производственного процесса могут быть нестационарными. Если все указанные матрицы постоянные, то и процесс стационарный.

Роль модели (4) состоит в следующем. Во многих практических задачах отклонения нелинейной модели (3) от заданного режима полагают незначительными. В этом случае уравнения предиктивной модели можно линеаризовать относительно малых отклонений от заданного режима и относительно действующих на процесс стохастических воздействий. Переменные в уравнении (4) представляют собой отклонения от заданного номинального режима работы системы (3), а также влияние случайных возмущений на нормальный режим с помощью более простой ЛСПМ производственного процесса микроэлектроники.

Билинейные стохастические предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники. Один из этапов в производстве полупроводниковых устройств – травление. Рассмотрим данный процесс с точки зрения стохастических воздействий. Неправильная концентрация химических реагентов приводит к недостаточному или избыточному травлению, вследствие чего меняется структура и размеры элементов. Изменение температуры меняет скорость реакции, что, в свою очередь, меняет глубину и однородность травления. Давление в камере травления влияет на скорость и равномерность травления, а также на образование побочных продуктов. Наличие дефектов на подложке способствует неоднородному травлению и образованию нежелательных структур.

Очевидно, что в процессе травления взаимодействуют несколько стохастических параметров и изменение одного параметра оказывает нелинейное влияние на другие. Следовательно, для моделирования поведения процесса травления могут быть использованы билинейные стохастические предиктивные модели (БСПМ). Билинейные модели эффективно обрабатывают вариации в данных, что повышает уровень точности прогноза результатов процесса даже при наличии шумов и неопределенности [5, 6].

БСПМ представляют собой линейные модели, в которых случайные воздействия линейно зависят от векторов состояния, входа или выхода. В таких случаях для описания производственного процесса используются линейные предиктивные модели со случайно изменяющимися коэффициентами. Быстрые флуктуации коэффициентов называют параметрическими шумами.

Запишем уравнение БСПМ:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + DV_1 + \sum_{i=1}^{n_3} A_i X V_{3i} + \sum_{i=1}^{n_4} B_i U V_{4i}, \\ Y &= CX + EV_2 + \sum_{i=1}^{n_5} C_i X V_{5i} + \sum_{i=1}^{n_6} E_i Y V_{6i}, \end{aligned} \tag{5}$$

где $V_1(t),...,V_6(t)$ – векторы случайных воздействий размерностей $n_1,...,n_6$; A_i $(i=1,2,...,n_3)$, B_i $(i=1,2,...,n_4)$, C_i $(i=1,2,...,n_5)$, E_i $(i=1,2,...,n_6)$ – матрицы соответствующих размеров, элементы которых в общем случае зависят от времени.

Для решения уравнения (5) рассмотрим маятниковую систему с подвижным подвесом, на ось которого действуют случайные факторы (в частности, вибрации основания), схематично представленную на рис. 2

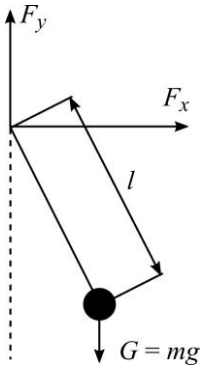


Рис. 2. Схематичное изображение маятниковой системы с подвижным подвесом
Fig. 2. Schematic representation of pendulum system with a movable suspension

К маятнику приложены $J\ddot{\beta}$ – инерционный момент (J – момент инерции маятника относительно подвеса); $k\dot{\beta}$ – момент сопротивления среды (k – коэффициент демпфирования); $Gl\sin\beta = mgl\sin\beta$ – момент силы тяжести; $F_x l\cos\beta$ и $F_y l\sin\beta$ – моменты случайных сил, действующих на подвес по осям x и y. Тогда согласно принципу Д'Аламбера условия равновесия моментов $J\ddot{\beta}+k\dot{\beta}+\left(G+F_y\right)l\sin\beta+F_x l\cos\beta=0$. Используя обобщенные параметры: частоту собственных недемпфированных колебаний $\omega_0=\sqrt{\dfrac{Gl}{J}}$, коэффициент затухания $\xi=\dfrac{k}{2\sqrt{GlJ}}$ и приведенные случайные угловые ускорения $V(t)=\dfrac{F_y l}{J}$ и $N(t)=\dfrac{F_x l}{J}$, – получаем $\ddot{\beta}+2\xi\omega_0\dot{\beta}+\left(\omega_0^2+V(t)\right)\sin\beta+N(t)\cos\beta=0$. При малых углах β модель линейного приближения следующая: $\ddot{\beta}+2\xi\omega_0\dot{\beta}+\left(\omega_0^2+V(t)\right)\beta+N(t)=0$. Переходя к системе уравнений, окончательно имеем $\dot{X}_2=-\omega_0^2X_1-2\xi\omega_0X_2-X_1V(t)-N(t)$, где $X_1=\beta$, $X_2=\dot{\beta}$.

Таким образом, БСПМ учитывают не только прямые влияния стохастических параметров, но их взаимозависимости. Кроме того, данные модели эффективно обрабатывают вариации в исходных данных, что, в свою очередь, повышает точность прогноза поведения процесса даже при наличии шумов и неопределенности.

Стохастические предиктивные модели производственных процессов на основе уравнений Лурье. При моделировании производственных процессов микроэлектроники важен анализ их устойчивости. Стохастические возмущения являются одной из причин дефектов в конечных продуктах, таких как неполное травление, неправильное формирование слоев или неравномерное распределение примесей. Это приводит к снижению выхода годной продукции. Применение уравнений Лурье позволяет оценить реакцию процесса на случайные изменения в параметрах, предсказать вероятность возникновения дефектов и их влияние на качество продукции [7, 8].

В задаче абсолютной стохастической устойчивости $\dot{X}=AX+BU+DV_1+$ $+\sum_{i=1}^{n_2}A_iXV_{2i}+\sum_{i=1}^{n_3}B_iUV_{3i}$, $Y=CX$, здесь $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$ – векторы случайных воздействий размерностей n_1, n_2, n_3,

$$u=f(y,t), \tag{5}$$

где $f(y,t)$ – нелинейная функция, элементы которой удовлетворяют условиям

$$K_i > 0,\ f_i(0,t) = 0,\ i = 1,2,...,k. \qquad (6)$$

Наряду с условиями (6) возможны ограничения на производные $\partial f_i(y_i,t)/\partial y_i$ и более общий вид ограничений, формализуемых в форме так называемой квадратичной связи $G(x,u) \le 0$, где $G(x,u)$ – вещественная квадратичная форма переменных x и u.

Таким образом, использование уравнений Лурье для оценки устойчивости производственного процесса микроэлектроники позволяет учитывать стохастические факторы и улучшать контроль качества на разных этапах производства.

Стохастические предиктивные модели производственных процессов микроэлектроники случайной структуры. Системами случайной структуры в производственных процессах микроэлектроники являются ИС, особенно в мобильных устройствах и системах на кристалле, которые имеют сложное управление питанием с зависимым от текущих задач и от состояния устройства потреблением энергии. Переключение между режимами работы происходит в случайные моменты времени при изменении внешних условий. Скачкообразные изменения режимов работы, как правило, приводят к непредсказуемым колебаниям в потреблении энергии и производительности. При этом система должна адаптироваться к подобным скачкам, обеспечивая стабильную работу в разных условиях.

В настоящей работе ограничимся относительно частным, но имеющим широкое распространение в практических задачах видом стохастической предиктивной модели случайной структуры. Согласно классификации подобные модели называются моделями с независимыми распределенными переходами и могут быть описаны дифференциальными уравнениями вида

$$\dot{X}(t) = A(X(t), i(t), t) + B(X(t), i(t), t)V_1(t),$$
$$Y(t) = C(X(t), i(t), t) + D(X(t), i(t), t)V_2(t),$$

где $X(t)$ – n-мерный вектор состояния; $Y(t)$ – m-мерный вектор выхода; $V_1(t)$ и $V_2(t)$ – k-мерный и l-мерный векторы случайных возмущений; $A(X,i,t)$, $B(X,i,t)$, $C(X,i,t)$, $D(X,i,t)$ – неслучайные матричные функции размеров $n \times l$, $n \times k$, $m \times l$, $m \times l$; $i(t)$ – однородная марковская цепь с дискретным случайным пространством состояний $S = \{1,2,...,s\}$ и матрицей вероятностей перехода $P(\tau) = \left[P_{ij}(\tau)\right]_1^s = \left[P(i(t+\tau) = j \mid i(t) = i)\right]_1^s = e^{Q\tau}$, здесь $Q = \left[q_{ij}\right]_1^s$ и выполняются соотношения $q_{ij} \ge 0$, $j \ne i$, $q_{ij} = -\sum_{j \ne i}^{s} q_{ij}$.

В зависимости от $i(t)$ могут изменяться не только параметры, но и размерности некоторых переменных, в частности число входных переменных m.

Стационарные и однородные модели. На основании изложенного возможно моделирование с учетом стохастических воздействий отдельных технологических операций производственного процесса. Особенно важно моделирование поведения производственного процесса в целом. Известно, что производственный процесс относится к марковским процессам и, следовательно, для его моделирования применим соответствующий математический аппарат [9, 10]. Основная цель моделирования производст-

венных процессов – увеличение времени стационарного состояния, в том числе с учетом стохастических факторов. Для стационарного процесса все совместные плотности вероятностей инвариантны относительно сдвига во времени, т. е.

$$p\left(x_1,t_1;x_2,t_2;...;x_n,t_n\right)=p\left(x_1,t_1+\tau;x_2,t_2+\tau;...;x_n,t_n+\tau\right),$$

и являются функциями только $t-\tau$. В частности, для одномерной плотности вероятностей зависимость от времени отсутствует, т. е. $p\left(x,t\right)=p_s\left(x\right)$, для двумерной совместной плотности вероятностей имеем $p\left(x_1,t_1;x_2,t_2\right)=p_s\left(x_1,t_1-t_2,x_2,0\right)$, для условной плотности вероятности перехода – $p\left(x_1,t_1\,|\,x_2,t_2\right)=p_s\left(x_1\left(t_1-t_2\right)|\,x_2,0\right)$.

Для марковского процесса указанные условия являются необходимыми и достаточными условиями стационарности, так как все совместные вероятности могут быть представлены как произведения двумерных условных вероятностей и одномерной вероятности. Если проводить сравнение с динамическими процессами в детерминированных системах, то стационарный процесс следует рассматривать как стохастический аналог установившегося режима. Подобно тому как в детерминированных системах установившийся процесс является предельным для переходного процесса, стационарный процесс рассматривается как предельный при $t\to\infty$ для однородного процесса [11].

Марковский процесс называется однородным, если плотность вероятности перехода инвариантна относительно сдвига во времени, что определяется как $p\left(x_1,t_1\,|\,x_2,t_2\right)=p_0\left(x_1\left(t_1-t_2\right)|\,x_2,0\right)$. Пусть плотность вероятности перехода однородного процесса имеет предел:

$$\lim_{t\to\infty}p_0\left(x,\tau\,|\,x',0\right)=p_s\left(x\right). \tag{7}$$

Определим для t, $t'>0$ марковский процесс путем задания следующих плотностей вероятности:

$$\begin{aligned}&p\left(x,t\right)=p_0\left(x,t\,|\,x_0,0\right),\\&p\left(x,t\,|\,x',t'\right)=p_0\left(x,t-t'\,|\,x',0\right).\end{aligned} \tag{8}$$

В силу марковского свойства все другие плотности вероятностей можно получить из указанных. Согласно (7) $p\left(x,t\right)\to p_s\left(x\right)$ при $t\to\infty$.

Поскольку плотность вероятности перехода (8) стационарна, при переходе к пределу все другие совместные плотности также стационарны, следовательно, и процесс стационарен. В данном случае однородный процесс можно рассматривать как некоторый стохастический аналог устойчивого переходного процесса: внешним воздействием система приводится в состояние x_0 в момент времени $t_0=0$, затем она свободно, без внешних воздействий, движется с течением времени к стационарному состоянию.

Плотность стационарного распределения является решением стационарного прямого уравнения Колмогорова при $\partial p\left(z,t\,|\,y,\tau\right)/\partial t\equiv 0$:

$$\begin{aligned}&-\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial\left(A_i\left(z\right)p\left(z,t\,|\,y,\tau\right)\right)}{\partial z_i}+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{n}\frac{\partial^2\left(\sigma_{ij}\left(z\right)p\left(z,t\,|\,y,\tau\right)\right)}{\partial z_i\partial z_j}+\\&+\int dx\left(W\left(z\,|\,x\right)p\left(x,t\,|\,y,\tau\right)-W\left(x,z\right)p\left(z,t\,|\,z,\tau\right)\right).\end{aligned}$$

Однородность процесса проявляется в том, что величины W, A и σ не зависят от t.

Применяя вероятностный подход и дифференциальные уравнения Колмогорова к моделированию производственных процессов микроэлектроники с учетом стохастических факторов, можно получить не только распределение вероятностей процессов как функции времени, но и распределение времени пребывания производственного процесса в возможных состояниях в стационарном режиме.

Заключение. ЛСПМ производственных процессов, в частности для моделирования фотолитографии, учитывают множество переменных, обладают простой интерпретацией результатов и способностью к прогнозированию поведения процессов. Следовательно, такие модели являются эффективным инструментом для повышения качества производства микроэлектроники.

Билинейные модели обеспечивают прогнозирование результата технологической операции в зависимости от изменения нескольких параметров одновременно. Кроме того, с помощью моделей данного типа можно проводить анализ чувствительности, определяя наиболее критичные параметры, влияющие на конечный результат, что важно для управления качеством и минимизации дефектов готовой продукции.

Уравнения Лурье позволяют оценить реакцию процесса или отдельной технологической операции на случайные изменения в параметрах, что важно при исследовании устойчивости процесса или операции. Как правило, стохастические колебания внешних и внутренних параметров производства увеличивают его цикл, материальные и производственные затраты, снижают эффективность процессов.

Стохастические предиктивные модели случайной структуры способствуют определению и прогнозированию условий перехода между разными режимами работы системы. При этом переключение между режимами происходит при скачкообразном изменении параметров, в частности мощности и производительности. Эффективное управление скачкообразными изменениями оптимизирует потребление ресурсов и продлевает срок службы систем и устройств.

Проведенное исследование свидетельствует о важности учета стохастических факторов в предиктивных моделях для повышения их точности и надежности. Моделирование с учетом случайных переменных дает возможность оптимизировать производственные процессы, снизить уровень дефектов и повысить конкурентоспособность отрасли. Таким образом, внедрение усовершенствованных предиктивных моделей с учетом стохастических факторов положительно влияет на развитие производства микроэлектроники, способствуя более устойчивому и эффективному функционированию предприятий.

Литература / References

1. Орлов А. И. О четырех направлениях исследований в области теории и практики управления производственными системами. *Научный журнал КубГАУ*. 2022;(178):293–319. https://doi.org/10.21515/1990-4665-178-025. EDN: KNIHIU.
   Orlov A. I. About four directions of research in the field of theory and practice of management of production systems. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*. 2022;(178):293–319. (In Russ.). https://doi.org/10.21515/1990-4665-178-025
2. Шевнина Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных. *Изв. вузов. Электроника*. 2022;27(3):407–415. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. EDN: BZRDEB.
   Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2022;27(3):407–415. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415

3. Шевнина Ю. С. Моделирование состояния технологического оборудования в составе информационно-управляющей системы. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2024;(1):29–35. https://doi.org/10.25791/pribor.1.2024.1468. EDN: DQCISF.
Shevnina Yu. S. Modeling the state of technological equipment as part of an information and control system. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostic.* 2024;(1):29–35. (In Russ.). https://doi.org/10.25791/pribor.1.2024.1468
4. Шайкин М. Е. Билинейная аппроксимация уравнений оптимальной оценки вектора состояния стохастической билинейной системы. *Автом. и телемех.* 2004;(12):94–109. EDN: NQWZGR.
Shaikin M. E. Optimal estimation equations for the state vector of a stochastic bilinear system: Its bilinear approximation. *Autom. Remote Control.* 2004;65(12):1946–1960. https://doi.org/10.1023/B:AURC.0000049879.83675.c2
5. Клименко Ю. А., Львович Я. Е., Преображенский А. П. Проектирование контрольно-измерительных компонент распределительных энергетических систем. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):88–97. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97. EDN: RZSDQA.
Klimenko Yu. A., Lvovich Y. E., Preobrazhensky A. P. Design of instrumentation and control components of power distribution systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2024;24(1):88–97. (In Russ.). https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-88-97
6. Шарамет А. В. Решение задачи предварительного разбиения разнородных данных на классы в условиях ограниченного объема. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2024;24(1):62–69. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-62-69. EDN: WCKHAQ.
Sharamet A. V. Solving the problem of preliminary partitioning of heterogeneous data into classes in conditions of limited volume. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2024;24(1):62–69. (In Russ.). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-62-69
7. Сельвесюк Н. И. Вложение оптимальных систем. Параметризация уравнения Лурье. *Гироскопия и навигация.* 2005;(1):100. EDN: HTGHCX.
Sel'vesyuk N. I. Optimal systems embedding. Parametrization of Lur'e equation. *Giroskopiya i navigatsiya.* 2005;(1):100. (In Russ.).
8. Каменецкий В. А. Системы с переключениями, системы Лурье, абсолютная устойчивость, проблема Айзермана. *Автом. и телемех.* 2019;(8):9–28. https://doi.org/10.1134/S0005231019080038. EDN: JQSZWH.
Kamenetskiy V. A. Switched systems, Lur'e systems, absolute stability, Aizerman problem. *Autom. Remote Control.* 2019;80(8):1375–1389. https://doi.org/10.1134/S0005117919080010
9. Царапкин С. Ф. Управление производством на основе вероятностного подхода. *Системы компьютерной математики и их приложения.* 2024;(25):173–178. EDN: ESUYWU.
Tsarapkin S. F. Production line control based on probabilistic approach. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya.* 2024;(25):173–178. (In Russ.).
10. Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г. Подходы к оценке управляемости сложной информационной системы. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2024;(3):33–38. https://doi.org/10.25791/pribor.3.2024.1484. EDN: FNTQXE.
Shevnina Yu. S., Gagarina L. G. Approaches to assessing the controllability of a complex information system. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostic.* 2024;(3):33–38. (In Russ.). https://doi.org/10.25791/pribor.3.2024.1484
11. Коротков В. В. Информационное моделирование технологических процессов с применением цепей массового обслуживания. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика.* 2022;(3):16–21. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21. EDN: VGFUIC.
Korotkov V. V. Information modeling technological processes by using queuing chains. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022;(3):16–21. (In Russ.). https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-16-21

Информация об авторах

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

Шевнина Юлия Сергеевна – доктор технических наук, доцент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

Семенов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, директор ООО «НМ-Тех» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), cpintex@yandex.ru

Царапкин Сергей Федорович – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), cpintex@yandex.ru

Минаков Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92), eminakov@bk.ru

Information about the authors

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Systems and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Yulia S. Shevnina – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

Mikhail Yu. Semenov – Cand. Sci. (Eng.), Director, NM-Tech LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya prwy, 6), cpintex@yandex.ru

Sergey F. Tsarapkin – Master's degree student of the Institute of Systems and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), cpintex@yandex.ru

Evgeniy I. Minakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Radioelectronics Department, Tula State University (Russia, 300012, Tula, Lenin Ave., 92), eminakov@bk.ru

Поступила в редакцию / Received 14.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 24.03.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Научная статья
УДК 621.38.049.77
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-597-606
EDN: VJYTNG

Причины возникновения LER-эффекта и методы его минимизации при изготовлении ИС

М. С. Кульпинов*, М. Г. Путря, А. А. Голишников, А. Г. Балашов

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

* *kulpms@gmail.com*

Аннотация. С развитием наноэлектроники требования, предъявляемые к точности формирования топологических структур в производстве ИС, становятся все более жесткими. Особое значение при этом приобретают фотолитографические процессы, от которых зависят линейные размеры и форма элементов ИС. Одним из существенных факторов, ограничивающих достижение высокой требуемой прецизионности, является эффект неровности края линий (Line Edge Roughness, LER), проявляющийся в виде случайных отклонений границ элементов фоторезистивной маски от идеальной формы. В работе проведен анализ основных причин возникновения LER-эффекта и результатов использования методов сканирующей электронной микроскопии и численного моделирования для количественной оценки значений параметров неровностей контуров элементов фоторезистивной маски на различных этапах литографического процесса. Показано, что минимальные отклонения в пределах 1–2 нм могут приводить к значительному ухудшению электрических характеристик наноразмерных транзисторов, особенно при технологических нормах ниже 28 нм. Проведен анализ возможных технологических приемов, минимизирующих LER-эффект. Показано, что анализ причин возникновения и разработка технологии минимизации LER-эффекта является ключевым направлением для обеспечения стабильности и производительности современных наноэлектронных устройств, а его комплексное изучение способствует дальнейшему развитию микроэлектроники.

Ключевые слова: LER-эффект, неровность края фоторезистивной маски, интегральные схемы, фотонные интегральные схемы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-03-2025-266 FSMR-2023-0002).

Для цитирования: Кульпинов М. С., Путря М. Г., Голишников А. А., Балашов А. Г. Причины возникновения LER-эффекта и методы его минимизации при изготовлении ИС. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):597–606. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-597-606. EDN: VJYTNG.

© М. С. Кульпинов, М. Г. Путря, А. А. Голишников, А. Г. Балашов, 2025

Original article

Causes of LER effect occurrence and methods for its minimization in IC manufacturing

M. S. Kulpinov*, M. G. Putrya, A. A. Golishnikov, A. G. Balashov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *kulpms@gmail.com*

Abstract. With the development of nanoelectronics, the requirements specified for precision in forming topological structures during IC manufacturing are becoming increasingly stringent. Particular importance is placed on photolithographic processes that determine the linear dimensions and shape of IC elements. However, one of the key factors limiting the achievement of the required high precision is the Line Edge Roughness (LER) effect, which manifests as random deviations of the boundaries of photoresist mask elements from an ideal shape. In this work, an analysis of the main causes of LER effect and of the results obtained using scanning electron microscopy and numerical simulation for quantitative evaluation of roughness parameters in the contours of photoresist mask elements at various stages of the lithographic process is performed. It was shown that even minimal deviations within 1–2 nm can significantly degrade the electrical characteristics of nanoscale transistors, especially at technology nodes below 28 nm. The analysis of potential technological techniques minimizing the manifestation of LER effect was performed. It has been demonstrated that identifying the causes of LER and developing the technologies to minimize its effects are crucial directions for ensuring the stability and performance of modern nanoelectronic devices, and a comprehensive approach to LER effect studying contributes to further advancements in the field of microelectronics.

Keywords: Line Edge Roughness, LER effect, photoresist mask edge roughness, integrated circuits, ICs, photonic integrated circuits, PICs

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of Russia (Agreement no. 075-03-2025-266 FSMR-2023-0002).

For citation: Kulpinov M. S., Putrya M. G., Golishnikov A. A., Balashov A. G. Causes of LER effect occurrence and methods for its minimization in IC manufacturing. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):597–606. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-597-606.

Введение. Современные технологии производства ИС должны обеспечивать высокую точность формирования наноразмерных структур, что предъявляет повышенные требования к используемым технологическим процессам, особенно к фотолитографическим операциям, определяющим исходные линейные размеры изготавливаемых элементов. При этом одной из ключевых проблем процесса фотолитографии при создании в слое фоторезиста топологического рисунка является неровность края элементов фоторезистивной маски – LER-эффект (Line Edge Roughness).

LER-эффект – отклонение края линии от идеально ровной и прямой формы в геометрии формируемых элементов, что негативно сказывается на их электрических и оп-

тических характеристиках. По мере достижения технологических норм 28 нм и менее проблема точного измерения и анализа этих параметров приобретает особую актуальность, поскольку незначительные неровности краев (~ 1–2 нм) могут существенно ухудшить производительность наноразмерных транзисторов. Так, при изготовлении фотонных ИС LER-эффект отрицательно влияет на характеристики оптических волноводов, неровности боковых стенок которых увеличивают потери, в частности в волноводах меньшего размера, где эффекты рассеяния и искажения более существенны; на дисперсию оптического излучения; на эффективность связей между оптическими компонентами фотонных ИС, что сказывается на уменьшении функциональных возможностей и производительности устройств.

В настоящей работе на основе литературных данных проводится анализ основных причин возникновения LER-эффекта и рассматриваются методы минимизации LER-эффекта в современных ИС.

Анализ причин возникновения LER-эффекта. Исследование влияния параметров фотолитографического процесса и технологии переноса рисунка показывает, что LER-эффект (рис. 1) является результатом сложного взаимодействия множества факторов на каждом этапе фотолитографического процесса. Так, флуктуации экспонирования (фотоны, электроны, кислоты, образующиеся в процессе экспонирования) представляют собой ключевой стохастический фактор возникновения LER-эффекта. Например, в EUV-литографии (Extreme Ultraviolet Lithography), в которой используется излучение с длиной волны 13,5 нм, каждый высокоэнергетический фотон (~ 92 эВ) генерирует каскад вторичных электронов, инициирующих химические реакции в фоторезисте. Дискретная природа света обусловливает вероятностное распределение поглощенных фотонов, вызывая пространственную неоднородность генерации кислоты [1]. Эти флуктуации критичны для узких линий (< 20 нм), где статистические вариации становятся сопоставимыми с размерами элементов [2, с. 343]. В DUV-литографии (Deep Ultraviolet Lithography) с длиной волны излучения 193 нм проблема усугубляется ограниченным числом фотонов на единицу площади и стохастичностью диффузии кислоты

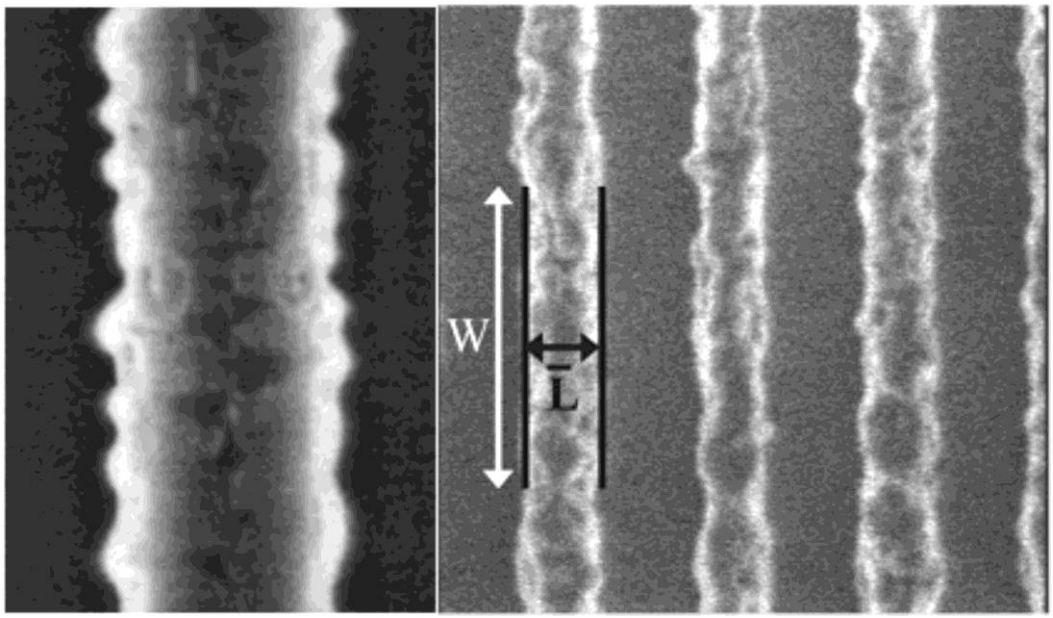


Рис. 1. SEM-изображение LER-эффекта [1]
Fig. 1. SEM image of LER effect [1]

в химически усиленных резистах (Chemical Amplification Resist, CAR) [3]. Экспериментальные данные подтверждают, что при оптимальной экспозиции активные кислотные молекулы создают локальные различия в скорости проявления. В результате формируются характерные неровные края элементов, что ограничивает дальнейшую миниатюризацию полупроводниковых структур [4].

Материал фоторезиста также влияет на формирование LER-эффекта, поскольку от физико-химических свойств резистивных материалов зависит качество переноса литографического изображения. Важным является размер полимерных цепей. Как установлено в работе [5], когда длина макромолекул становится сопоставимой с шириной формируемой линии (менее 10 нм), их дискретное распределение в фоторезисте вызывает значительные флуктуации края. В EUV-литографии эта проблема усугубляется из-за неоднородного распределения фотоактивных компонентов (Photo Acid Generator, PAG), что приводит к локальной концентрации кислоты после экспонирования [5]. Оптимально подобранная экспозиция агрегации компонентов резиста (растворителей, добавок, продуктов реакции) создает микроскопические неоднородности, которые проявляются в виде неровности краев. При низком контрасте проявления небольшие изменения в дозе экспозиции или времени проявления вызывают значительные деформации профиля края. Данные ограничения препятствуют дальнейшему уменьшению размеров элементов в полупроводниковых устройствах [6].

Неравномерность плазменного травления – критический фактор при формировании наноструктур. Задержки в процессе ионного травления, когда узкие линии травятся с меньшей скоростью по сравнению с широкими из-за ограниченного транспорта реактивных радикалов и ионов к донной части глубоких наноструктур, вызывает LER-эффект. Экспериментальные исследования подтверждают, что стохастичность ионной бомбардировки в плазменных процессах локально изменяет скорость травления. По этой причине возникает характерная «зубчатая» морфология края [7]. Наиболее выраженным LER-эффект становится при травлении высокоаспектных структур, в результате чего неоднородность плазменного потока вызывает пространственные флуктуации профиля травления. Отметим, что исходная шероховатость резистивной маски частично передается на нижележащие слои в процессе плазменного травления, причем коэффициент передачи LER зависит от селективности и анизотропии процесса. Данные фундаментальные ограничения процессов плазменного травления требуют комплексного подхода к оптимизации параметров плазмы (состава газа, мощности, давления) для минимизации шероховатости наноструктур [8].

Перенос микро- и наношероховатостей с фотошаблона способствует формированию LER-эффекта в процессе литографии и последующего травления. Исходная шероховатость фотошаблона может усиливаться или ослабляться в зависимости от технологических параметров [9]. В EUV-литографии это обусловлено стохастической природой генерации фотоэлектронов, которая приводит к дополнительным флуктуациям при переносе изображения с фотошаблона в резист [10]. Выявлен нелинейный характер передачи шероховатости: высокочастотные компоненты LER-эффекта (коротковолновые флуктуации) фильтруются оптической системой, тогда как низкочастотные компоненты эффективно переносятся на подложку [11]. Это явление количественно охарактеризовано с помощью функции передачи модуляции (Modulation Transfer Function, MTF) для разных технологических узлов [12].

Топологический рельеф и микро- и наношероховатости функциональных слоев, сформированные на подложке, определяют конечное качество литографического рисунка. Неровности поверхности подложки могут усиливаться в процессе литографии и

плазменного травления, что ухудшает качество рисунка и создает каскадный LER-эффект [13]. Так, микро- и наношероховатости нижележащих слоев (поликремния, диэлектриков) передаются через интерфейсы и проявляются в виде LER-эффекта конечной структуры, в частности при формировании многослойных наноструктур в технологических процессах с многократным экспонированием одного литографического поля. В EUV-литографии локальные неровности усиливают интенсивность отраженного излучения и создают неоднородности экспозиции резиста – зеркальное отражение [14]. Моделирование показывает, что среднеквадратичное отклонение значения шероховатости всего на 0,5 нм может вызывать LER-эффект до 3 нм в конечной структуре. Проблемы нанесения резиста на подложку, связанные с неравномерностью слоя фоторезиста, трансформируются в LER-эффект после экспонирования и проявления. Это значимо для высокоаспектных структур, где стандартные методы нанесения резиста становятся неэффективными [15].

LER-эффекты появляются в процессе осаждения функциональных слоев на этапе формирования тонких пленок ввиду следующих факторов. Во-первых, зернистость материала. При магнетронном распылении металлов (Al, Cu) формируется столбчатая структура с границами зерен размером 2–5 нм, что сопоставимо с критическими размерами элементов современных ИС и напрямую коррелирует со значением LER (R^2 = 0,89) [16]. Во-вторых, стохастическая кластеризация частиц в процессах атомно-слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition, ALD), что актуально для структур с аспектным отношением более 10:1, в которых плотность кластеров определяет пространственное распределение шероховатости [17]. Для минимизации LER-эффектов, возникающих в рассмотренных случаях, применяют комплекс таких мер, как оптимизация параметров осаждения (температуры, давления, скорости), использование затравочных слоев и процессов постобработки (отжиг, плазменное сглаживание) [18].

Комплексные методы минимизации LER-эффекта в современных технологических процессах. Современные подходы к минимизации LER-эффекта требуют комплексной стратегии, объединяющей применение инновационных материалов, прецизионных технологий обработки и интеллектуальных методов коррекции. В области материалов и фотолитографии основным направлением стала разработка металлооксидных фоторезистов на основе HfO_2 с LER < 1,5 нм, что достигается за счет высокой плотности фотоактивных компонентов и подавления кислотной диффузии. Химически усиленные резисты с полимерно-связанными фотогенераторами кислоты (Photo Acid Generator, PAG) демонстрируют минимизацию LER-эффекта на 20–30 % в результате уменьшения флуктуаций генерации кислоты [19]. Для EUV-литографии перспективно применение материалов с повышенным поглощением (например, на основе олова), позволяющих снизить дозу экспозиции и связанную стохастичность. Параллельно развиваются методы постобработки, такие как плазменное сглаживание (с использованием плазмы SF_6/O_2 для кремния), обеспечивающее минимизацию LER-эффекта от 5 до 1,5 нм за счет селективного удаления выступающих участков, и атомно-слоевое травление (Atomic Layer Etching, ALE) с точностью контроля профиля ± 0,3 нм [5], которые минимизируют передачу шероховатости с фотошаблона на подложку. Многостадийные процессы плазменного травления с промежуточным окислением также доказали свою эффективность [20].

Получение гладких и равномерных пленок обеспечивается за счет процессов атомно-слоевого осаждения с прекурсорами, подавляющими кластеризацию (например, TMA/H_2O для Al_2O_3). Использование затравочных слоев в процессах магнетронного распыления позволяет осаждать функциональные слои с размером зерен до 2 нм, а низ-

котемпературные (< 100 °C) процессы осаждения – аморфные пленки с минимальной зернистостью. Эффективны комбинированные подходы, такие как самосовмещенное двойное экспонирование (Self-Aligned Double Patterning, SADP) с плазменным сглаживанием до 0,8 нм. Химико-механическая планаризация (Chemical Mechanical Planarization, CMP) в сочетании с планарными технологиями устраняет микро- и наношероховатости подложек [20].

Для минимизации LER-эффекта применяются направленная самосборка (Directed Self-Assembly, DSA) с использованием блок-сополимеров, формирующая регулярные структуры с LER < 1 нм [16], EUV-литография с управляемой стохастикой (многоимпульсная экспозиция), снижающая флуктуации дозы, 2D-материалы (например, графен, MoS_2) с атомарно гладкими краями элементов [19–22].

Перспективные методы, такие как DSA и квантово-оптическая коррекция, в лабораторных условиях позволяют достигать LER < 1 нм. Однако при их внедрении в массовое производство возникают проблемы масштабируемости, стоимости и совместимости с существующими технологическими процессами.

На практике в настоящее время для минимизации LER-эффекта используют два подхода, которые могут быть реализованы как химическим, так и физическим методами: полировка шероховатой поверхности фоторезиста и заполнение шероховатой поверхности фоторезиста. Известен способ минимизации LER-эффекта за счет использования процесса плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения (рис. 2), позволяющего конформно наносить слой материала, который повторяет контур топологического рельефа [22–24]. Последующее плазменное травление осажденного слоя частично сглаживает неровности и шероховатости поверхности контура исходной маски. Для минимизации LER-эффекта необходимо многократно и циклично повторять данную последовательность операций, что снижает производительность процесса формирования наноразмерных структур. При этом данный способ не минимизирует LER-эффект, так как процесс атомно-слоевого осаждения является высококонформным, что не позволяет эффективно сглаживать неровности краев линий фоторезистивной маски.

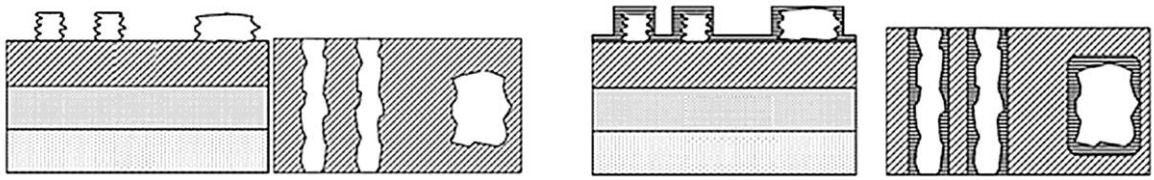


Рис. 2. Схематичное представление процесса минимизации LER-эффекта в структуре со сформированной фоторезистивной маской до (*а*) и после (*б*) плазмоактивированного осаждения выравнивающего слоя
Fig. 2. Schematic illustration of the LER minimization process in the structure with a formed photoresist mask before (*a*) and after (*b*) plasma-enhanced chemical vapor deposition

В работе [25] предложен метод минимизации LER-эффекта при формировании фоторезистивной маски, основанный на применении самовосстанавливающегося покрытия, которое используется в качестве выравнивающего слоя. Сущность данного метода заключатся в следующем. Пленку диэлектрика, используемую в дальнейшем в качестве жесткой маски, осаждают на поверхность кремниевой пластины с нанесенным функциональным слоем. Далее на поверхность диэлектрика последовательно наносят антиотражающее покрытие и слой фоторезиста, в котором методом оптической фотолитографии формируется топологический рисунок функционального слоя. После формирования фоторезистивной маски контролируют микронеровности на горизонтальных

и вертикальных поверхностях фоторезистивной маски для определения значения толщины выравнивающего слоя. Затем на сформированный топологический рельеф фоторезитивной маски наносят самовосстанавливающееся покрытие, которое используется в качестве выравнивающего слоя. Толщина самовосстанавливающегося покрытия больше, чем максимальное значение микронеровностей, выявленных при выходном контроле геометрических параметров элементов фоторезистивной маски. При воздействии на него в течение контролируемого промежутка времени управляемых внешних факторов (или за счет его химического состава) происходит выравнивание микронеровностей на горизонтальных и вертикальных поверхностях фоторезистивной маски. На заключительных стадиях процесса формирования фоторезистивной маски проводят последовательное анизотропное плазменное травление выравнивающего слоя до вскрытия не защищенной фоторезистом поверхности антиотражающего покрытия и тримминг выравнивающего слоя с использованием плазменного травления до восстановления заданных линейных размеров сформированной фоторезистивной маски. Схематично данный процесс показан на рис. 3.

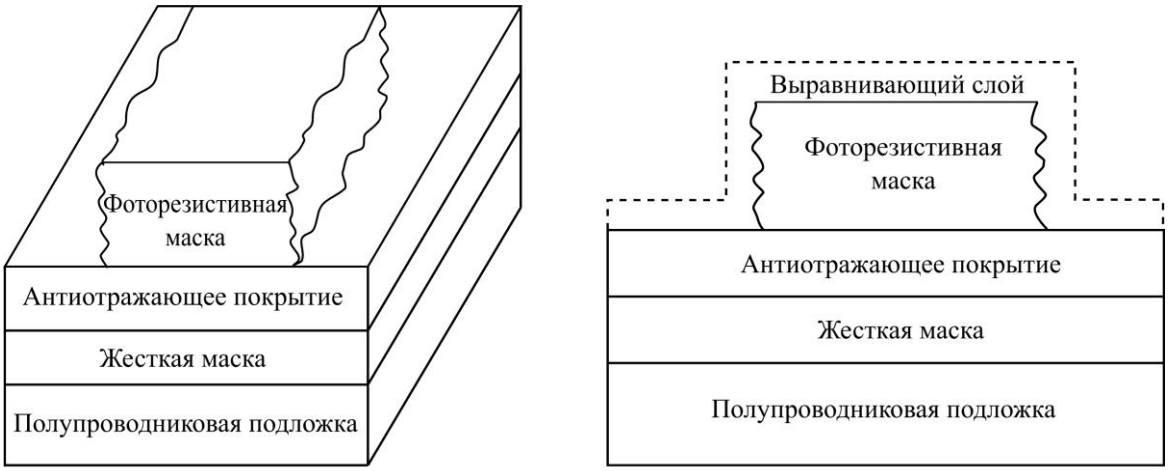


Рис. 3. Схематичное представление сглаживания шероховатостей края линии в структуре со сформированной фоторезистивной маской до (*а*) и после (*б*) нанесения выравнивающего слоя
Fig. 3. Schematic illustration of photoresist line-edge roughness smoothing in the structure with patterned photoresist mask before (*a*) and after (*b*) planarization layer deposition

В качестве самовосстанавливающегося покрытия могут быть использованы органические материалы, такие как полимеры, сополимеры, смолы и композитные материалы. Под воздействием на самовосстанавливающееся покрытие управляемых внешних факторов или за счет его химического состава происходит самовосстановление поверхности выравнивающего слоя и сглаживание микро- и нанонеровностей на горизонтальных и вертикальных поверхностях фоторезистивной маски.

При минимизации LER-эффекта с помощью химического осаждения из газовой фазы на подложку осаждают дополнительный слой в виде металла или кремнийсодержащего материала, используемого в дальнейшем в качестве жесткой маски. На этом дополнительном слое формируется фоторезистивная маска, представляющая собой топологический рисунок структуры, рельеф которой характеризуется толщиной фоторезиста, шероховатостью боковой поверхности и неровностью края линии в донной части рельефа. При плазменном травлении дополнительного слоя через фоторезистивную маску и последующем ее удалении в кислородосодержащей плазме на поверхности

подложки остается жесткая маска, характеризующаяся меньшими неровностями края линий и шероховатостями боковых стенок по сравнению с первоначально сформированной фоторезистивной маской. Использование данного способа незначительно минимизирует шероховатость боковой поверхности и неровность края линии в донной части рельефа.

Заключение. Анализ причин возникновения LER-эффекта позволяет выделить многоуровневую систему взаимосвязанных факторов, где каждый технологический этап способствует формированию шероховатости. На фундаментальном уровне это квантовые эффекты (стохастичность поглощения фотонов в EUV-литографии) и молекулярная дискретность материалов (размер полимерных цепей в резистах, зернистость металлов). На процессном уровне значительное влияние оказывают неравномерность травления (микротеневые эффекты, ионная бомбардировка) и топографические артефакты подложки. Сложность создает каскадный эффект, когда наношероховатость последовательно усиливается при переходе от фотошаблона к резисту, от резиста к подложке. Для структур ИС с технологическими нормами 5 нм и менее критическое значение приобретает взаимодействие перечисленных факторов, требующее комплексного подхода к минимизации LER-эффекта на всех этапах – от разработки материалов до оптимизации процессов травления и внедрения передовых методов характеризации.

Представленные технологические методы, минимизирующие LER-эффект, основаны на применении химического осаждения из газовой фазы и атомно-слоевого осаждения дополнительных нанослоев, а также процесса нанесения на сформированную маску выравнивающего слоя, представляющего собой самовосстанавливающееся покрытие. Таким образом, LER-эффект – результат сложного взаимодействия множества факторов фотолитографического цикла изготовления ИС, таких как параметры стадий процесса фотолитографии, состав и свойства фоторезиста, технология переноса рисунка, включающая в себя плазменное травление, и т. д. Оптимизация этих факторов, разработка новых типов фоторезистов, совершенствование технологического окна процесса фотолитографии и создание дополнительных способов воздействия на слои фоторезиста позволят минимизировать LER-эффект и тем самым улучшить качество наноразмерных структур.

Литература / References

1. Zeng L., Xu L.-T., Zhu M. Line edge roughness reduction in high aspect ratio carbon hardmask patterning for slit trench. In: *2024 Conference of Science and Technology for Integrated Circuits (CSTIC)*. Shanghai: IEEE; 2024, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/CSTIC61820.2024.10531928
2. Cui Zh. *Nanofabrication: Principles, capabilities and limits.* 2nd ed. Cham: Springer; 2017. xvii, 432 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39361-2
3. Kim I., Park S. J., Jeong Ch., Shim M., Kim D. S., Kim G.-T., Seok J. Simulator acceleration and inverse design of fin field-effect transistors using machine learning. *Sci. Rep.* 2022;12:1140. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05111-3
4. Yamaguchi T., Namatsu H., Nagase M., Yamazaki K., Kurihara K. A new approach to reducing line-edge roughness by using a cross-linked positive-tone resist. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999;38(12S):7114. https://doi.org/10.1143/JJAP.38.7114
5. Chen H., Xie L., Wei L., Shu Zh., Qiu B., Pei Zh. Line edge roughness modeling for continuous time-space resist simulations. In: *2024 2nd International Symposium of Electronics Design Automation (ISEDA).* Xi'an: IEEE; 2024, pp. 579–586. https://doi.org/10.1109/ISEDA62518.2024.10617720
6. Kao M.-Y., Kam H., Hu C. Deep-learning-assisted physics-driven MOSFET current-voltage modeling. *IEEE Electron Device Lett.* 2022;43(6):974–977. https://doi.org/10.1109/LED.2022.3168243
7. Vici A., Degraeve R., Kaczer B., Franco J., Van Beek S., De Wolf I. A multi-energy level agnostic simulation approach to defect generation. *Solid-State Electron.* 2021;184:108056. https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.108056

8. Church J., Meli L., Guo J., Burkhardt M., Mack C. A., De Silva A. et al. Fundamental characterization of stochastic variation for improved single-expose extreme ultraviolet patterning at aggressive pitch. *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS.* 2020;19(3):034001. https://doi.org/10.1117/1.JMM.19.3.034001
9. Yoon M. Y., Yeom H. J., Kim J. H., Jeong J.-R., Lee H.-C. Plasma etching of the trench pattern with high aspect ratio mask under ion tilting. *Appl. Surf. Sci.* 2022;595:153462. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153462
10. Lee G. H., Hwang S., Yu J., Kim H. Architecture and process integration overview of 3D NAND flash technologies. *Appl. Sci.* 2021;11(15):6703. https://doi.org/10.3390/app11156703
11. Lu S., Yang K.-M., Zhu Y., Zhang M., Wang L.-J., Hu C.-X. Analysis and controller design of fringe phase locking system for interference lithography. *Acta Photonica Sinica.* 2017; 46(1):123001.
12. Wei W.-Q., He A., Yang B., Wang Z.-H., Huang J.-Z., Han D. et al. Monolithic integration of embedded III-IV lasers on SOI. *Light Sci. Appl.* 2023;12:84. https://doi.org/10.1038/s41377-023-01128-z
13. Hsieh T.-Y., Hsieh P.-Y., Yang C.-C., Shen C.-H., Shieh J.-M., Yeh W.-K., Wu M.-C. Single-grain gate-all-around Si nanowire FET using low-thermal-budget processes for monolithic three-dimensional integrated circuits. *Micromachines.* 2020;11(8):741. https://doi.org/10.3390/mi11080741
14. Tang S., Yan J., Zhang J., Wei S., Zhang Q., Li J. et al. Fabrication of low cost and low temperature polysilicon nanowire sensor arrays for monolithic three-dimensional integrated circuits applications. *Nanomaterials.* 2020;10(12):2488. https://doi.org/10.3390/nano10122488
15. Wang S., Li L., Zheng S., Das P., Shi X., Ma J. et al. Monolithic integrated micro-supercapacitors with ultra-high systemic volumetric performance and areal output voltage. *National Science Review.* 2023;10(3):169–177. https://doi.org/10.1093/nsr/nwac271
16. Zheng Y.-Q., Liu Y., Zhong D., Nikzad S., Liu S., Yu Z. et al. Monolithic optical microlithography of high-density elastic circuits. *Science.* 2021;373(6550):88–99. https://doi.org/10.1126/science.abh3551
17. Fujimori T. How to improve “chemical stochastic” in EUV lithography? In: *2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC).* Shanghai: IEEE; 2020, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/CSTIC49141.2020.9282490
18. Fujimori T. How to reduce the stochastic issue in EUV lithography. *IWAPS 2020: 4th International Workshop on Advanced Patterning Solutions (Nov. 5–6, 2020).* Available at: https://picture.iczhiku.com/weixin/message1604029559308.html (accessed: 28.07.2025).
19. Fujimori T. Negative-tone imaging (NTI) process for ArF immersion and EUV lithography to improve “chemical stochastic”. In: *2021 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS).* Foshan: IEEE; 2021, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/IWAPS54037.2021.9671060
20. Bhattarai S., Chao W., Aloni Sh., Neureuther A. R., Naulleau P. P. Analysis of shot noise limitations due to absorption count in EUV resists. *Proc. SPIE.* 2015;9422:942209. https://doi.org/10.1117/12.2087303
21. Fujimori T. The status of stochastic issues – Photon stochastic and chemical stochastic. *MNC 2021, Symposium A (Oct. 27 and Oct. 28).* Available at: http://imnc.jp/2021/symposium-a/ (accessed: 28.07.2025).
22. Park Jin, GoChaWon, Huynwoo Kim. *Method for forming patterns of a semiconductor device.* Patent South Korea, KR102233577B1, 30.03.2021.
23. Gronheid R., Singh A., Knaepen W. *Lithographic mask layer.* Patent US, US10824078B2, 03.11.2020.
24. Chow Xian, Ansari Naveed, Kimura Yoshie, Lee Sai-I-I, Sultana Kazi, Mani Radhika et al. *Atomic layer deposition and etching to reduce roughness.* Patent Japan, JP7399864B2, 18.12.2023.
25. Кульпинов М. С., Путря М. Г., Голишников А. А., Крупкина Т. Ю. *Способ формирования фоторезистивной маски.* Патент РФ, 2827959, 30.05.2024. EDN: MIZJTJ.
Kulpinov M. S., Putrya M. G., Golishnikov A. A., Krupkina T. Yu. *Method of forming photoresist mask.* Patent RF, 2827959, 30.05.2024. (In Russ.).

Информация об авторах

Кульпинов Михаил Сергеевич – ассистент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kulpms@gmail.com

Путря Михаил Георгиевич – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mishapmg@gmail.com

Голишников Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1) golishnikov1960@mail.ru

Балашов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ait@miee.ru

Information about the authors

Mikhail S. Kulpinov – Assistant of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kulpms@gmail.com

Mikhail G. Putrya – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mishapmg@gmail.com

Alexander A. Golishnikov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), golishnikov1960@mail.ru

Alexander G. Balashov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Academic Affairs, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ait@miee.ru

Поступила в редакцию / Received 26.06.2025
Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

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): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **ООО «Руспресса»**: http://abcpress.ru/
- **ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»**: globalpress.ms@mail.ru
- **подписное агентство** «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- **редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья
УДК 621.3.049.77
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-607-617
EDN: ZKNZEE

Разработка отечественной САПР приборно-технологического моделирования для микроэлектронных технологий

Ю. А. Чаплыгин, А. Ю. Красюков*, Т. Ю. Крупкина, А. Г. Балашов, В. В. Лосев

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

* *a_kras@rambler.ru*

Аннотация. Создание эффективной системы приборно-технологического моделирования (ПТМ) в настоящее время является одной из важных составляющих обеспечения технологической независимости проектирования и производства изделий микроэлектроники. Решение этой задачи включает в себя создание отечественных программных средств САПР ПТМ и системы практических рекомендаций и методик ПТМ, настроенных на конкретные потребности производственных предприятий с учетом доступного уровня отечественных технологий. В работе проанализированы возможности существующих САПР ПТМ. Рассмотрены структура и задачи программных средств ПТМ. Проанализированы особенности ПТМ для отечественных микроэлектронных технологий. Приведены особенности приборно-технологического моделирования технологических маршрутов и приборов для реализации на базе отечественных микроэлектронных предприятий, в том числе для производственных процессов создания элементной базы ИС на основе низковольтной КМОП-технологии, биполярной технологии, планарных и вертикальных силовых МОП-транзисторов, интегральных преобразователей магнитного поля. Представлены характеристики разработанных программных модулей в составе отечественной САПР ПТМ – модулей технологического, приборного моделирования и визуализации результатов ПТМ. Показано, что данные программные модули обеспечивают возможность двумерного приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий с проектными нормами 130 нм и выше.

Ключевые слова: элементная база ИС, приборно-технологическое моделирование, САПР, отечественные микроэлектронные технологии

Для цитирования: Чаплыгин Ю. А., Красюков А. Ю., Крупкина Т. Ю., Балашов А. Г., Лосев В. В. Разработка отечественной САПР приборно-технологического моделирования для микроэлектронных технологий. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):607–617. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-607-617. EDN: ZKNZEE.

© Ю. А. Чаплыгин, А. Ю. Красюков, Т. Ю. Крупкина, А. Г. Балашов, В. В. Лосев, 2025

Original article

Development of domestic CAD system for instrument-technological modeling for microelectronic technologies

Yu. A. Chaplygin, A. Yu. Krasukov*, T. Yu. Krupkina, A. G. Balashov, V. V. Losev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *a_kras@rambler.ru*

Abstract. The implementation of an effective system of device and process simulation (TCAD) is currently one of essential components of ensuring technological self-sufficiency in microelectronics design and manufacturing. This problem solution includes creation of domestic TCAD tools and of a system of recommended practices and techniques for device and process simulation adjusted to the specific needs of manufacturing enterprises with account for available level of domestic technologies. In this work, the possibilities of existing CAD tools for device and process simulation are analyzed. The specifics of TCAD simulation of the process routes and devices currently available for fabrication on the domestic microelectronic enterprises, in particular, for technological routes for IC elements formation based on low-voltage CMOS devices, BIT devices, planar and vertical power MOSFETs and integrated magnetic field converters are given. The characteristics of developed software modules as a part of the domestic TCAD tool – modules for process and device simulation and TCAD results visualizing – are presented. It has been demonstrated that these software modules allow for two-dimensional technological and device modeling for silicon CMOS and BCD technologies with 130 nm design rule and higher.

Keywords: IC elements, device and process simulation, CAD, domestic microelectronic technologies

For citation: Chaplygin Yu. A., Krasukov A. Yu., Krupkina T. Yu., Balashov A. G., Losev V. V. Development of domestic CAD system for instrument-technological modeling for microelectronic technologies. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):607–617. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-607-617.

Введение. Системы автоматизированного проектирования (САПР) приборно-технологического моделирования (ПТМ) позволяют за счет объединения моделирования на технологическом, приборном и схемотехническом уровнях осуществлять комплексный анализ технологических и конструктивных параметров, их взаимосвязи и влияния на характеристики устройства в целом. Средствами ПТМ решаются такие задачи микроэлектронного производства, как поиск и исследование возможных вариантов технологии и технологических маршрутов, разработка конструкции элементов ИС, структур защиты микросхем и систем на кристалле от электростатического пробоя, выбор конструктивно-технологических параметров элементов, необходимых для достижения заданных электрических характеристик, обеспечение устойчивости выходных характеристик изделия к внешним воздействиям и к разбросу параметров технологических операций.

Для решения данных задач широко применяется коммерческая САПР компании Synopsys Sentaurus TCAD. Платформа Sentaurus TCAD объединяет программные средства для моделирования технологических процессов [1, 2], создания и редактирования приборных структур, расчета приборных характеристик и межсоединений [3–5], моделирования материалов на атомистическом уровне [6–7], программные средства визуализации, пользовательского интерфейса, совместной оптимизации проектных и технологических решений (DTCO) [8–10], программные средства визуализации и пользовательского интерфейса. На сегодняшний день использование коммерческих САПР российскими микроэлектронными предприятиями проблематично. Обеспечение технологической независимости непосредственно связано с созданием отечественных программных продуктов ПТМ.

В настоящей работе анализируются возможности существующих САПР ПТМ и их особенности для применения в отечественных микроэлектронных технологиях. Рассматриваются программные модули для отечественной САПР ПТМ, разработанные по заказу Минпромторга России в рамках ОКР «Разработка программы двумерного приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий» на базе МИЭТ с привлечением специалистов профильных предприятий-партнеров.

Структура и задачи программных средств ПТМ. Как правило, типовой пакет ПТМ содержит модули (инструменты):

– для моделирования технологических процессов (диффузии, ионной имплантации окисления, травления и нанесения слоев) создания ИС;

– приборного моделирования для расчета статических (входные, выходные, проходные ВАХ, пробой), малосигнальных (АС-анализ) и временных (transient-анализ) характеристик созданных моделей полупроводниковых приборов;

– визуализации и обработки результатов моделирования.

Для моделирования технологических процессов формирования ИС используются сложные системы дифференциальных уравнений в частных производных, включая уравнения для диффузии основных примесей (например, B, P, As, Sb в кремниевой технологии), диффузии точечных дефектов (вакансий и междоузлий). Необходимо учитывать влияние точечных дефектов и электрического поля на диффузию. Если диффузия происходит в окисляющей среде, то существенны граничные условия для примесей (двух- или трехфазная сегрегация примесей) и точечных дефектов (инжекция междоузлий в кремний на границе оксид – кремний при окислении). Большое значение имеют эффекты кластеризации и активации примесей, а также кластеризация междоузлий.

Моделирование перечисленных технологических процессов требует специальных возможностей для оперативной модификации систем уравнений и входящих в них моделей. Поэтому, например, в распространенной программе технологического моделирования Sentaurus Process (Synopsys) разработан язык Alagator как расширение языка TCL, позволяющий пользователю описывать системы дифференциальных уравнений в частных производных по времени и координатам, а также граничные условия. При этом данный язык описания уравнений и моделей интерпретируемый, а не компилируемый, поэтому является надстройкой над основной программой технологического моделирования и не требует сборки программы после внесения изменений в уравнения.

Для расчета электрических характеристик полупроводниковых приборов, как правило, требуется решать систему дифференциальных уравнений в частных производных для расчета распределений потенциала, концентраций электронов и дырок на базе диффузионно-дрейфовой модели. Однако модели, входящие в данную систему уравнений, сложные, особенно модели туннелирования, деградации, так как следует прини-

мать во внимание захват носителей на ловушки, генерацию этих ловушек в условиях стрессового воздействия при повышенной температуре и в сильном электрическом поле, квантование носителей в канале МДП-транзисторов. В программе приборного моделирования Sentaurus Device (Synopsys) нет возможности вводить дифференциальные уравнения, однако есть средства для модификации отдельных моделей, например моделей подвижности, собственной концентрации, рекомбинации и генерации. В этом случае модель реализуется как наследуемый класс на языке C++ (Physical Model Interface, PMI), далее компилируется и подключается в программу приборного моделирования. Например, в работах [11, 12] описывается использование средств PMI для расширения температурного диапазона моделей программы Sentaurus Device и учета радиационного облучения (в программном пакете данная модель по умолчанию отсутствует).

Если рассматривать доступные программы ПТМ с открытым кодом, то для моделирования технологических процессов доступна только одна программа Suprem-IV.GS 1994 г., в которой основные модели диффузии, окисления, ионной имплантации модифицировать возможно только на уровне коэффициентов. Пример моделирования локального окисления в программе Suprem-IV.GS показан на рис. 1. Из доступных программ приборного моделирования с открытым кодом можно выделить программу DevSim, в которой есть возможность задавать уравнения и модели на языке Python. Структура для программы DevSim может быть создана с использованием генератора GMSH, который также доступен и имеет открытый исходный код.

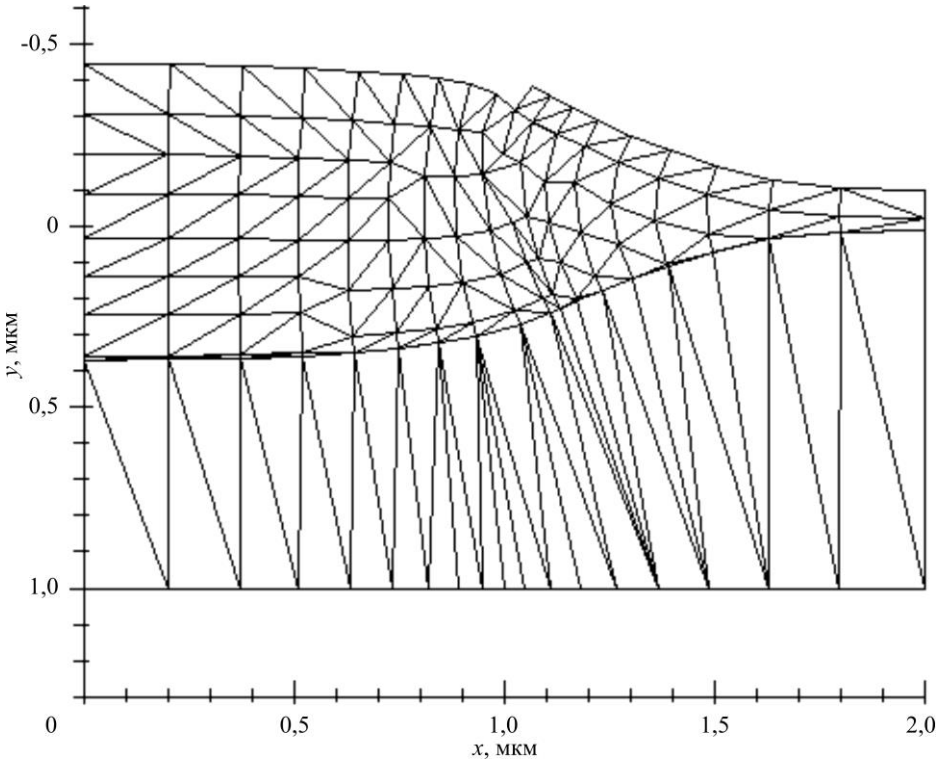


Рис. 1. Результаты моделирования локального окисления в программе Suprem-IV.GS
Fig. 1. Results of local oxidation simulation in Suprem-IV.GS

Особенности ПТМ для отечественных микроэлектронных технологий. Развитие электроники в России входит в число приоритетных направлений проектов технологического суверенитета, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2023 г. № 603. В настоящее время в России производят ИС и системы на

кристалле с проектными нормами до 90 нм (АО «Микрон», г. Москва, г. Зеленоград). Ведутся опытные разработки для технологии с проектными нормами 65 нм, в 2027–2028 гг. планируется запуск в г. Зеленограде производственной линии уровня 28 нм. Существует ряд производственных линеек, выпускающих востребованную микроэлектронную продукцию, реализуемую с проектными нормами 0,35; 0,5; 1,0; 1,2 мкм. Наряду с ИС выпускаются дискретные полупроводниковые и силовые приборы, а также датчики.

К основным видам технологических маршрутов и приборов, доступных в настоящее время для реализации на базе отечественных микроэлектронных предприятий, следует отнести:

– низковольтные КМДП интегральные схемы с проектными нормами 90–180 нм и выше на основе объемной технологии;

– низковольтные КМДП интегральные схемы с проектными нормами 350–500 нм на основе технологии кремний на изоляторе;

– комплементарные биполярные транзисторы на основе эпитаксиально-планарной технологии;

– планарные силовые МОП- и ДМОП-тразисторы для интеллектуальных силовых ИС;

– вертикальные силовые МОП-транзисторы, в том числе с вертикальным затвором;

– интегральные датчики физических величин, включая КМОП-совместимые преобразователи магнитного поля на основе элементов Холла, магниточувствительных МОП- и биполярных транзисторов.

Применение САПР ПТМ для разработки изделий по каждому из этих направлений требует учета специфики моделируемых объектов и технологических процессов, настройки программного окружения, выбора и калибровки используемых моделей как для технологического, так и для приборного моделирования.

При разработке элементной базы ИС на основе низковольтной КМОП-технологии необходимо принимать во внимание:

– гидродинамическую модель переноса носителей с учетом температуры носителей;

– лавинную генерацию носителей вблизи перехода сток – подложка;

– межзонную генерацию носителей в сильных полях при высокой концентрации примеси в подложке, характерную для проектных норм 90–180 нм;

– квантование энергии носителей в канале МОП-транзистора с тонким подзатворным диэлектриком и высокой концентрацией примеси в канале;

– туннелирование носителей через тонкий подзатворный диэлектрик;

– деградацию электрических параметров (например, порогового напряжения и крутизны) МОП-транзистора с проектными нормами 90–180 нм, обусловленную захватом горячих носителей в подзатворный диэлектрик;

– деградацию основных электрических характеристик *p*-канальных МОП-транзисторов при повышенной температуре среды.

При разработке элементной базы ИС на основе биполярной технологии, как правило, основное значение имеют коэффициент усиления базового тока β, который рассчитывается с использованием статистики Ферми – Дирака для определения концентраций носителей в сильнолегированных областях, и эффект модуляции ширины запрещенной зоны (BGN). Предварительные оценки зависимости максимального коэффициента усиления базового тока от модели BGN в программе Sentaurus Device (Synopsys) позволяют сделать следующие выводы:

– используемая по умолчанию статистика Больцмана с заданной BGN-моделью и статистика Ферми с дополнительной коррекцией и заданной BGN-моделью дают схожие значения β;

– расчет β с использованием статистики Ферми – Дирака с учетом BGN-модели, но без учета дополнительной коррекции дает завышенные значения β;

– наиболее схожие результаты расчета β дают модели Slotboom, del Alamo, Jain-Roulston.

При разработке элементной базы силовых транзисторов, главным образом, требуется рассчитать пробивное напряжение прибора в закрытом состоянии и учесть влияние саморазогрева на ток прибора в открытом состоянии. Остро стоит вопрос расчета пробивного напряжения биполярных транзисторов. В биполярном транзисторе есть три вида пробоя: с отключенной базой $V_{К\text{-}Э.\,о}$, с отключенным коллектором $V_{Э\text{-}Б.\,о}$, с отключенным эмиттером $V_{К\text{-}Б.\,о}$.

При моделировании на отключенных электродах задается нулевой начальный потенциал и нулевой ток. При расчете ВАХ в области пробоя используется метод с подключением резистора, когда к варьируемому электроду подключается резистор, сопротивление которого меньше сопротивления транзистора до пробоя. После пробоя все напряжение на внешнем резисторе падает, задавая ток на контакте. Таким образом, можно рассчитать сложные S-образные ВАХ прибора.

При расчете напряжения пробоя с отключенным коллектором часто возникает проблема сходимости на сетке с мелким шагом, одним из способов решения которой является использование временного (transient) анализа для расчета статической ВАХ. В этом случае на электрод эмиттера (с заданным резистором R) подается потенциал, линейно возрастающий от нуля до максимального значения за любое заданное время (например, за 1 с). Проводится расчет временных зависимостей токов и напряжений прибора, на основе которых строится требуемая ВАХ. Аналогичный подход используется для расчета напряжения пробоя p–n-переходов и силовых МОП-транзисторов.

Для расчета ВАХ биполярного либо силового МОП-транзистора с учетом саморазогрева модель прибора сверху дополняется областью окружающей среды и тепловыми граничными условиями с использованием подключаемых тепловых сопротивлений на нижней и боковых границах прибора. Выбор значений внешних тепловых сопротивлений существенно влияет на ВАХ прибора [13].

При расчете характеристик интегральных преобразователей магнитного поля, например на основе элементов Холла, можно выделить следующие необходимые условия [14]:

– требуется трехмерная модель элемента Холла, которая должна быть строго симметрична в горизонтальной плоскости по распределению примеси, расположению слоев и контактов, а также по сетке пространственной дискретизации;

– для создания полностью симметричной трехмерной модели элемента Холла, имеющего, например, топологию в виде креста, целесообразно сделать одну четвертую симметричную часть прибора и составить полный прибор с использованием операций отражения структуры вдоль осей координат;

– если элемент Холла управляется по напряжению, то на боковых холловских контактах необходимо задать нулевой ток, чтобы программа смогла рассчитать напряжение Холла как разность потенциалов между этими контактами;

– если элемент Холла управляется по току, то на двух электродах непосредственно следует задать ток смещения, а на двух оставшихся контактах рассчитать токи и определить их разность (ток Холла).

Эффективные методики использования ПТМ для создания конструктивно-технологических узлов, не только удовлетворяющих заданным требованиям по рабочим характеристикам, но и устойчивых к технологическому разбросу и внешним воздействиям, играют важную роль на всех этапах формирования электронной компонентной базы.

Разработка отечественной системы приборно-технологического моделирования. В современных условиях ввиду экономических и политических ограничений отечественные разработчики электронной компонентной базы лишены возможности пользоваться распространенными коммерческими продуктами, например САПР TCAD компаний Synopsys и Silvaco (США), что вызвало потребность в разработке собственных программ такого типа.

Программный модуль моделирования технологических процессов, входящий в состав разрабатываемой отечественной системы ПТМ, может применяться для исследования и разработки новых технологических маршрутов формирования ИС, а также для модификации существующих технологических маршрутов. Программный модуль используется для моделирования:

– КМОП технологического маршрута с проектными нормами 130 нм и выше;

– элементов BCD технологического маршрута, таких как МОП-транзисторы, биполярные транзисторы, силовые ДМОП-транзисторы;

– процесса окисления в различных газовых смесях с учетом давления и ориентации поверхности подложки, а также локального окисления;

– процесса ионной имплантации примесей B, BF_2, P, As, Sb в кремний, поликремний, диоксид кремния, нитрид кремния, фоторезист с учетом эффекта каналирования примеси в кремний;

– процесса ионной имплантации основных примесей в многослойные структуры с учетом рельефа поверхности подложки;

– процесса диффузии основных примесей в многослойные двумерные структуры в нейтральной и окисляющей средах с учетом влияния точечных дефектов и эффекта диффузии, ускоренной окислением;

– травления нанесения слоев с использованием эмуляции процесса.

Программный модуль приборного моделирования может применяться как средство исследования и разработки новых кремниевых полупроводниковых приборов в составе КМОП и BCD технологических маршрутов, а также для модернизации существующих приборов в ИС. Программный модуль используется для моделирования:

– статических ВАХ КМОП- и BCD-структур с проектными нормами 130 нм и выше;

– малосигнальных ВФХ и АЧХ ВАХ КМОП- и BCD-структур с проектными нормами 130 нм и выше;

– временных характеристик КМОП- и BCD-структур с проектными нормами 130 нм и выше.

Программный модуль визуализации результатов ПТМ может применяться как средство отображения и обработки результатов моделирования в программах ПТМ с открытым кодом. Программный модуль используется при отображении:

– распределений концентрации примесей, окислителя, точечных дефектов и аналогичных распределений как результатов моделирования технологического маршрута изготовления КМОП или BSD ИС в одно- и двумерном приближениях;

– геометрии многослойной структуры с контактами и расчетной сеткой;

– распределений потенциала, поля, концентраций электронов и дырок, плотности тока и аналогичных распределений как результатов приборного моделирования;

– ВАХ, ВФХ, временных зависимостей токов и напряжений как результатов приборного моделирования.

На рис. 2 и 3 показаны примеры расчета и отображения характеристик двумерной структуры *p*–*n*-перехода в обратном включении с использованием разрабатываемых программных модулей.

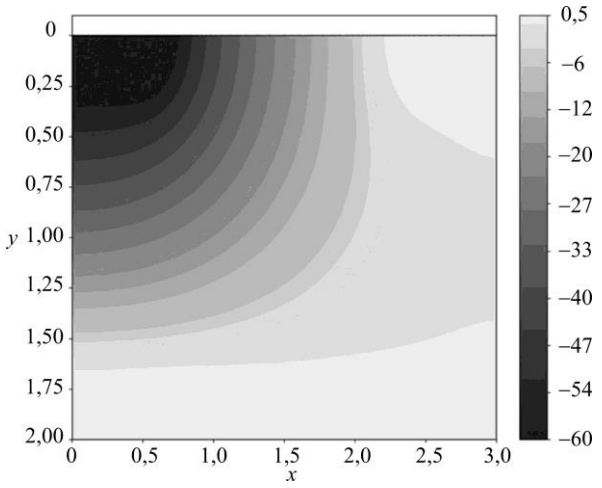


Рис. 2. Распределение потенциала *p*–*n*-перехода при обратном смещении (V = 60 В при T = 300 К)
Fig. 2. Distribution of *p*–*n* junction potential at reverse bias (V = 60 V at T = 300 K)

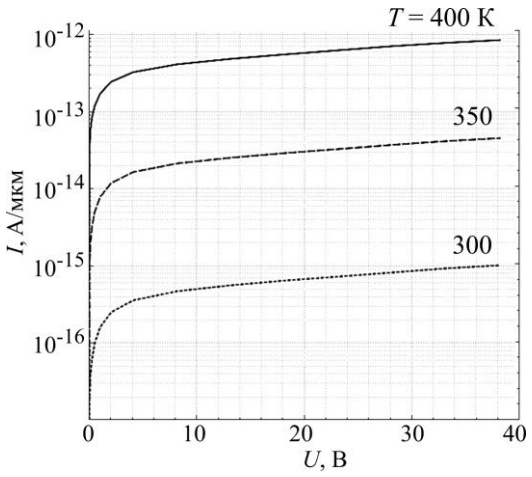


Рис. 3. Расчетные ВАХ двумерной структуры *p*–*n*-перехода в обратном включении при разной температуре среды
Fig. 3. Calculated current-voltage characteristics of a two-dimensional reverse biased *p*–*n* junction structure at different ambient temperature

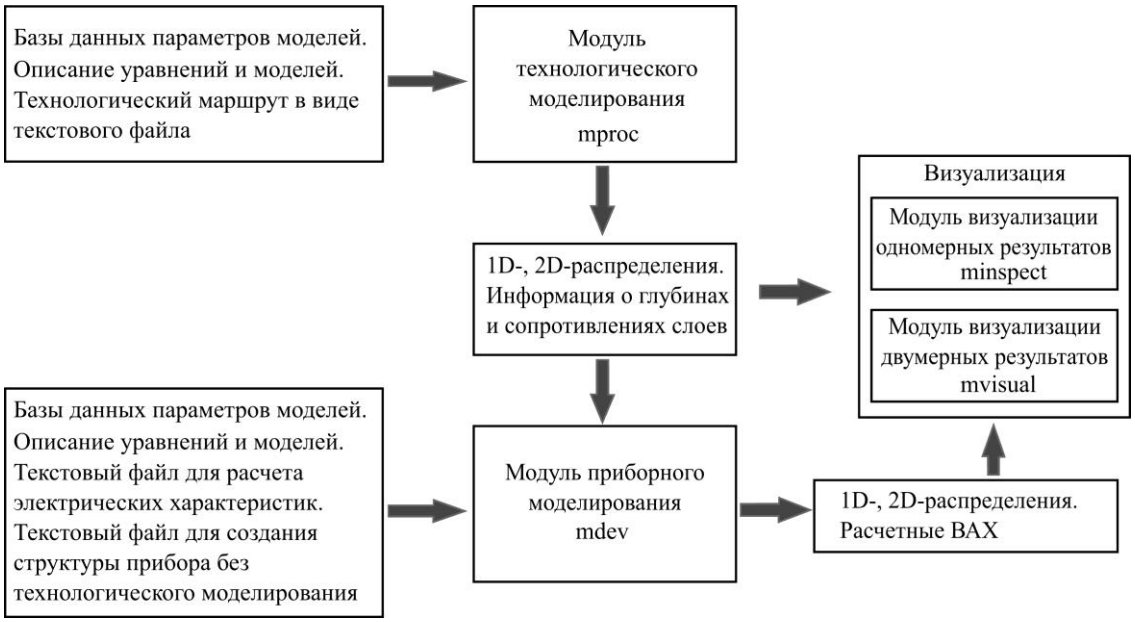


Рис. 4. Архитектура разрабатываемой отечественной САПР ПТМ
Fig. 4. Architecture of the domestic TCAD tool

В составе отечественной САПР ПТМ разработаны модели для технологического и приборного моделирования кремниевых технологий и систематизированы коэффициенты этих моделей из коммерческого аналога. Выполнены описания: форматов файлов

для хранения сеток, одномерных и двумерных результатов расчетов; внутренней структуры этих файлов; алгоритмов для технологического моделирования процессов ионной имплантации, окисления и диффузии, нанесения и удаления слоев; алгоритмов для расчета электрических характеристик полупроводниковых приборов. Интегрированы материалы по разработке проекта программы визуализации результатов ПТМ в одномерном и двумерном приближениях, создан проект программы и методики предварительных испытаний макета программы ПТМ. Архитектура разрабатываемой отечественной САПР ПТМ показана на рис. 4.

Заключение. Разработанные в составе отечественной САПР ПТМ программные модули технологического и приборного моделирования, модуль визуализации результатов ПТМ обеспечивают возможность двумерного приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий с проектными нормами 130 нм и выше. Рассмотренные особенности выбора моделей и настройки программного окружения соответствуют основным видам технологических маршрутов и приборов, доступных в настоящее время для реализации на базе отечественных предприятий микроэлектроники, в том числе для производственных процессов создания элементной базы ИС на основе низковольтной КМОП-технологии, биполярной технологии, планарных и вертикальных силовых МОП-транзисторов, интегральных преобразователей магнитного поля.

Литература / References

1. Tong Yu. Simulation and optimization of metal gate CMOS process and circuit by TCAD. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023;2634(1):012011. https://doi.org/ 10.1088/1742-6596/2634/1/012011
2. Huet K., Aubin J., Raynal P.-E., Curvers B., Verstraete A., Lespinasse B. et al. Pulsed laser annealing for advanced technology nodes: Modeling and calibration. *Appl. Surf. Sci.* 2020;505:144470. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144470
3. Ma X., Huang Y., Tang X., Luo Y., Shen H., Xiao F. Numerical modeling of FS-trench IGBTs by TCAD and its parameter extraction method. *Microelectron. Reliab.* 2023;147:115053. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115053
4. Groppo E., Gossner H., Brederlow R. TCAD modeling of ESD diode overshoot during ultrafast TLP events. *IEEE Electron Device Lett.* 2025;46(3):468–471. https://doi.org/10.1109/led.2025.3531797
5. Wong H. Yu., Fossito Tenkeu A. C. Advanced TCAD simulation and calibration of gallium oxide vertical transistor. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2020;9(3):035003. https://doi.org/10.1149/2162-8777/ab7673
6. Miccoli C., Iucolano F. Study of oxide trapping in SiC MOSFETs by means of TCAD simulations. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2019;97:40–43. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.02.035
7. Silvestri L., Palsgaard M., Rhyner R., Frey M., Wellendorff J., Smidstrup S. et al. Hierarchical modeling for TCAD simulation of short-channel 2D material-based FETs. *Solid-State Electron.* 2023;200:108533. https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108533
8. Ding Q., Kuhlmann A. V., Fuhrer A., Schenk A. A generalizable TCAD framework for silicon FinFET spin qubit devices with electrical control. *Solid-State Electron.* 2023;200:108550. https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108550
9. Lomonaco J., Rostand N., Martinie S., Bournel A. TCAD simulation methodology of total ionizing dose effects for PDSOI transistor with a hump characteristic. *Solid-State Electron.* 2024;211:108813. https://doi.org/10.1016/j.sse.2023.108813
10. Fan G., Ma T., Sun X., Shao L., Low K. L. Graph attention network-based unified TCAD modeling enabling fast design technology co-optimization through transfer learning. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2025;72(1):474–481. https://doi.org/10.1109/ted.2024.3493854
11. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A., Ismail-Zade M. R., Kharitonov I. A., Pereverzev L. E. et al. Features of TCAD and SPICE simulation of a charged particle impact into a 6T SRAM cell manufactured using the CMOS 28-nm technology node. *Russ. Microelectron.* 2024;53(7):737–743. https://doi.org/10.1134/S1063739724700823

12. Петросянц К. О., Исмаил-Заде М. Р., Кожухов М. В., Попов Д. А., Пугачёв А. А., Самбурский Л. М. и др. Подсистема TCAD- и SPICE-моделирования элементов кремниевых БИС с учетом влияния температуры, радиации и старения. *Наноиндустрия.* 2022;15(S8-1(113)):183–194. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.183.194. EDN: SUZPKY.
Petrosyants K. O., Ismail-Zade M. R., Kozhukhov M. V., Popov D. A., Pugachev A. A., Sambursky L. M. et al. TCAD and SPICE subsystem for modeling silicon VLSI elements in view of temperature, radiation and aging effects. *Nanoindustriya = Nanoindustry.* 2022;15(S8-1(113)):183–194. (In Russ.). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.183.194
13. Чаплыгин Ю. А., Артамонова Е. А., Красюков А. Ю. Зависимость теплового сопротивления мощного МОП-транзистора на подложке кремний-на-изоляторе от конструктивно-технологических параметров его структуры. *Изв. вузов. Электроника.* 2011;(5):44–47. EDN: OHKFXP.
Chaplygin Yu. A., Artamonova E. A., Krasyukov A. Yu. Dependence of the thermal resistance of a powerful MOSFET on a silicon-on-insulator substrate on the construction-technological parameters of its structure. *Russ. Microelectron.* 2012;41(7):376–378. https://doi.org/10.1134/S1063739712070049
14. Козлов А. В., Красюков А. Ю., Крупкина Т. Ю., Чаплыгин Ю. А. Моделирование характеристик и оптимизация конструктивно-технологических параметров интегральных магниточувствительных элементов в составе микро- и наносистем. *Изв. вузов. Электроника*. 2015;20(5):489–496. EDN: UNSUQR.
Kozlov A. V., Krasjukov A. Yu., Krupkina T. Yu., Chaplygin Yu. A. Simulation of characteristics and optimization of the constructive and technological parameters of integrated magnetosensitive elements in micro and nanosystems. *Russ. Microelectron.* 2016;45(7):522–527. https://doi.org/10.1134/S1063739716070088

Информация об авторах

Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, президент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), president@miet.ru

Красюков Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, начальник лаборатории приборно-технологического моделирования Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), a_kras@rambler.ru

Крупкина Татьяна Юрьевна – доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), krupkina@miee.ru

Балашов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева, проректор по учебной работе Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ait@miee.ru

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, доцент, директор Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Information about the authors

Yuri A. Chaplygin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Supervisor of the Institute of Integrated Electronics, President National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), president@miet.ru

Anton Yu. Krasukov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, Head of the Laboratory of Instrument and Technological Modeling, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), a_kras@rambler.ru

Tatiana Yu. Krupkina – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), krupkina@miee.ru

Alexander G. Balashov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Integrated Electronics, Vice-Rector for Education, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ait@miee.ru

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru

Поступила в редакцию / Received 18.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 25.03.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

ЭЛЕКТРОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
ELECTRONIC ENGINEERING

Научная статья
УДК 681.5
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-618-627
EDN: VHVVHO

Системы автоматизированного управления технологическим оборудованием в электронном машиностроении

А. Л. Переверзев, В. Ф. Петров, О. В. Петров, С. Б. Симонов, А. И. Терентьев*

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

* *aaattt@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время технические и архитектурные решения в области разработки автоматизированных систем управления специальным технологическим оборудованием на отечественной элементной базе не унифицированы. Поиск и применение общих архитектурно-технических решений позволит сократить время разработки технологического оборудования, повысить его надежность и снизить стоимость обслуживания. В работе рассмотрены задачи, возникающие при эксплуатации автоматизированных систем управления технологическим оборудованием на производстве, включая применение программируемых логических контроллеров и специализированных вычислительных средств. Приведены результаты анализа современных аппаратных и программных средств для проектирования систем управления специальным технологическим оборудованием. Предложены новые технические и архитектурные решения и даны рекомендации по их применению в электронном машиностроении. На основе проведенного анализа представлена унифицированная структура автоматизированной системы управления на базе технологий распределенных систем управления, которая может быть использована при проектировании или модернизации специального технологического оборудования. Показано применение данной структуры на примере разработки системы автоматизированного управления установкой электронно-лучевой литографии. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании отечественного специального технологического оборудования.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, программируемый логический контроллер, распределенные системы управления, электронная литография

Для цитирования: Переверзев А. Л., Петров В. Ф., Петров О. В., Симонов С. Б., Терентьев А. И. Системы автоматизированного управления технологическим оборудованием в электронном машиностроении. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5): 618–627. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-618-627. EDN: VHVVHO.

© А. Л. Переверзев, В. Ф. Петров, О. В. Петров, С. Б. Симонов, А. И. Терентьев, 2025

Original article

Automated control systems for technological equipment in electronic engineering

A. L. Pereverzev, V. F. Petrov, O. V. Petrov, S. B. Simonov, A. I. Terentyev*

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *aaattt@mail.ru*

Abstract. Currently the engineering and architectural solutions pertaining to development of automated control systems for specialized technological equipment based on domestic components are not standardized. Searching and application of universal technical solutions make it possible to reduce STE development time, to increase its reliability and decrease the hardware maintenance cost. In this work, the tasks arising during operation of automated processing equipment control systems at manufacturing site are considered, including the use of programmable logic controllers and specialized computing devices. The results of an analysis of modern hardware and software tools for designing control systems for specialized technological equipment are given. New engineering and architectural solutions are proposed and recommendations for their application in electronic engineering are provided. On the grounds of performed analysis, a unified structure for an automated control system based on distributed control system technologies is proposed, which can be used in the design or modernization of specialized technological equipment. The application of the proposed structure has been demonstrated through the development of an automated control system for an electron beam lithography installation. The results obtained can be used in the design of domestic specialized technological equipment.

Keywords: automated control systems, programmable logic controller, distributed control systems, electron lithography

For citation: Pereverzev A. L., Petrov V. F., Petrov O. V., Simonov S. B., Terentyev A. I. Automated control systems for technological equipment in electronic engineering. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):618–627. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-618-627.

Введение. Развитие отечественных технологий электронного машиностроения определено федеральным проектом «Технологии производства электроники» и комплексной программой «Развитие электронного машиностроения на период до 2030 года», утвержденными Правительством Российской Федерации [1]. Поставлены задачи по разработке более 100 единиц специального технологического оборудования, свыше 500 видов материалов для производства электроники. Выполняются также разработки систем автоматизированного проектирования (САПР).

Проектируемое специальное технологическое оборудование представляет собой комплексные установки с автоматизированной системой управления (АСУ), которая должна осуществлять автоматический сбор, обработку, хранение информации и выработку управляющих сигналов в соответствии с заданным рецептом технологического процесса. При этом необходимо обеспечить безопасность функционирования и эффек-

тивность производства, которая складывается из скорости (производительности) изготовления и качества выпускаемой продукции. Для этого при проектировании специального технологического оборудования следует поддерживать высокий уровень автоматизации работы как отдельно стоящей установки, так и всей производственной линии, обеспечивать ясный и непротиворечивый операторский интерфейс для выполнения производственных операций и сервисного обслуживания установки, а также его интеграцию в автоматизированный производственный цикл на предприятии.

В настоящей работе анализируются современные аппаратные и программные средства для проектирования систем управления специальным технологическим оборудованием. Рассматривается унифицированная структура АСУ на базе технологий распределенных систем управления, которая может быть использована при проектировании или модернизации специального технологического оборудования. Предлагаются новые технические и архитектурные решения и даются рекомендации по их применению в электронном машиностроении.

Анализ аппаратных и программных средств. Развитие технологий производства электроники ведет к усложнению технологического процесса, повышению требований к алгоритмам управления и степени автоматизации, увеличению числа сенсоров, управляющих сигналов и исполнительных механизмов технологического оборудования, что вызывает необходимость применения новых архитектурных решений для построения систем управления [2]. В настоящее время распространение получили промышленные решения на базе распределенных систем управления (РСУ; Distributed Control System, DCS) – программно-аппаратного комплекса управления технологическим процессом, характеризующегося распределенной системой ввода-вывода и децентрализацией обработки данных. Впервые такие системы были представлены в 1975 г. японскими компаниями Yamatake-Honeywel (РСУ TDC 2000) [3] и Yokogawa (РСУ CENTUM) [4]. В том же году американская компания Bristol представила свой универсальный контроллер РСУ UCS 3000. На сегодняшний день в мировой промышленности широко распространены следующие РСУ: Experion PKS, TDC3000, Total Plant Solution (TPS) (Honeywell); CENTUM / CENTUM VP (Yokogawa); System 800xA (ABB); APROL (B&R) [5]; I/A Series, Foxboro A2 (Eurotherm Suite) (Invensys Foxboro); APACS, QUADLOG, SPPA-T3000, PCS7 (Siemens) [6].

Отечественная РСУ может быть реализована в виде открытой АСУ технологическими процессами. Идеология такой системы управления предполагает создание множества совместимых и взаимозаменяемых модулей, которые допускают применение компонентов разных разработчиков без привязки к определенным производителям. Приказом Минпромторга России от 14 августа 2023 г. № 2939. создана межотраслевая рабочая группа по открытым автоматизированным системам управления технологическими процессами [7].

Ассоциация предприятий «Электронное машиностроение» [8] считает целесообразным создание унифицированной РСУ специальным технологическим оборудованием. Ее использование позволит повысить эффективность разработки, производства и эксплуатации оборудования электронного машиностроения, а также разработать единые стандарты подготовки кадров. Применение принципов РСУ при проектировании системы автоматизированного управления технологическим оборудованием позволяет представлять эту систему в виде иерархической структуры с пятью уровнями (рис. 1).

К нижнему, полевому, уровню относятся контрольно-измерительные приборы и исполнительные механизмы (датчики, электроприводы и т. д.). Устройства этого уровня собирают информацию о физических параметрах технологического процесса, отра-

батывают управляющие воздействия и реализуют обмен информацией с вышестоящим уровнем системы управления.

Средний уровень – это уровень программируемых логических контроллеров (ПЛК; Programmable Logic Controller, PLC), специализированных вычислительных устройств, регуляторов и т. д. Получая информацию от полевого уровня, контроллеры передают ее на верхний уровень. Нижний уровень получает от контроллеров команды управления в соответствии с алгоритмами, реализуемыми программами контроллеров. Контроллеры выполняют следующий алгоритмический цикл управления: прием информации от полевого и диспетчерского уровней – анализ и подготовка управляющих команд – выдача команд управления исполнительным устройствам.

Верхний, диспетчерский, уровень предназначен для централизованного управления технологическими процессами изготовления конечной продукции. Здесь сосредоточены программно-аппаратные средства обработки массивов информации о функционировании предприятия и реализуется человеко-машинный интерфейс (ЧМИ).



Рис. 1. Иерархия системы управления специальным технологическим оборудованием и технологическими процессами
Fig. 1. Hierarchy of control systems for technological equipment and processing

Уровень управления производством (Manufacturing Execution System, MES) предназначен для управления и контроля производственных процессов на предприятии. Уровень планирования ресурсов (ERP) предназначен для непрерывной балансировки и оптимизации ресурсов предприятия с помощью специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения.

Функциональность специализированной электронной вычислительной машины (ПЛК) расширяется с помощью специализированных модулей, таких как модули дискретного ввода-вывода и аналогового ввода-вывода, коммуникационные модули, модули питания и др. Для расширения функциональных возможностей системы на базе ПЛК могут быть также подключены внешние устройства с использованием стандартных цифровых интерфейсов.

Первый контроллер Modicon 084 [9] был выпущен в 1968 г. Современные ПЛК представляют собой высокопроизводительные вычислительные системы с широкими сетевыми возможностями. Частота цикла управления в ПЛК может достигать 100 Гц. Такая производительность достаточна для управления большим числом типовых технологических операций в производстве. Однако в электронном машиностроении встречаются нетиповые задачи, которые требуют более высокой производительности и частоты контура управления. Например, при управлении пучком электронов в электронно-оптической системе литографической установки необходимо выдавать управляющие команды с периодом 10 мкс, а период обработки входной информации может составлять 10 нс. Для решения подобных задач используются специализированные вычисли-

тели, построенные на базе микроконтроллеров или ПЛИС. ПЛК совместно с такими вычислителями образуют контроллерный уровень распределенной системы управления.

В России разработкой и производством ПЛК занимаются ООО «Производственное Объединение ОВЕН» (линейка ПЛК200/210) [10], НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ [11] и ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» [12] и др. Контроллеры ПЛК200/ПЛК210 – линейка современных моноблочных контроллеров с расширенными коммуникационными возможностями и дополнительными функциями надежности для малых, средних и распределенных систем автоматизации со встроенными DI/DO/AI/AO. Контроллеры универсальны благодаря широкому спектру коммуникационных протоколов и дополнительным модулям расширения входных и выходных сигналов Mx210 с интерфейсом Ethernet. Они поддерживают промышленные протоколы Modbus RTU/ASCII/TCP, OPC UA (Server), MQTT (client), SNMP (Manager/Agent) и протоколы тепло- и электросчетчиков, существует возможность реализации нестандартных протоколов. Операционная система контроллеров обеспечивает подключение GSM/GPRS-модемов и имеет встроенные библиотеки и утилиты прикладных протоколов NTP, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, SSH, SMTP/IMAP/POP3, OpenVPN, WireGuard, а также возможность подключения к СУБД. Встроенный межсетевой экран позволяет подключать контроллеры к внешним сетям, а поддержка кольцевой топологии Ethernet (STP/RSTP) дает возможность использовать контроллеры в отказоустойчивых сетях. Встроенный редактор визуализации может создавать человеко-машинный интерфейс (HMI), который открывается на любом устройстве с веб-браузером. В качестве центрального процессора используется ARM Cortex-A55 с частотой 1,8 ГГц или ARM Cortex-A8 с частотой 800 МГц.

Контроллеры ПЛК200/ПЛК210 программируются в интегрированной среде разработки CODESYS V3.5. В рамках единой среды разработчик программирует управляющую логику, человеко-машинный интерфейс и информационный обмен с внешними устройствами и модулями расширения. CODESYS поддерживает все пять языков программирования стандарта МЭК 61131-3 (LD, FBD, IL, ST, SFC), включая дополнительный язык CFC (расширение FBD со свободным порядком выполнения блоков). В состав CODESYS входят редактор визуализации, конфигураторы протоколов обмена и средства отладки.

В НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ разработаны две линейки ПЛК и модулей для них – ПЛК1 и ПЛК2 [11], отличительной особенностью которых является использование отечественного микропроцессора 1890ВМ108 с тактовой частотой 400 МГц. В линейку входит комплект базовых модулей (центральный процессор, модуль питания, модули расширения, коммуникационные модули) для построения систем с открытой архитектурой, конфигурируемых пользователями в соответствии с требованиями конкретных выполняемых задач. ПЛК могут быть использованы при создании отказоустойчивых систем управления. Для этого в них предусмотрены резервирование процессорных модулей, сконфигурированного ПЛК в целом (зеркалирование) и каналов связи, а также «горячая» замена модулей. ПЛК функционируют под управлением отечественной сертифицированной операционной системы реального времени РВ Багет 2.6. Разработка прикладных программ для ПЛК1 и ПЛК2 ведется на языках стандарта МЭК 61131-3-2016 с использованием программы «Среда разработки и отладки», которая построена на базе свободно распространяемой среды разработки приложений Beremiz [13].

ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» производит программируемый логический контроллер «ПЛК-Эльбрус» [12]. Он предназначен для построения управляющих и информационных систем автоматизации технологических процессов среднего и высокого уровней сложности и может применяться как в составе централизованных, так и распределенных систем управления разных отраслей промышленности. Конкурентным преимуществом ПЛК является использование в основном процессорном модуле отечественного микропроцессора «Эльбрус-2С3» (К1891ВМ068) с тактовой частотой до 2 ГГц. Программирование «ПЛК-Эльбрус» осуществляется в САПР ELPLC-LOGIC. Этот инструментальный комплекс создан для разработки управляющих программ ПЛК на языках стандарта МЭК-61131-3. В состав программного обеспечения входят интегрированная среда разработки и система исполнения.

В последнее время в зарубежной литературе появляется информация о программно-определяемой автоматизации (Software-Defined Automation, SDA) [14, 15]. Конкретно речь идет о виртуальных ПЛК (vPLC) – программных средствах, эмулирующих функции физических программируемых логических контроллеров. В декабре 2024 г. компания Siemens объявила о завершении сертификации по функциональной безопасности виртуального ПЛК – SIMATIC S7-1500V F. Виртуальный контроллер получил сертификат TUV с уровнем полноты безопасности SIL3 по IEC 61508. В январе 2025 г. компания CODESYS также объявила о сертификации в TÜV Süd виртуального ПЛК Virtual Safe Control SL.

Причины появления виртуальных контроллеров и особенности их применения в системах автоматизации, Индустрии 4.0 и среде информационных технологий в целом рассматриваются в [16]. Виртуальный ПЛК функционирует как приложение на защищенном сервере предприятия, в остальном его функции не отличаются от классических ПЛК. Виртуальный ПЛК заменяет только центральный процессор, а модули расширения (ввода-вывода), датчики, исполнительные механизмы и панели оператора все также необходимы для построения РСУ. Виртуальный ПЛК не сможет полностью заменить классические решения, его следует рассматривать как часть комплексного подхода при построении РСА.

Технологический маршрут производства изделий микроэлектроники включает в себя последовательное использование различного специального технологического оборудования. Для управления, отслеживания и документирования процесса производства продукции на предприятии может применяться система управления производством (MES). Она управляет распределением ресурсов, планированием операций, контролем технологических процессов, сбором и анализом данных в масштабах предприятия.

В микроэлектронике получили распространение стандарты SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International), разработанные Международной ассоциацией производителей материалов и оборудования для полупроводниковой промышленности [17]. Стандарты SEMI определяют требования к аппаратной составляющей технологического оборудования, модели программного обеспечения, информационное взаимодействие между оборудованием на уровне управления производством. В частности, стандарты SEMI E30 GEM Standard (Generic Model For Communications and Control Of Manufacturing Equipment) и SEMI E5 SECS-II описывают организацию информационного обмена между технологическим оборудованием.

Применение предлагаемых подходов. Рассмотрим применение принципов РСУ на примере АСУ электронно-лучевого литографа. Структурная схема системы управления электронно-лучевого литографа представлена на рис. 2.

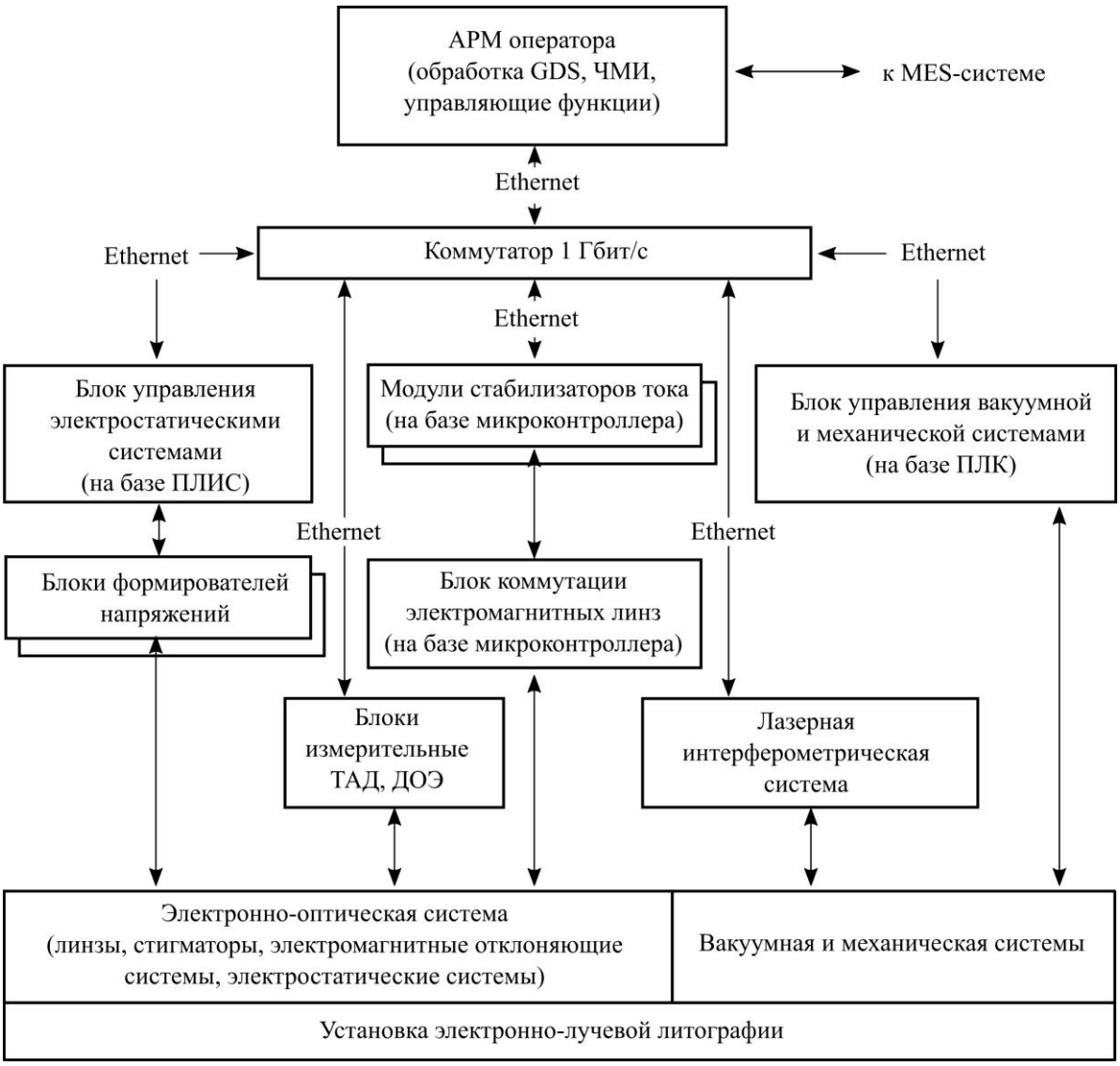


Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы управления электронно-лучевого литографа
Fig. 2. Structural diagram of the automated control system for electronic beam lithographer

В состав установки электронно-лучевой литографии входят:

– электронно-оптическая система, генерирующая электронный луч, формирующая требуемую геометрию и перемещающая электронный луч с помощью электромагнитных линз и электростатических систем;

– вакуумная подсистема, обеспечивающая постоянное давление в электронно-оптической системе в диапазоне 10^{-6}–10^{-8} Па и периодическое достижение указанного давления в загрузочной камере с пластинами;

– механическая подсистема, обеспечивающая требуемое движение координатного стола, на котором размещаются объектодержатели с обрабатываемыми фотошаблонами или полупроводниковыми пластинами, а также перемещение объектодержателей из загрузочной камеры на координатный стол и обратно.

Система управления состоит из множества решающих функциональные задачи вычислительных узлов. Электронно-оптическая система включает в себя следующие элементы: катодный узел (источник электронов); набор электромагнитных линз для фор-

мирования электронного пучка заданного размера и его фокусировки в плоскости создания топологического рисунка на поверхности; электростатические системы для отклонения и бланкирования электронного луча; стигматоры для коррекции формы электронного пучка.

В электронно-оптическую систему входят датчики: детектор отраженных электронов (ДОЭ); измеритель тока над апертурной диафрагмой (ТАД); система измерения высоты между боковым эталонным объектом и экспонируемой подложкой; лазерная интерферометрическая система для измерения положения координатного стола. Управление перечисленными элементами электронно-оптической системы (ЭОС) осуществляется подачей на них тока или напряжения. Формируемое значение тока должно быть высокоточным и удерживаться с высокой стабильностью продолжительное время. Управляющие напряжения должны динамично и точно изменяться, что позволит качественно сформировать заданное изображение с минимальными временными затратами.

Структурная схема многоканального модуля стабилизатора тока представлена на рис. 3. Структурная схема блока управления электростатическими системами имеет аналогичный вид.

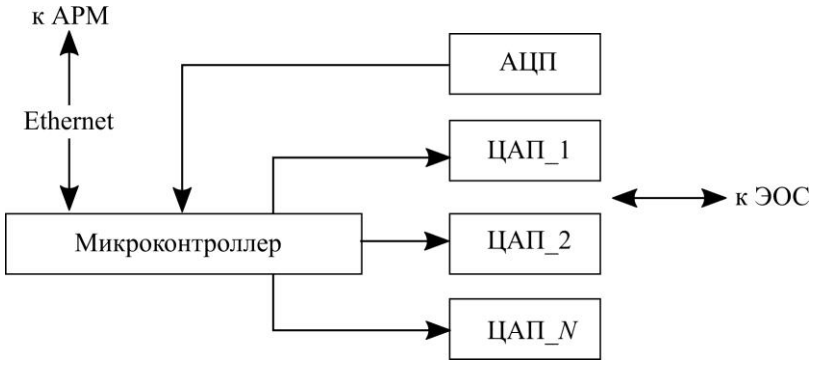


Рис. 3. Структурная схема модуля стабилизатора тока
Fig. 3. Structural diagram of the current stabilizer module

Синхронизация работы всей системы осуществляется на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора, в задачи которого входит загрузка файла с изображением (поддерживаются форматы GDS II, OASIS) и запуск рецепта, содержащего последовательность шагов для реализации полного технологического цикла формирования изображения на изделии.

Заключение. Предложенная распределенная иерархическая система может использоваться при управлении технологическими процессами в производстве изделий микроэлектроники. Разработанные технические решения для системы управления электронно-лучевым литографом могут быть полезны при создании АСУ специальным технологическим оборудованием электронного машиностроения.

Литература / References

1. Без своего электронного машиностроения не будет суверенной микроэлектроники. *Российский форум «Микроэлектроника».* 2015–2024. Available at: https://microelectronica.pro/news/forum_plenarnoe_zasedanie_4_20231012 (accessed: 25.06.2025).
Without own electronic engineering there will be no independent microelectronics. *Rossiyskiy forum "Mikroelektronika".* 2015–2024. (In Russ.). Available at: https://microelectronica.pro/news/forum_plenarnoe_zasedanie_4_20231012 (accessed: 25.06.2025).

2. Макеев А. С. Анализ АСУ ТП дожимной насосной станции в рамках процесса управления рисками ИБ. In: *Технические науки: теория и практика:* материалы III Междунар. науч. конф. (г. Чита, 20–23 апреля 2016 г.). Чита: Молодой ученый; 2016, с. 9–15. EDN: VYIAMJ.
Makeev A. S. Analysis of APCS of booster pump station as part of information security risk management. In: *Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika:* proc. of 3rd International sci. conf. (Chita, Apr. 20–23, 216). Chita: Molodoy uchenyy Publ.; 2016, pp. 9–15. (In Russ.).
3. *Automation Mall:* online platform. Available at: https://www.otomasyonavm.com (accessed: 17.03.2025).
4. *Yokogawa Electric Corporation.* Available at: https://www.yokogawa.com/ (accessed: 25.06.2025).
5. *B&R Industrial Automation.* Available at: https://www.br-automation.com (accessed: 17.03.2025).
6. SIMATIC PCS 7 – the distributed control system with proven performance. *Siemens Global.* Available at: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-control/simatic-pcs-7.html (accessed: 25.06.2025).
7. *Открытая АСУ ТП:* межотраслевая рабочая группа. Available at: https://openapc.ru/ (accessed: 25.06.2025).
Open Automated Process Control System: interindustry workgroup. (In Russ.). Available at: https://openapc.ru/ (accessed: 25.06.2025).
8. *Ассоциация предприятий «Электронное машиностроение».* Available at: https://elmashrussia.ru/ (accessed: 25.06.2025).
"Electronic Engineering" Industry Association. (In Russ.). Available at: https://elmashrussia.ru/ (accessed: 25.06.2025).
9. Modicon: popular PLCs since 1968. *Schneider Electric India.* Available at: https://www.se.com/in/en/about-us/events/modicon.jsp (accessed: 25.06.2025).
10. *ОВЕН: оборудование для автоматизации.* Available at: https://owen.ru (accessed: 25.06.2025).
OWEN: automation equipment. (In Russ.). Available at: https://owen.ru (accessed: 25.06.2025).
11. *НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ.* Available at: https://www.niisi.ru/ (accessed: 25.06.2025).
NRC "Kurchatov Institute" – SRISA. (In Russ.). Available at: https://www.niisi.ru/ (accessed: 25.06.2025).
12. *ИНЭУМ им. И. С. Брука.* Available at: http://www.ineum.ru/ (accessed: 25.06.2025).
INEUM n. a. I. S. Bruk. (In Russ.). Available at: http://www.ineum.ru/ (accessed: 25.06.2025).
13. *Beremiz Project's Homepage.* Available at: https://beremiz.org/ (accessed: 25.06.2025).
14. Hartner F., Fischer M. Software-defined automation: Part 1 – Living on the (industrial) edge. *Siemens Blog.* 17.09.2024. Available at: https://blog.siemens.com/2024/09/software-defined-automation-part-1-living-on-the-industrial-edge/ (accessed: 25.06.2025).
15. Решение для виртуальной безопасности от CODESYS получило сертификацию. *Современная электроника и технологии автоматизации.* 30.01.2025. Available at: https://www.cta.ru/news/cta/181039.html (accessed: 25.06.2025).
Virtual safety solution from CODESYS has been certified. *Automation.com.* 29.01.2025. Available at: https://www.automation.com/en-us/articles/january-2025/codesys-virtual-safety-solution-certified (accessed: 25.06.2025).
16. Хамфри Д. Виртуальный ПЛК – следующий шаг в цифровой трансформации архитектур автоматизации. *МЗТА*. Available at: https://www.mzta.ru/o-kompanii/stati/virtualnyj-plk-sleduyushchij-shag-v-tsifrovoj-transformatsii-arkhitektur-avtomatizatsii (accessed: 25.06.2025).
Humphrey D. Virtual PLC: The next step in digital transformation of automation architectures. *LinkedIn.* 02.05.2024. Available at: https://www.linkedin.com/pulse/virtual-plc-next-step-digital-transformation-david-humphrey-ofnif/ (accessed: 25.06.2025).
17. *SEMI: Fostering global collaboration in the semiconductor industry.* Available at: https://www.semi.org/en (accessed: 25.06.2025).

Информация об авторах

Переверзев Алексей Леонидович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационному развитию, директор Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pal@olvs.miee.ru

Петров Владимир Федорович – кандидат технических наук, заместитель директора Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pvf@olvs.miee.ru

Петров Олег Владимирович – кандидат технических наук, начальник отдела Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), povmiet@yandex.ru

Симонов Сергей Борисович – кандидат технических наук, начальник отдела Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sbbdex@yandex.ru

Терентьев Алексей Игоревич – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aaattt@mail.ru

Information about the authors

Alexey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Innovative Development, Director of the Institute of Micro Devices and Control Systems, Leading Researcher of the Research Institute of Computing Tools and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pal@olvs.miee.ru

Vladimir F. Petrov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pvf@olvs.miee.ru

Oleg V. Petrov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), povmiet@yandex.ru

Sergey B. Simonov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sbbdex@yandex.ru

Alexey I. Terentev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aaattt@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 24.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 29.05.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья
УДК 621.371.32
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-628-640
EDN: ZXAJTB

Методы построения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов

А. Л. Переверзев*, К. С. Лялин, В. К. Цветков, Ю. М. Мелёшин, В. А. Козлов, И. А. Кузьмин

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

* *pal@olvs.miee.ru*

Аннотация. Интенсификация средств дистанционного зондирования Земли обусловливает развитие спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов. Выделяют основные направления их технической реализации: на базе гибридных зеркальных антенн и активных фазированных антенных решеток. Обозначенные направления не только определяют облик отдельно взятого космического аппарата, но и влияют на облик и требования к группировке спутников в целом. Разные технические реализации, в свою очередь, предоставляют различные возможности и функции радиолокационных систем. В работе рассмотрены ключевые тенденции создания радиолокаторов с синтезированной апертурой. Предложен вариант архитектуры бортового радиолокационного комплекса для малого космического аппарата на базе цифровой активной фазированной антенной решетки. Показано, что разработанная архитектура позволяет вести съемку широкополосными зондирующими сигналами в широком диапазоне углов визирования без поворота космического аппарата, допускает применение технологии MIMO-радиолокации и позволяет решать задачи однопролетной интерферометрии и селекции движущихся целей.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, РСА, активная фазированная антенная решетка, АФАР, MIMO-радиолокация, малый космический аппарат, МКА

Для цитирования: Переверзев А. Л., Лялин К. С., Цветков В. К., Мелёшин Ю. М., Козлов В. А., Кузьмин И. А. Методы построения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):628–640. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-628-640. EDN: ZXAJTB.

© А. Л. Переверзев, К. С. Лялин, В. К. Цветков, Ю. М. Мелёшин, В. А. Козлов, И. А. Кузьмин, 2025

Original article

Methods for constructing satellite radars with synthetic aperture for small spacecrafts

A. L. Pereverzev**, *K. S. Lyalin, V. K. Tsvetkov, Yu. M. Meleshin, V. A. Kozlov, I. A. Kuzmin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *pal@olvs.miee.ru*

Abstract. The intensification of the Earth remote sensing determines the development of satellite radars with synthetic aperture for small spacecrafts. The main paths of their technical implementation are distinguished: based on hybrid mirror antennas and on active phased-array antennas. The designated implementation paths not only determine the appearance of a single spacecraft, but also affect the appearance of and requirements for the constellation of satellites as a whole. Different technical implementations, in turn, provide various capabilities and functions of radar systems. In this work, the key trends in creating synthetic aperture radars are considered. A variant of the architecture of an onboard radar complex for a small spacecraft on the basis of an AESA based digital beamforming antenna array is proposed. It has been demonstrated that the developed architecture makes it possible to survey with broadband probe signals in a wide range of viewing angles without rotating the spacecraft, permits the use of MIMO radar technology and allows solving problems of single-flight interferometry and moving target selection.

Keywords: synthetic aperture radar, SAR, active phased array antenna, AESA, MIMO, small spacecraft, SSC

For citation: Pereverzev A. L., Lyalin K. S., Tsvetkov V. K., Meleshin Yu. M., Kozlov V. A., Kuzmin I. A. Methods for constructing satellite radars with synthetic aperture for small spacecrafts. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):628–640. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-628-640.

Введение. Современные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать радиолокационные изображения субметрового разрешения. Таким образом, РСА по своим характеристикам становятся соотносимыми с оптическими системами спутникового ДЗЗ. Кроме того, РСА имеют преимущество перед оптическими средствами, а именно возможность работы в условиях ограниченной оптической видимости (облачность, темное время суток, задымление и т. д.) [1]. Следует отметить интенсивный рост числа запусков космических аппаратов (КА) с РСА в качестве полезной нагрузки. Так, по данным из открытых источников, в 2021 г. насчитывалось 9 запусков спутников с РСА, в 2023 г. на орбиту выведено уже 30 спутников [2].

Увеличение числа выводимых спутников ведет к образованию устойчивого рынка оказания услуг радиолокационной съемки, появлению компаний, деятельность которых направлена на создание бортовой аппаратуры РСА и ее эксплуатацию, систематизацию разведывательной деятельности с использованием РСА. Унификация технических решений в рамках деятельности отдельно взятой компании-разработчика РСА экономически обоснована. Тенденции по созданию РСА малых космических аппаратов (МКА)

хорошо прослеживаются на примерах деятельности наиболее успешных коммерческих и некоммерческих компаний.

В настоящей работе рассматриваются ключевые направления создания радиолокаторов с синтезированной апертурой. Предлагается вариант архитектуры бортового радиолокационного комплекса для МКА на базе цифровой активной фазированной антенной решетки (ЦАФАР).

Характеристики современных РСА МКА. В таблице приведены технические характеристики спутников радиолокационного ДЗЗ, выведенных на орбиту в последние годы наиболее крупными компаниями.

Технические характеристики спутников радиолокационного ДЗЗ

Technical characteristics of satellites for radar remote sensing of the Earth

Наименование спутника	Год запуска	Высота орбиты, км	Диапазон частот	Тип антенны	Разрешение, м	Радиометрическая чувствительность, дБ	Средняя потребляемая мощность, Вт
Capella 1-11 (США)	2018–2023	535–585	X	ГЗА	spot 0,3/0,5 м strip 6–12 м	–14...–20	600
Umbra 01-08 (США)	2021–2023	522–535	X	ЗА	spot 0,16–2 м (до 4 км) strip 3 м (до 20 км)	–18	500
Iceye-X1-X24, Iceye-X21, 22, 27, Iceye-X23, 25, 26, 30 (Финляндия)	2018–2023	540–570	X	АФАР	spot 1 м (5 км) strip 2,5 м (5–40 км) strip 6–12 м (5–40 км)	–15...–18	4000
QPS-SAR № 1–6 (Япония)	2019–2023	584	X	ЗА	spot 0,46 м (7 км) strip 0,5–2 м (14 км)	–20	2000
Yaogan 33-01R, Yaogan 33-02, Yaogan 33-03, Yaogan 33-04 (Китай)	2020–2023	628–701	X	ФАР	spot 0,5 м (8 км) strip 1 м (16 км) strip 1,5 м (30 км)	–15...–20	–
Gao Fen 3, Gao Fen 12, 12-02, CSAR-1, CSAR-2, Gao Fen 12-03, Gao Fen 12-04 (Китай)	2016–2023	635–758	C	АФАР	spot 1 м (10 км) strip 3–25 м (50–130 км) scan 50–500 км (650 км)	–22	1800
Ludi Tance 1-01A, Ludi Tance 1-02A (Китай)	2022	600	L	АФАР	3–20 м (400 км)	–	–

Примечание: ГЗА – гибридная зеркальная антенна; ЗА – зеркальная антенна; АФАР – активная фазированная антенная решетка; ФАР – фазированная антенная решетка; spot – прожекторный режим съемки, при котором зона интереса находится «в луче» диаграммы направленности антенны (ДНА) за счет электронного сканирования (управления лучом ДНА) или поворота КА; strip – маршрутный режим (классический РСА), при котором направление диаграммы направленности не меняется по отношению к траектории полета КА; scan – режим работы РСА, при котором происдит съемка нескольких зон (полос) захвата за счет электронного сканирования.

Активно эксплуатируются зарубежные и отечественные системы ДЗЗ (рис. 1). В России в настоящее время на стадии эксплуатации находятся КА типа «Кондор-ФКА» № 1 и «Кондор-ФКА» № 2 на базе ГЗА, работающие в S-радиолокационном диапазоне частот. Высота орбиты 520 км, ширина полосы обзора 500 км (в обе стороны от аппарата – 1000 км). Разрешение: 1–2 м в прожекторном режиме, 6–12 м в обзорном режиме. Запланированы запуски трех и четырех спутников в 2026 и 2030 гг. соответственно [3]. Среди состоявшихся миссий выделим наиболее известные: Sentinel 1A-1D (ЕС) на базе АФАР С-диапазона [4], COSMO-SkyMed на базе АФАР X-диапазона [5], TerraSAR-X на базе АФАР X-диапазона и TanDEM-X на базе двух систем TerraSAR-X [6].

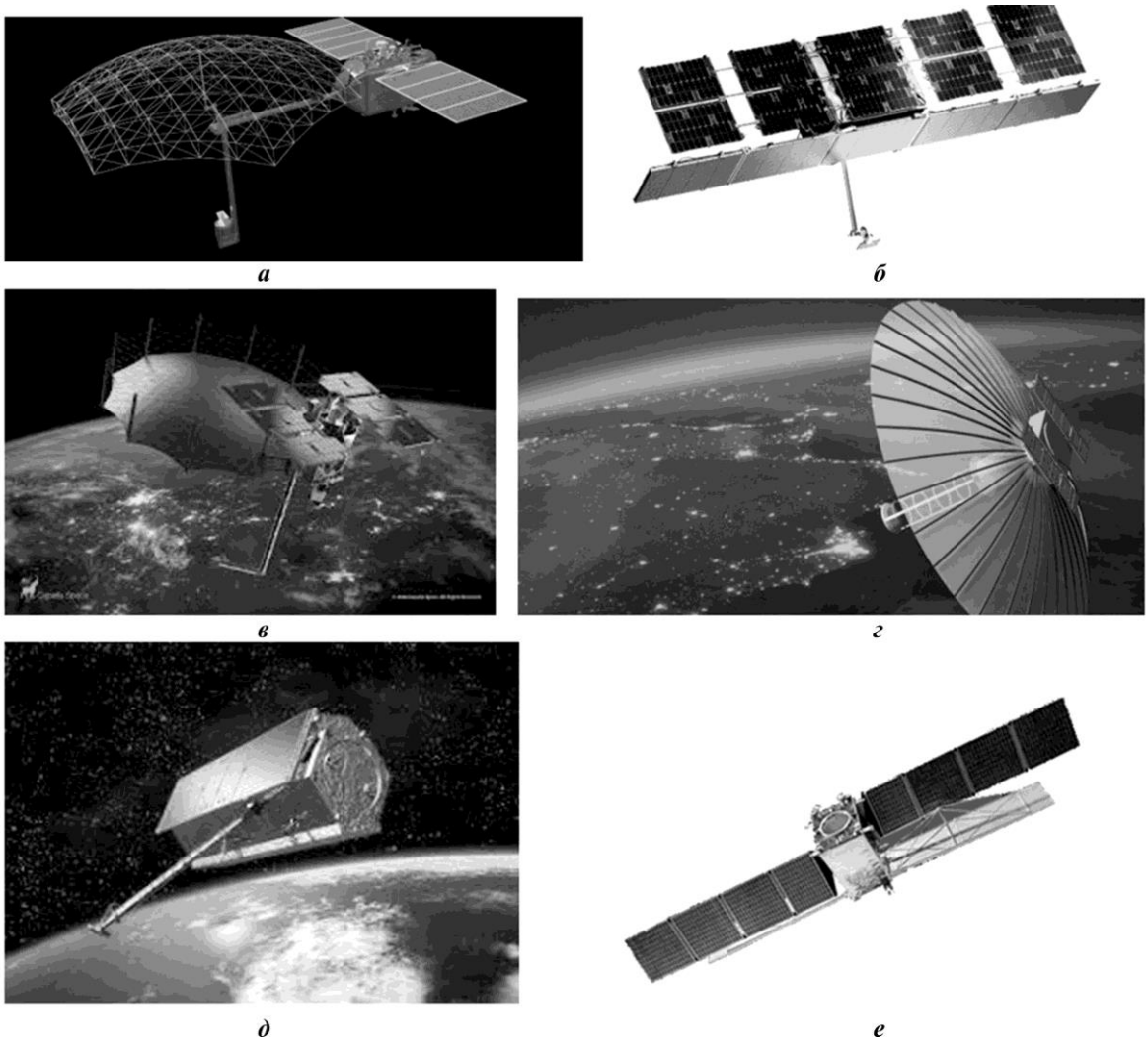


Рис. 1. Изображения эксплуатируемых РСА МКА «Кондор-ФКА» (*а*), ICEYE (*б*), Capella (*в*), Umbra (*г*), TerraSAR-X (*д*), Gao Fen 3 (*е*)
Fig. 1. Space SAR Kondor-FKA (*a*), ICEYE (*b*), Capella (*c*), Umbra (*d*), TerraSAR-X (*e*), Gao Fen 3 (*f*)

Результаты анализа характеристик РСА МКА позволяют определить ряд тенденций. Так, например, наибольший (но не исключительный) интерес представляют решения для РСА МКА в X-диапазоне частот, что обусловлено возможностью достижения высокого разрешения получаемых изображений вплоть до 12,5 см (в том числе за счет увеличения доступного для работы частотного ресурса от 600 до 1200 МГц), приемлемыми потерями в атмосфере при распространении сигналов, относительно малыми

размерами антенн. Повышенное за счет ширины полосы сигнала разрешение по дальности в пределах 12,5–30 см позволяет работать с большими углами визирования (25–65°) с сохранением конкурентного разрешения на местности, что, в свою очередь, позволяет получить больший сектор ответственности (доступной к съемке местности) РСА МКА при условии обеспечения требуемого энергетического бюджета.

Осваиваются также P-, L-, S- и C-диапазоны частот. Для P-диапазона характерна повышенная проникающая способность радиоволн. Бистатический РСА «Аист-2Д» был запущен в 2016 г. на орбиту 490 км, имеет разрешение 5 × 5 м, директорную антенну типа «волновой канал» [7, 8]. Для L-диапазона характерно малое значение потерь в ионосфере, в 2022 г. запущены на орбиту 600 км МКА Ludi Tance 1-01A и Ludi Tance 1-02A (КНР) на базе АФАР с разрешением 3–20 м. L- и P-диапазоны характеризуются значительными размерами антенн. В S-диапазоне частот работают отечественные РСА «Кондор-ФКА». Изображения в данном диапазоне имеют лучшую контрастность по сравнению с X-диапазоном, предположительно, ввиду меньшего отражения от поверхности Земли. Изображения в S-диапазоне также позволяют обнаружить объекты, не наблюдаемые в изображениях РСА X-диапазона [9]. В целом возможности РСА данного диапазона находятся в стадии изучения.

Прослеживаются два основных тренда при выборе ключевого технического решения в части антенно-фидерной системы и СВЧ-устройств – использование АФАР и ГЗА [10–13]. РСА на базе ГЗА присущи следующие особенности: потребность в системе развертывания рефлектора (зеркала) антенны (для крупногабаритных антенн); ограничения (или отсутствие) возможностей электронного управления лучом; высокий коэффициент усиления антенны. Система развертывания, помимо требований к наличию у разработчика соответствующей компетенции, приводит к появлению дополнительного узла потенциального отказа: системы в виде исполнительных механизмов, пирорезаков, пружин и т. д. В качестве облучателя ГЗА могут быть использованы компактные АФАР либо многоканальные облучатели, что позволяет формировать веерные ДНА либо сканировать лучом ДНА. Отметим, что РСА на базе ГЗА с возможностью сканирования используют антенны большего размера, чем у АФАР.

Применение АФАР в качестве основной антенны способствует гибкому управлению лучом ДНА, отработке высокодетальных режимов съемки, работе в сканирующих режимах с возможностью точного выбора интересующих областей захвата без поворота КА [14, 16, 17]. При этом, как правило, АФАР требуют большей энерговооруженности КА. Важной технической проблемой РСА на базе АФАР является ограничение углов сканирования для широкополосных режимов излучения, необходимых для получения изображений высокого разрешения [15]. Данное ограничение преодолевается установкой коммутируемых линий задержки на сегментах АФАР, обеспечивающих компенсацию запаздывания сигналов в пространстве [16]. На рис. 2 продемонстрирован вариант структурной схемы АФАР РСА X-диапазона [16].

Среди РСА КА немало вариантов исполнения для относительно больших КА. По технико-технологическим характеристикам такие РСА превосходят по качеству изображений РСА МКА. В то же время подход к выполнению РСА МКА предполагает вывод на орбиту группировки аппаратов, обеспечивающих оперативность, взаимозаменяемость в случае выхода из строя и снижение удельной стоимости полезной нагрузки [18–21]. Подходы к компоновке полезной нагрузки предполагают переход к унифицированной платформе [22], оптимизацию энергетических параметров полезной нагрузки [23, 24].

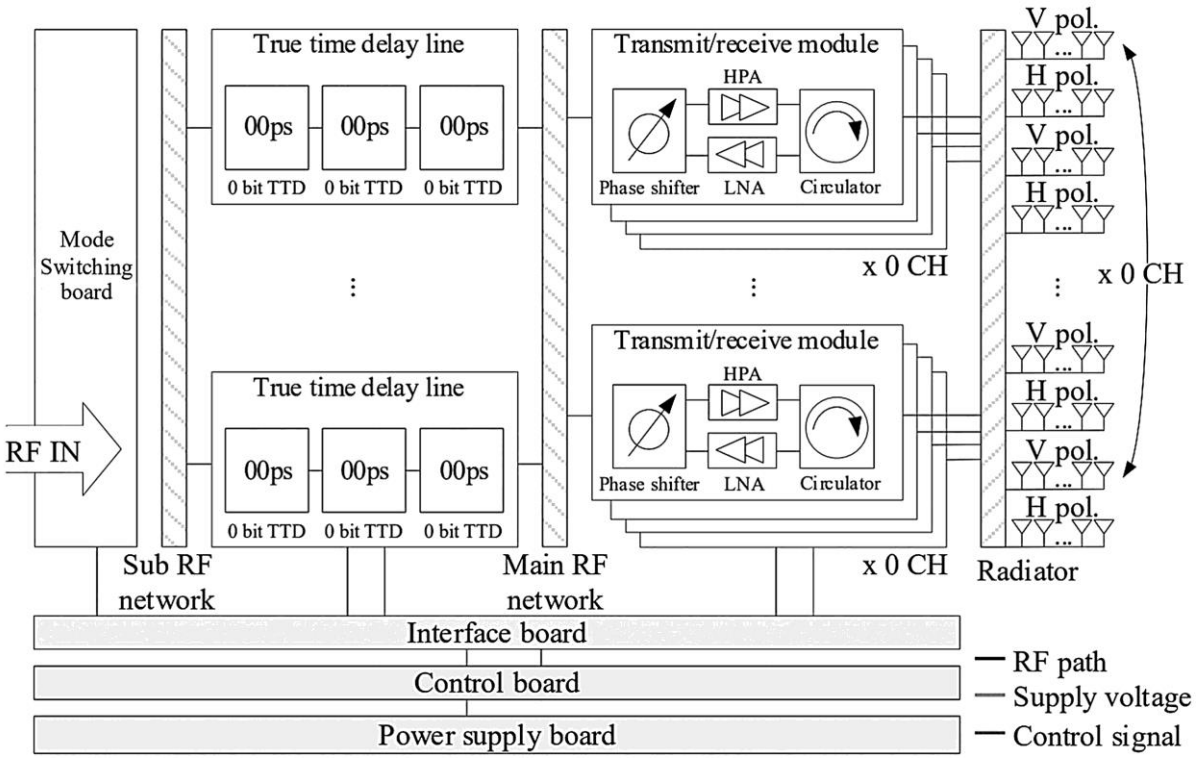


Рис. 2. Вариант структуры широкополосной АФАР РСА [16]
Fig. 2. Variant of wideband AESA SAR structure [16]

Вариант построения РСА МКА на базе ЦАФАР. В соответствии с актуальными потребностями потенциального потребителя радиолокационной информации РСА МКА должен обеспечивать съемку поверхности Земли в маршрутном (полосовом), прожекторном (высокодетальном) и сканирующем (с возможностью снижения разрешения на удаленных зонах съемки) режимах. Потребная ширина полосы захвата не менее 4 км, радиометрическая чувствительность не более –20 дБ. Предельное значение разрешения РСА X-диапазона равно 0,25 см [25]. Полоса обзора не менее 200 км по одну сторону от линии пути (в обе стороны 400 км). Актуальные требования следующие: наличие системы селекции движущихся целей (СДЦ), интерферометрия средствами одного аппарата (построение цифровой модели рельефа), съемка в полнополяризационном режиме [26].

Таким образом, система может быть реализована на базе АФАР. В качестве излучающего элемента допустимо рассматривать плоскопечатный излучатель (одиночный или групповой). Приемопередающий модуль может быть реализован по схеме, представленной на рис. 3. Структура модуля предполагает наличие двух пар антенных коммутаторов (на базе ключей или циркуляторов), отвечающих за переключение поляризации и режимов приема-передачи. Наличие ключей в тракте обусловливает дополнительные потери на передачу и рост эффективной шумовой температуры при приеме. Снизить потери коммутации возможно за счет разнесенных по апертуре приемной и передающей АФАР (рис. 4). Очевидно, что размер системы при этом значительно увеличивается.

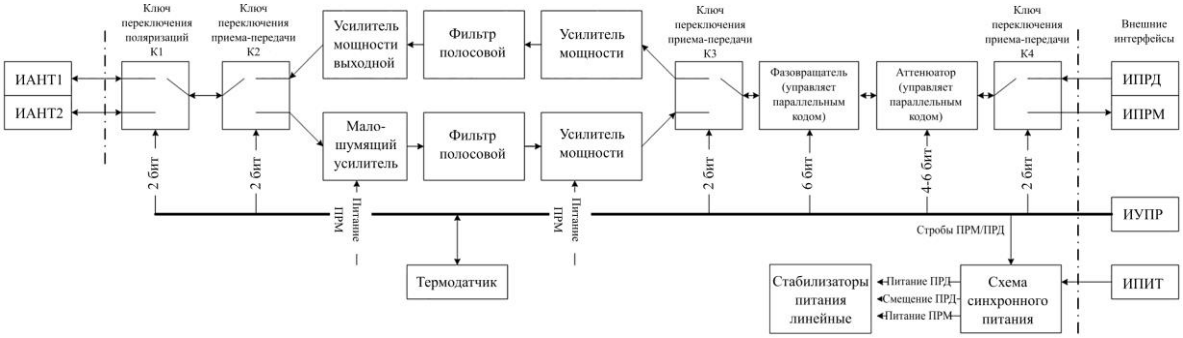


Рис. 3. Структура приемопередающего модуля РСА МКА (ИАНТ – излучатель антенны, ИПИТ – интерфейс питания, ИУПР – интерфейс управления, ИПРД – интерфейс передачи, ИПРМ – интерфейс приема)
Fig. 3. SAR SSC transceiver structure (ИАНТ – antenna emitter, ИПИТ – power interface, ИУПР – control interface, ИПРД – transmission interface, ИПРМ – reception interface)

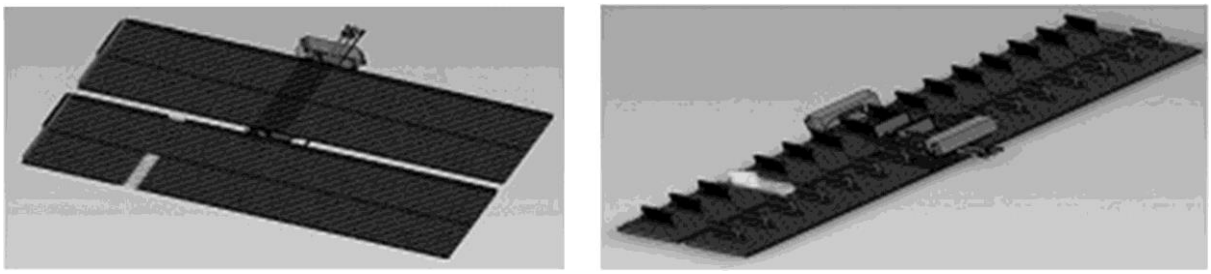


Рис. 4. Модель РСА МКА на базе ЦАФАР
Fig. 4. Digital beamforming SAR SSC model

Размер предлагаемой апертуры (приемной или передающей) 3,2 × 0,8 м. Для обеспечения широкого сектора сканирования в режимах высокого разрешения без использования линий задержки, реализации алгоритмов СДЦ, однопролетной интерферометрии предлагается архитектура РСА на базе ЦАФАР, где каналы АФАР сгруппированы по подрешеткам, каждая из которых представляет собой самостоятельную приемную и/или передающую систему (рис. 5). Независимые каналы приема-передачи позволяют скомпенсировать задержки сигналов, сформировать диаграммы направленности для широкополосных сигналов в большом диапазоне углов сканирования (±20…60°) в зависимости от количества подрешеток цифровой антенной решетки (ЦАР) в соответствующей плоскости сканирования. Предложенная архитектура также позволяет реализовать работу алгоритмов MIMO в РСА, благодаря которым возможны построение цифровых моделей рельефа и селекция движущихся целей за один пролет РСА.

Структурная схема РСА на базе ЦАФАР представлена на рис. 6. Рассматривается вариант раздельной приемной и передающей подсистемы. Антенное полотно состоит из излучающих элементов (групповых или одиночных) с двумя поляризациями. Соединение ПРД- и ПРМ-модулей (передатчик и приемник) с антенной может осуществляться через антенный интерфейс (герметичный переход, кросс-плата со схемой суммирования/деления и т. п.). Модули АФАР через аналоговые схемы суммирования/деления подключены соответственно к приемным и передающим модулям ЦАР, в которых осуществляется перенос частоты (демодуляция), основная селекция сигнала, аналого-цифровое преобразование, цифровая обработка сигналов, диаграммообразование.

Блок формирования и обработки сигналов отвечает за генерацию зондирующих последовательностей, запись принятых сигналов, предобработку (сжатие, децимация и т. д.) и передачу данных в запоминающее устройство или в высокоскоростной радиоканал передачи данных на наземный пункт обработки.

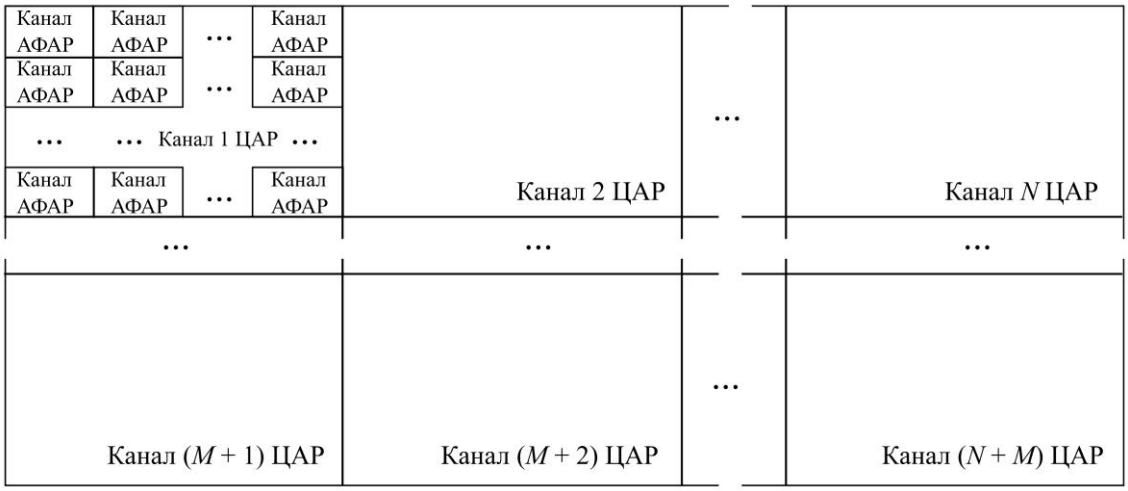


Рис. 5. Распределение каналов ЦАР в ЦАФАР
Fig. 5. Digital beamforming SAR channel distribution

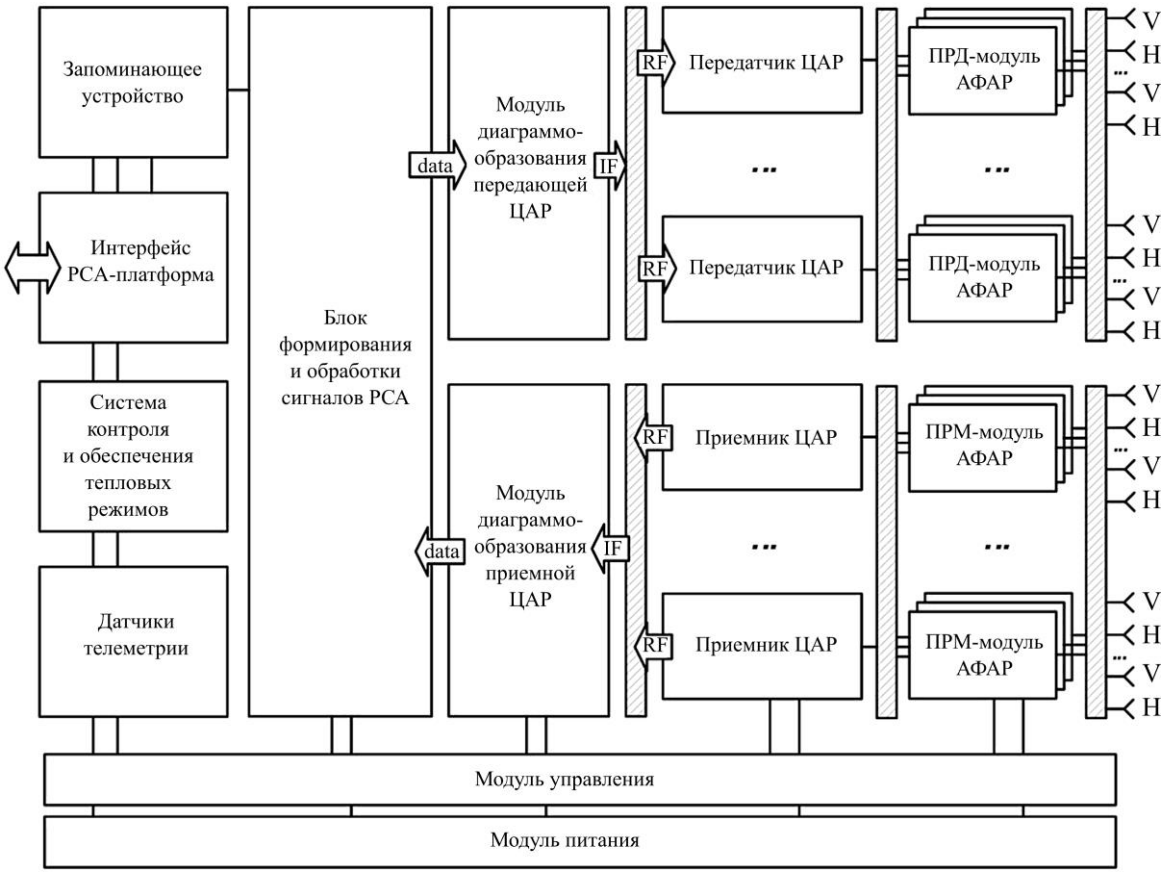


Рис. 6. Структурная схема РСА на базе ЦАФАР
Fig. 6. Digital beamforming SAR structure

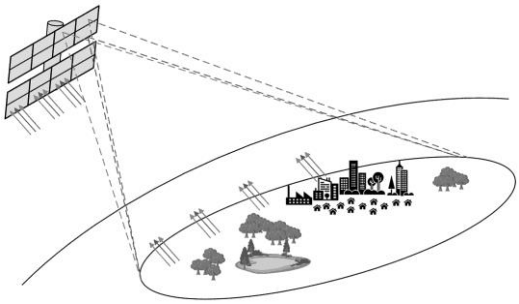


Рис. 7. Работа MIMO-РСА
Fig. 7. MIMO SAR operation

ЦАФАР предоставляет возможности съемки в режиме MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) (рис. 7). В MIMO ЦАФАР каждая подрешетка ЦАР излучает свой сигнал. Сигналы всех подрешеток взаимно ортогональны, формируются ДНА каждого канала ЦАР в отдельности. Размер подрешетки ЦАР заметно меньше размера всей антенной системы, поэтому зона захвата лучом ДНА будет значительно больше. Суммарный отраженный сигнал поступает на каждую приемную подрешетку. В устройстве обработки сигналов может быть выполнено сжатие по дальности с каждой из опорных последовательностей, использованных при излучении. За счет пространственного разнесения подрешеток возможна реализация алгоритмов формирования цифровых моделей рельефа, а также СДЦ. При этом в MIMO РСА сохраняются те же требования к энергетическому бюджету, что и в обычных РСА на базе АФАР [27, 28].

Число каналов MIMO, диаграмм направленности ЦАР ограничено вычислительными возможностями модуля диаграммообразования ЦАР и блока обработки сигналов. Дальнейшие исследования направлены на получение численных оценок ограничений числа каналов MIMO РСА с заданными характеристиками.

Заключение. Отмечаются два основных подхода в построении РСА МКА – на базе ГЗА и на базе АФАР. При потребности широкоугольного обзора в режимах сканирующей РСА наиболее подходящим решением является АФАР. В то же время при больших углах сканирования РСА высокого разрешения на базе АФАР должны оснащаться линиями задержки групповых или одиночных каналов.

Предложенная альтернативная архитектура АФАР на базе цифровой антенной решетки с применением технологии MIMO позволяет реализовать режимы СДЦ и однопролетной интерферометрии. В отличие от классических РСА на базе АФАР предложенная архитектура требует высокой вычислительной способности модулей цифровой обработки сигналов.

Литература / References

1. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Космические радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны. In: *Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн:* конспекты лекций (Муром, 28–30 июня 2022). Муром: МИ ВлГУ; 2022, вып. 1, с. 5–20. https://doi.org/10.24412/2304-0254-2022-1-5-20
   Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Space radar systems with synthesized antenna aperture. In: *Problemy distantsionnogo zondirovaniya, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln:* compendia of lectures (Murom, 28–30 iyunya 2022). Murom: MI VlGU Publ.; 2022, iss. 1, pp. 5–20. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2304-0254-2022-1-5-20
2. Костров В. В., Ракитин А. В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2023;(4):11–31. https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-4-11-31. EDN: EDJZTE.
   Kostrov V. V., Rakitin A. V. Radar space segment of remote sensing of the Earth in 2023: Status and development trends. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems.* 2023;(4):11–31. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2221-2574-2023-4-11-31
3. Космический аппарат «Кондор-ФКА». *НЦ ОМЗ.* 2023. Available at: https://ntsomz.ru/kondor_fka_1 (accessed: 09.07.2025).
   Space vehicle “Kondor-FKA”. *NTs OMZ.* 2023. (In Russ.). Available at: https://ntsomz.ru/kondor_fka_1 (accessed: 09.07.2025).

4. Sentinel-1: Radar vision for Copernicus. *European Space Agency.* Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (accessed: 09.07.2025).
5. COSMO-SkyMed: Dual system for the observation of Earth. *ASI: Agenzia Staziale Italiana.* Available at: https://www.asi.it/en/earth-science/cosmo-skymed/ (accessed: 09.07.2025).
6. Studying the Earth system from space. *DLR: Deutsches Zentrum für Luft- amd Raumfahrt.* Available at: https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/featured-topics/studying-the-earth-system-from-space (accessed: 09.07.2025).
7. Горячкин О. В., Женгуров Б. Г., Бакеев В. Б., Барабошин А. Ю., Невский А. В., Скоробогатов Е. Г. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой P-диапазона для МКА «Аист-2». *Электросвязь.* 2015;(8):34–39. EDN: UGALTD.
Goriachkin O. V., Gengurov B. G., Bakeev V. B., Baraboshin A. Yu., Nevsky A. V., Skorobogatov E. G. Bistatic P-band SAR for spacecraft “Aist-2D”. *Electrosvyaz.* 2015;(8):34–39. (In Russ.).
8. Невский А. В., Красильников Р. П. Особенности проектирования бортового радиопередающего устройства радиолокационного комплекса Аист-2. In: *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций:* материалы Всеросс. науч.-техн. конф. (Самара, 13–15 мая 2015). Самара: Изд-во Самарского Научного Центра; 2015, с. 75–77. EDN: UWWHIF.
Nevskiy A. V., Krasil’nikov R. P. Features of the design of the onboard radio transmitting device of the Aist-2 radar complex. In: *Aktual’nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy:* proceedings of Russia-wide sci.-tech. conf. (Samara, 13–15 maya 2015). Samara: Izd-vo Samarskogo Nauchnogo Tsentra Publ.; 2015, pp. 75–77. (In Russ.).
9. Бабокин М. И., Ефимов А. В., Зайцев С. Э., Карпов О. А., Костров В. В., Неронский Л. Б. и др. Итоги и уроки летных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э». In: *Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред:* материалы VII Всеросс. науч. конф. (Муром, 31 мая – 05 июня 2016). Муром: МИ ВлГУ; 2016, с. 16–36. EDN: WIIIZD.
Babokin M. I., Efimov A. V., Zaytsev S. E., Karpov O. A., Kostrov V. V., Neronskiy L. B. et al. Final results and lessons of flight tests of small satellite “Kondor-E” SAR. In: *Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred:* proceedings of 7th Russia-wide sci. conf. (Murom, 31 maya – 05 iyunya 2016). Murom: MI VlGU Publ.; 2016, pp. 16–36. (In Russ.).
10. Бабокин М. И., Ефимов А. В., Зайцев С. Э., Карпов О. А., Савосин Г. В., Титов М. П. и др. Космический аппарат «Кондор-Э» с РСА и его возможности. *Исследование Земли из космоса.* 2017;(3):85–95. https://doi.org/10.7868/S0205961417030010. EDN: YTLUGT.
Babokin M. I., Efimov A. V., Zaytsev S. E., Karpov O. A., Savosin G. V., Titov M. P. et al. The “Condor-E” spacecraft with SAR and its capabilities. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Observation and Remote Sensing.* 2017;(3):85–95. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0205961417030010
11. Андрианов В. И., Верба В. С., Енютин А. В., Козлов К. В., Курочкин А. П., Рыжов И. Ю., Турук В. Э. Гибридная зеркальная антенна S-диапазона для РСА космического базирования. *Антенны*. 2019;(2):15–21. https://doi.org/10.18127/j03209601-201902-02. EDN: ASBGVQ.
Andrianov V. I., Verba V. S., Enyutin A. V., Kozlov K. V., Kurochkin A. P., Ryzhov I. Yu., Turuk V. E. S-band array-fed reflector antenna for spaceborne SAR. *Antenny = Antennas.* 2019;(2):15–21. (In Russ.). https://doi.org/10.18127/j03209601-201902-02
12. Горячкин О. В., Маслов И. В. Особенности конструкции антенной системы для космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны L- и P-диапазона. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2016;15(3):153–162. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2016-15-3-153-162. EDN: XHPASV.
Goryachkin O. V., Maslov I. V. Analysis of an antenna system design for a synthetic L- and P-band aperture radar. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering.* 2016;15(3):153–162. (In Russ.). https://doi.org/10.18287/2541-7533-2016-15-3-153-162
13. Höyhtyä M. Satellite system architecture and different types of satellites. In: *Satellite Communications and Networks:* textbook. Cham: Springer; 2025, pp. 29–46. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72927-0_3
14. Булыгин М. Л. Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических РСА на базе АФАР. *Тр. МАИ.* 2018;(100):23. EDN: XTKWDZ.
Bulygin M. Realization specifics of multi-beam exposure modes with beams frequency separation in spaceborn synthetic aperture radar based on active phased-array antenna. *Trudy MAI.* 2018;(100):23. (In Russ.).

15. Ефимов А. В. Анализ положения дел в области создания сверхширокополосных РСА. In: *Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн:* материалы Всеросс. открыт. науч. конф. (Муром, 27–29 июня 2023). Муром: МИ ВлГУ; 2023, с. 353–362. https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-353-362. EDN: HMLCLO.
Efimov A. V. Analysis of the state of affairs in the field of creating ultra-wideband SAR. In: *Vserossiyskie otkrytye Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln:* proceedings of Russia-wide open sci. conf. (Murom, 27–29 iyunya 2023). Murom: MI VlGU Publ.; 2023, pp. 353–362. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-353-362
16. Khang G. G., Yang H.-J., Lee Yu., Kim J., Kim S. J., Jong Min Park. Design results of a wideband active electrically scanned array (AESA) antenna for X-band satellite synthetic aperture radar (SAR) application. In: *2024 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. Incheon: IEEE; 2024, pp. 1–2. https://doi.org/10.1109/ISAP62502.2024.10846658
17. Lu J., Sheng L., Zhang X., Lu X., Fang X., Peng G. Active phased array antenna for HISEA-1 satellite. In: *EUSAR 2024: 15th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Munich: IEEE; 2024, pp. 571–575.
18. Нафиева Е. Н., Гречищев А. В., Кучейко А. А. Современные космические радиолокационные системы мониторинга Земли. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг.* 2021;2(6):74–80. https://doi.org/10.23885/2500-123X-2021-2-6-74-80. EDN: PKBHHT.
Nafieva E. N., Grechishchev A. V., Kucheiko A. A. Modern space radar systems of Earth monitoring. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskiy monitoring = Ecology Economy Informatics. Geoinformation Technologies and Space Monitoring.* 2021;2(6):74–80. (In Russ.). https://doi.org/10.23885/2500-123X-2021-2-6-74-80
19. Лихачев В. П., Унковский А. В., Фурсов С. В. Состояние и перспективы применения малых космических аппаратов видовой радиолокационной разведки в космических силах ВС США. *Военная мысль*. 2022;(10):126–141. EDN: MTPUWR.
Likhachev V., Unkovsky A., Fursov S. The state and prospects of using small-size space vehicles of service radar reconnaissance in US Space Forces. *Voennaya mysl' = Military Thought.* 2022;(10):126–141. (In Russ.).
20. Сибирцев В. А., Сидельников Е. В. Анализ состояния и оценка перспектив развития иностранной космической радиолокационной видовой разведки. In: *Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы:* сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 18–19 мая 2022). Иваново: ИПК «ПресСто»; Воронежский институт ФСИН России; 2022, т. 1, с. 281–284. EDN: JHLANC.
Sibirtsev V. A., Sidel'nikov E. V. Analysis of the state and assessment of the development prospects of foreign space radar visual reconnaissance. In: *Tekhnika i bezopasnost' ob"ektov ugolovno-ispolnitel'noy sistemy:* conference materials of International res.-to-pract. conf. (Voronezh, 18–19 maya 2022). Ivanovo: IPK "PresSto" Publ.; VRI of the FPS of Russia; 2022, vol. 1, pp. 281–284. (In Russ.).
21. Коберниченко В. Г. Радиолокационные мини- и микроспутники: состояние и перспективы. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии.* 2021;(3):458–459. EDN: SWMFNV.
Kobernichenko V. G. Radar mini- and microsatellites: Status and prospects. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii = Microwave & Telecommunication Technology.* 2021;(3):458–459. (In Russ.).
22. Кульков В. М., Фирсюк С. О., Юров А. М., Тузиков С. А., Егоров Ю. Г., Юн С. У. Принципы построения и области применения малых космических аппаратов на базе унифицированных космических платформ. *Космические аппараты и технологии.* 2022;6(2):133–143. https://doi.org/10.26732/j.st.2022.2.08. EDN: ZPXEZV.
Kulkov V. M., Firsyuk S. O., Yurov A. M., Tuzikov S. A., Egorov Yu. G., Yoon S. W. Principles of construction and application areas of small spacecraft based on unified space platforms. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii = Spacecrafts and Technologies.* 2022;6(2):133–143. (In Russ.). https://doi.org/10.26732/j.st.2022.2.08
23. Иванушкин М. А., Жалдыбина О. Д., Сафронов С. Л., Коровин М. Д. Расчет параметров целевой аппаратуры космического аппарата радионаблюдения. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2024;23(3):18–30. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-3-18-30. EDN: SXYXFC.
Ivanushkin M. A., Zhaldybina O. D., Safronov S. L., Korovin M. D. Estimating the design parameters of a space-based radio surveillance system. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering.* 2024;23(3):18–30. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-3-18-30

24. Golkar A., Cataldo G., Osipova K. Small satellite synthetic aperture radar (SAR) design: A trade space exploration model. *Acta Astronaut.* 2021;187:458–474. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.07.009
25. Храмов К. К., Костров В. В. Оценка предельных параметров РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов. In: *Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн:* материалы Всеросс. открыт. науч. конф. (Муром, 27–29 июня 2023). Муром: МИ ВлГУ; 2023, с. 294–304. https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-294-304. EDN: CERDHA.
Khramov K. K., Kostrov V. V. Estimation of the limiting parameters of the X-band SAR based on small spacecraft. In: *Vserossiyskie otkrytye Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln:* proceedings of Russia-wide open sci. conf. (Murom, 27–29 iyunya 2023). Murom: MI VlGU Publ.; 2023, pp. 294–304. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-294-304
26. Hirobumi S., Ishimura K., Hirokawa J., Tomura T., Ijichi K., Tanaka K. Technical challenges for small SAR satellites with high performance. *Small Satellite Conference 2021 – Mission Operations & Autonomy.* Available at: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2021/all2021/172/ (accessed: 11.07.2025).
27. Цветков В. К., Лялин К. С., Переверзев А. Л., Орешкин В. И., Козлов В. А. Построение группировки малых космических аппаратов радиолокационного зондирования Земли и синтез требований к бортовой радиолокационной аппаратуре. *Наноиндустрия.* 2022;15(S8-1):50–53. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.50.53. EDN: GJXCFE.
Tsvetkov V. K., Lyalin K. S., Pereverzev A. L., Oreshkin V. I., Kozlov V. A. Remote sensing radars small spacecraft constellation and requirements to onboard radar equipment. *Nanoindustriya = Nanoindustry.* 2022;15(S8-1):50–53. (In Russ.). https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.8s.50.53
28. Kuzmin I. A., Tsvetkov V. K., Oreshkin V. I., Akashkin E. L., Dovgal T. A. Multi-position MIMO space SAR principles and signal processing. In: *2023 Seminar on Fields, Waves, Photonics and Electro-optics: Theory and Practical Applications (FWPE).* St. Petersburg: IEEE; 2023, pp. 41–44. https://doi.org/10.1109/FWPE60445.2023.10368584

Информация об авторах

Переверзев Алексей Леонидович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационному развитию, директор Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pal@olvs.miee.ru

Лялин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель главного конструктора НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ksl@miee.ru

Цветков Вадим Константинович – кандидат технических наук, инженер-электроник Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), tsvetkov_vk@mail.ru

Мелёшин Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kykymberr@gmail.com

Козлов Вадим Александрович – кандидат технических наук, инженер-электроник Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vk020165@gmail.com

Кузьмин Илья Александрович – инженер-электроник Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kuzmin.ilya.al@gmail.com

Information about the authors

Alexey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Innovative Development, Director of the Institute of Micro Devices and Control Systems, Leading Researcher of the Research Institute of Computing Tools and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pal@olvs.miee.ru,

Konstantin S. Lyalin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Deputy Chief Designer of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), 1ksl@miee.ru

Vadim K. Tsvetkov – Cand. Sci. (Eng.), Electronics Engineer of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), tsvetkov_vk@mail.ru

Yury M. Meleshin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kykymberr@gmail.com,

Vadim A. Kozlov – Cand. Sci. (Eng.), Electronics Engineer of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vk020165@gmail.com,

Ilya A. Kuzmin – Electronics Engineer of the Institute of Micro Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kuzmin.ilya.al@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 21.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

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

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2024 гг. доступны на сайте Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

Научная статья
УДК 621.382:616-089.843
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-641-656
EDN: ZZEOUZ

Нейроинтерфейсы живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг

С. А. Гаврилов[1], А. Ю. Герасименко[1*], А. А. Данилов[1], О. В. Нездоровин[2], В. Г. Нездоровина[2], И. В. Нестеренко[1], А. Л. Переверзев[1], К. В. Пожар[1], Д. И. Рябкин[1], С. В. Селищев[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия

[*] *gerasimenko@bms.zone*

Аннотация. Актуальность исследований в области нейроинтерфейсов живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг связана с увеличением числа заболеваний нервной системы и соответствующим ростом мирового рынка нейростимуляторов, предлагающих альтернативную медикаментозной терапию, более эффективную в ряде случаев. В работе проведены исследования в области микроэлектронных имплантируемых нейроинтерфейсов медицинского применения для борьбы с заболеваниями, связанными с хронической болью. Цель работы – получение научных результатов, объясняющих механизмы и закономерности мультимасштабного формирования с применением микроэлектронных технологий на нано-, микро-, макроуровнях нейроинтерфейсов живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг посредством сетевой структуры имплантируемых нейростимуляторов с биологическими обратными связями. Выделена и подробно рассмотрена проблематика ключевых технологий таких имплантируемых нейроинтерфейсов, в частности архитектура, энергообеспечение, биоподобные структуры, маркеры боли. Проведенные экспериментальные исследования на животной модели подтверждают теоретические результаты.

Ключевые слова: нейроинтерфейс, электрическая нейростимуляция, стимуляция спинного мозга, стимуляция с обратной связью, имплантируемый генератор

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-555).

© С. А. Гаврилов, А. Ю. Герасименко, А. А. Данилов, О. В. Нездоровин, В. Г. Нездоровина, И. В. Нестеренко, А. Л. Переверзев, К. В. Пожар, Д. И. Рябкин, С. В. Селищев, 2025

Для цитирования: Гаврилов С. А., Герасименко А. Ю., Данилов А. А., Нездоровин О. В., Нездоровина В. Г., Нестеренко И. В. и др. Нейроинтерфейсы живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):641–656. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-641-656. EDN: ZZEOUZ.

Original article

Neurointerfaces in bio-technical systems for the regulation of pain signal transmission to the brain

S. A. Gavrilov[1], A. Yu. Gerasimenko[1*], A. A. Danilov[1], O. V. Nezdorovin[2], V. G. Nezdorovina[2], I. V. Nesterenko[1], A. L. Pereverzev[1], K. V. Pozhar[1], D. I. Ryabkin[1], S. V. Selishchev[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

[*] *gerasimenko@bms.zone*

Abstract. The critical need for research into bio-technical neurointerface systems for pain signal modulation is related to the increasing prevalence of neurological disorders and corresponding expansion of the global neurostimulation market offering alternatives to pharmacological treatment, more effective in a range of cases. In this work, the investigations in the research domain of implantable microelectronic neurointerfaces for medical use in the treatment of chronic pain were conducted. The object of this work is to obtain scientific results explaining the mechanisms and principles underlying the multiscale formation – at the nano-, micro-, and macro-levels – of bio-technical neurointerfaces enabled by advanced microelectronic technologies for regulation of pain signal transmission to the brain through networked, implantable neurostimulators operating in multiple closed-loop configurations. The key technological challenges of these implantable neurointerfaces are identified and systematically analyzed, including system architecture, power supply solutions, biomimetic design, and pain biomarkers. Experimental validation using an animal model has been performed, confirming the theoretical assumptions.

Keywords: neurointerface, electrical neurostimulation, spinal cord stimulation, SCS, closed-loop stimulation, implantable pulse generator, IPG

Funding: the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-555).

For citation: Gavrilov S. A., Gerasimenko A. Yu., Danilov A. A., Nezdorovin O. V., Nezdorovina V. G., Nesterenko I. V. et al. Neurointerfaces in bio-technical systems for the regulation of pain signal transmission to the brain. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):641–656. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-641-656.

Введение. Одна из основных медико-социальных проблем на сегодняшний день – хроническая боль. До 20 % взрослого населения в мире страдают от хронической боли, причем в большинстве случаев боль оказывает существенное влияние на качество жизни и функциональную активность человека [1, 2]. В России хроническая боль имеет характер «молчаливой эпидемии», что подтвердило исследование, проведенное Российским обществом по изучению боли (РОИБ) при участии Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ). Так, в ходе опроса порядка 43 % респондентов указали на наличие хронической боли разной локализации [3].

На фоне роста распространенности хронической боли, а также недостаточной эффективности традиционной фармакотерапии технологии нейромодуляции, в частности стимуляции спинного мозга (Spinal Cord Stimulation, SCS), приобретают все большую значимость [4]. Доказано, что SCS способствует значительному снижению интенсивности боли, улучшению качества жизни и уменьшению потребности в анальгетиках, включая опиоиды [4, 5]. Таким образом, использование SCS представляет собой эффективную и обоснованную с медицинской и экономической точек зрения стратегию лечения хронической боли. Это свидетельствует о необходимости развития прикладных нейроинтерфейсов живых – технических систем и их внедрения в зарубежную и отечественную клиническую практику [6, 7].

Количество ежегодных имплантаций спинальных нейростимуляторов в США в 2018 г. достигало 23 000 и, по оценкам отраслевых аналитиков, в 2025 г. составит около 50 000 [8, 9]. Количественные данные показывают не только рост популярности SCS, но и качественную трансформацию этой методики из вспомогательной процедуры в один из центральных элементов при лечении хронической боли. По данным презентаций и публичных отчетов клиник, ежегодно выполняются десятки подобных вмешательств в крупнейших нейрохирургических центрах Российской Федерации, таких как НМИЦ им. В. А. Алмазова Минздрава России, НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко Минздрава России, ФЦН Минздрава России (г. Тюмень). Количество имплантаций SCS-устройств в России составляет в год несколько сотен, что согласуется с данными анкетирования, проводимого Обществом специалистов по функциональной и стереотаксической нейрохирургии.

Полагая одинаковую распространенность хронических болевых патологий, для обеспечения применения спинальной нейростимуляции в системе здравоохранения России количество имплантаций SCS-устройств должно составлять 20 000 ежегодно. Более чем десятикратное отставание фактического уровня количества имплантаций SCS-устройств от необходимого в первую очередь объясняется структурой мирового рынка систем электрической нейростимуляции и отсутствием предложения доступных отечественных систем. На мировом рынке устройств спинальной нейростимуляции доминируют компании США: Medtronic с долей порядка 45–50 % благодаря широкому ассортименту продуктов и глобальному присутствию; Boston Scientific и Abbott – около 25–30 и 15–20 % рынка соответственно. Специализирующаяся на продуктах с высокочастотной стимуляцией компания Nevro Corp контролирует около 16 % сегмента [10, 11].

В настоящей работе приводятся научные результаты, объясняющие механизмы и закономерности мультимасштабного формирования с применением микроэлектронных технологий на нано-, микро-, макроуровнях нейроинтерфейсов живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг посредством сетевой структуры имплантируемых нейростимуляторов с биологическими обратными связями.

Разработка нейростимуляторов в России. Начало хирургической нейромодуляции в России положено профессором В. А. Шабаловым, под медицинским руководством которого в ВНИИОФИ разработан и в 1995 г. в НИИ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко РАМН впервые применен отечественный нейростимулятор «Нейроэлект». Нейростимулятор состоял из имплантируемой приемной части, лишенной встроенного источника энергии, и индуктивно связанного с ней экстракорпорального передатчика, осуществляющего непрерывное питание имплантируемой части и формирование сигналов управления. «Нейроэлект» не мог обеспечить качество жизни пациентов, аналогичное системам со встроенным источником тока, имел ограниченные возможности программирования и был способен проводить только одностороннюю прерывистую стимуляцию [12]. На протяжении последующих тридцати лет исследования и разработки по имплантируемым системам нейростимуляции не проводились. Можно констатировать, что на сегодняшний день в нашей стране отсутствует сложившаяся научно-технологическая школа в области имплантируемых нейроинтерфейсов и нейростимуляции для применения в медицине.

В 2023 г. генеральным директором НМИЦ им. В. А. Алмазова Минздрава России академиком РАН Е. В. Шляхто и ректором МИЭТ членом-корреспондентом РАН В. А. Беспаловым благодаря активному участию вице-президента АО «Газпромбанк» С. А. Фурсенко было принято решение о сотрудничестве на междисциплинарной основе в целях создания конкурентоспособного отечественного нейростимулятора для лечения пациентов с хроническим болевым синдромом. Развитием этой инициативы стала победа МИЭТ в конкурсе, организованном Минобрнауки России, на проведение фундаментальных научных исследований [13]. В 2024 г. на базе МИЭТ была организована первая Международная научно-техническая конференция «Микроэлектронные имплантируемые нейроинтерфейсы 2024» (МИН-2024), в работе которой приняли участие более 300 человек.

Методы исследования. В настоящей работе использованы методы анализа – разложение рассматриваемых нейроинтерфейсов на составляющие их части, компоненты в целях достижения понимания физического смысла, фундаментальных закономерностей их взаимодействия. Использованы также методы обратного анализа – синтез сложной структуры нейроинтерфейсов путем определения соответствующих связей между составными частями, компонентами для задач технического проектирования.

Для анализа-синтеза микроэлектронных технологий формирования мультимасштабных имплантируемых нейроинтерфейсов живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг фундаментальным научным понятием принята обратная связь [14–17].

Все процедуры с участием лабораторных животных проводили в соответствии с «Политикой работы с лабораторными животными» НМИЦ им. В. А. Алмазова Минздрава России, разработанной на основе действующих в ЕС принципов [18, 19]. До начала исследования Комиссией по контролю содержания и использования лабораторных животных рассмотрены и одобрены планируемые условия содержания и использования животных в экспериментах, изложенные в протоколе-заявке # Ss/2_1124/25_2.

Обзор литературных источников. В работе [20] утверждается, что передача болевых сигналов осуществляется через интегративный центр (ворота) в спинном мозге. Он жестко регулируется головным мозгом посредством сложного взаимодействия между афферентными и эфферентными волокнами и расположен в сложной сети интернейронов дорсального рога спинного мозга. При рассмотрении информационных потоков в физиологической системе обработки болевой информации можно выделить восходя-

щие пути проведения информации, раздельные для острой и хронической боли, и нисходящие тормозящие пути, получающие сигнал в головном мозге [21]. Когда нервные ткани подвержены патологическому воздействию, может возникать нейропатическая боль. Такое состояние может быть вызвано как периферической, так и центральной сенсибилизацией [22, 23].

В работе [24] отмечено наличие локальных и глобальных обратных связей в физиологической системе обработки болевой информации. Разработка системы нейростимуляции должна исходить из того, что нервная система имеет пути возбуждения и торможения, охваченные петлями обратной связи. Нервная система является частным случаем общего процесса гомеостаза организма, осуществляемого посредством обратных связей различного типа. Таким образом, технические средства для лечения патологий нервной системы должны обладать возможностью получения информации от нервной системы для организации биоподобных замкнутых контуров управления. Разработка нейронных интерфейсов с замкнутым контуром управления может позволить проводить лечение широкого спектра заболеваний, связанных с острой и хронической болью. По сравнению с системами нейростимуляции без обратной связи система с замкнутым контуром является адаптивной и настраиваемой, и ее параметры можно регулировать для повышения терапевтической эффективности и/или минимизации побочных эффектов в режиме реального времени, осуществляя адресную стимуляцию [25].

Для адаптивного регулирования амплитуды стимулирующего сигнала применяют локальные контуры регулирования на основе анализа вызванных потенциалов действия, в частности составного вызванного потенциала действия (Evoked Compound Action Potential, ECAP) спинного мозга [26]. ECAP является биопотенциалом, генерируемым синхронной активацией волокон дорсального столба, и показателем объема тканей, возбужденных в результате импульса стимуляции.

Окончательные болевые ощущения формируются в головном мозге и, соответственно, поиск биомаркеров, отвечающих за уровень боли, для замыкания глобальной обратной связи следует начинать в разных отделах головного мозга. Как показано в [27], боль связана не только с пространственным распределением динамически активируемых областей мозга, но и со сложными временно-спектральными паттернами мозговой активности. В частности, наблюдаются связанные с болью нейронные колебания на частотах от сверхмедленных колебаний (менее 0,1 Гц) через тета-ритм (4–7 Гц), альфа-ритм (8–13 Гц) и бета-ритм (14–29 Гц) до гамма-ритмов (30–100 Гц). Однако декодирование значений этих колебаний для боли по-прежнему отсутствует. В исследовании [28] в качестве биомаркера боли успешно регистрировали значения потенциала локального поля (Local Field Potential, LFP), получаемые с хронических внутричерепных электродов, имплантированных в переднюю поясную кору и орбитофронтальную кору головного мозга.

Результаты и их обсуждение. Исходя из физиологических особенностей возникновения болевых ощущений предлагается в качестве одного из направлений дальнейших исследований провести разработку единой сетевой системы нейростимуляции, охваченной локальными и глобальными обратными связями, с использованием методов теории управления и системного анализа. В качестве сигналов локальной петли обратной связи рассматриваются сигналы ECAP, а для глобальной петли обратной связи – сигналы LFP разных областей головного мозга.

Регистрация сигналов LFP допустима только инвазивными методами, сопряженными с повышенным риском осложнений. Для принятия решения о применении таких

методов целесообразно провести исследования возможностей детектирования боли, не сопряженных с повышенными рисками. На текущем этапе работ исследовано использование в качестве биомаркеров боли сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) головного мозга, обладающих меньшим по сравнению с LFP пространственным разрешением, с последующей обработкой алгоритмами машинного обучения.

Для обучения алгоритма использовали открытые наборы данных ЭЭГ, включающие в себя записи активности мозга в состоянии покоя и при воздействии болевых стимулов. Детекцию боли осуществляли по сигналам ЭЭГ с применением ряда моделей бинарной классификации. Наилучшие результаты (точность более 94 %) показали ансамбли на основе решающих деревьев. Модель обучалась на статистических и частотных признаках, что соответствует мультимасштабной архитектуре микроэлектронных имплантируемых нейроинтерфейсов (МИН) и обеспечивает высокую точность детекции. В дальнейшем планируется адаптировать алгоритм для работы в режиме реального времени в составе имплантируемого устройства. Это расширит возможности нейроморфных систем и обеспечит динамическую обратную связь. Рассматривается также объединение данных ЭЭГ с другими биосигналами (например, ЭМГ, LFP) для повышения точности и оптимизации вычислительной нагрузки при внедрении в портативные устройства. Персонализированная терапия боли, основанная на таком подходе, может значительно улучшить качество жизни пациентов и открыть новые возможности в нейротехнологиях.

Одна из ключевых задач – исследование основ создания подсистемы энергообеспечения МИН. В настоящее время в серийных стимуляторах спинного мозга используются два основных метода энергообеспечения: питание от интегрированного в корпус имплантата разового химического источника тока, рассчитанного на длительную эксплуатацию (3–6 лет); питание от интегрированного в корпус аккумулятора емкостью, обеспечивающей функционирование нейростимулятора в течение нескольких дней, перезаряжаемого от внешнего зарядного устройств по беспроводному (индуктивному) каналу [29–31]. Первый метод обеспечивает автономность и высокую надежность устройства, второй – позволяет уменьшить габариты имплантата, гарантирует длительную продолжительность эксплуатации нейростимулятора без необходимости хирургического вмешательства для замены устройства и, наконец, предусматривает бóльшую свободу пациента при выборе режимов стимуляции, поскольку ресурс батареи в данном случае не является ограничивающим фактором. Последнее обстоятельство в сочетании с возможностью энергообеспечения устройства с расширенной функциональностью обусловило выбор второго метода.

Далее определен технический облик подсистемы энергообеспечения нейростимулятора, который может быть описан следующим образом [32, 33]:

– пара катушек индуктивности (внешняя передающая и имплантируемая принимающая) плоской концетрической формы без сердечников, внешний радиус принимающей катушки не превышает 30 мм, внешний радиус передающей катушки должен быть в 1,1–2,5 раза больше принимающей;

– внешний источник питания и генератор синусоидального сигнала с усилителем мощности класса E, подключенный к передающей катушке индуктивности;

– имплантируемый принимающий модуль с параллельной компенсацией реактивной мощности в LC-контуре, включающий в себя также выпрямитель и стабилизатор;

– имплантируемый контроллер заряда аккумулятора, содержащий автономное линейное зарядное устройство, схему защиты батареи и схему отключения питания;

– имплантируемый аккумулятор.

В качестве основной проблемы применения индуктивных систем для питания нейростимуляторов, на решение которой направлена настоящая работа, выбрана нестабильность процедуры зарядки аккумулятора, вызванная несоосным расположением передающей и принимающей катушек индуктивности, разделенных слоем кожи. Определяющими методами компенсации влияния смещений катушек индуктивности приняты методы активной и пассивной компенсации смещений. Проведенные на основе численного моделирования исследования позволили получить следующие результаты:

– метод оптимизации формы катушечной пары позволяет обеспечить заданный перепад мощности (не более 10 % от номинала при боковых смещениях 25 мм, равных радиусу принимающей катушки) для рабочих частот 85, 100 и 200 кГц при использовании передающей катушки индуктивности радиусом 31 мм [34–36];

– метод компенсации изменения отраженного импеданса при использовании для изменения емкости ключа с широтно-импульсной модуляцией сигнала позволяет при частоте управляющего сигнала 100 МГц обеспечить поддержание постоянной выходной мощности до 400 мВт, что полностью покрывает ожидаемый диапазон изменения выходной мощности [37].

Непосредственное взаимодействие на границе живых – технических систем осуществляется посредством электродных структур МИН. Важное качество таких структур –их биоподобность, которая может исключить границу между живой и искусственной материей. Основная проблема применения биоподобных интерфейсов – совокупность параметров, начиная от специфических размеров и геометрии и заканчивая электрическими и механическими свойствами для соответствия биологическим требованиям с точки зрения их инвазивности, селективности и производительности [38, 39]. Например, выгодной топологией биоподобного интерфейса является микроэлектродная матрица, представляющая собой тонкий слой, несущий встроенные структуры проводника [40, 41]. Плотное расположение носителей заряда позволяет активировать большее количество дискретных нейронов или групп нейронов, что приводит к повышению локализации и контроля желаемого биологического ответа [42]. Поэтому для эффективной стимуляции нервной ткани необходимо получить микроэлектродные матрицы с высокой плотностью контактных областей [43]. В большинстве имплантируемых устройств высокопроизводительные биоподобные интерфейсы характеризуются низким импедансом, высокими электропроводностью и емкостью инжекции заряда для зондирования и регистрации, для безопасной и обратимой стимуляции [44].

С одной стороны, для создания эффективных имплантируемых биоподобных интерфейсов необходимо уменьшать их размер, а с другой – уменьшение проводящего участка неизбежно сопровождается увеличением импеданса, а следовательно, и уменьшением отношения сигнал/шум. Поэтому размер биоподобного интерфейса для клинического использования определяется компромиссом между размером и чувствительностью [38]. Электроды с большей геометрической площадью поверхности могут инжектировать больше заряда до превышения электрохимически безопасных пределов [45]. Однако большие геометрические размеры ограничивают пространственную селективность и разрешение биоподобных интерфейсов [46]. Для того чтобы увеличить емкость инжекции заряда, высокую способность переноса заряда и низкого импеданса для доставки сигнала с более высоким разрешением, необходимо увеличить удельную поверхность электродной части биоподобного интерфейса, особенно учитывая ограниченность пространства в таком органе, как спинной мозг. Это позволит разместить большое количество электродов для повышения селективности, точности и снижения энергопотребления. Повышения удельной поверхности можно достичь с помощью двух

типов модификаций биоподобных интерфейсов: физические и химические методы для создания шероховатости поверхности; методы формирования поверхности при нанесении пленок, композитов и наноматериалов с более высокой удельной поверхностью и необходимыми электрохимическими характеристиками. При этом второй тип модификации обладает большей степенью управления структурными, механическими и электрофизическими параметрами поверхности за счет применения наноматериалов и их композиций с полимерами [47–51]. Нанотехнологии и наноматериалы позволяют создавать эффективные электроды с наноэлементами на основе золота, кремния, оксида индия-олова (ITO), нитрида титана (TiN), графена и углеродных нанотрубок [52]. Электроды, содержащие специальные шипы или трубчатые структуры с заданной топологией, позволяют взаимодействовать с мембраной и органелами клеток нервной ткани, обеспечивая чувствительную регистрацию электрических импульсов или передачу их в процессе стимулирования при деформации мембраны и ядра клеток, но без повреждения.

Перспективными материалами для создания биоподобных интерфейсов могут быть углеродные наноматериалы за счет высокой механической прочности и стабильности sp2-гибридизованной структуры при высоком аспектном отношении размеров [53]. Углеродные наноматериалы характеризуются высокой тепло- и электропроводностью, притом что размеры и структура сопоставимы с размерами и структурой основных белков внеклеточного матрикса [54]. С помощью внешнего воздействия возможно создавать каркасные структуры с соединениями, которые характеризуются sp3-гибридизацией [55]. К внешнему прецизионному воздействию можно отнести обработку лазерным излучением. Такая обработка слоев на основе углеродных нанотрубок на подложке и в объеме биосовместимой матрицы позволяет добиться управления структурой, механическими и электрофизическими характеристиками [56–59]. При электростимуляции важно доставлять заряд для активации потенциала действия без негативного воздействия на клетки. По этой причине необходимо обеспечить тесный контакт между биоподобным интерфейсом и нервной тканью с взаимным соответствием структур с обеих сторон [60]. Применение одномерного материала углеродных нанотрубок, обладающего высокой подвижностью электронов при высоких аспектном отношении и площади поверхности обеспечивает уровень чувствительности биоэлектронных компонентов для измерения электрофизиологических свойств человека при долговременном мониторинге [61]. Таким образом, углеродные нанотрубки могут быть использованы для формирования эффективных биоподобных интерфейсов с малыми площадями контактных площадок, но с высоким значением удельной поверхности при низком импедансе и высокой электропроводности как для стимулирующего воздействия и передачи электрических импульсов в ткани, так и для считывания сигналов с поверхности тканей [62].

Перспективным является формирование биоподобных интерфейсов на основе композиционных материалов со сложной атомно-молекулярной топологией на нано- и микроуровнях с высокой плотностью расположения носителей заряда. Для получения биоподобных интерфейсов определены механизмы формирования микроструктурированных элементов металлических электродов методом лазерной абляции в совокупности с синтезом композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок. Под действием лазерного излучения на нанотрубки с плотностью энергии в диапазоне 0,001–0,4 Дж/см^2 образуется углеродная каркасная структура из неупорядоченных систем одностенных нанотрубок (ОУНТ) и вертикальных массивов многостенных нанотрубок (МУНТ) на подложке и в слое бычьего сывороточного альбумина (БСА). Для покрытия электрода на основе ОУНТ/БСА получен эффект вертикальной ориентации

нанотрубок перпендикулярно поверхности. Под действием лазерного излучения достигнуто увеличение в 5 и 9 раз удельной поверхности и в 2,2 и 2,4 раза электропроводности для покрытий электродов на основе МУНТ и ОУНТ соответственно. Покрытия для электродов на основе обоих типов нанотрубок продемонстрировали цитосовместимость с клетками нервной ткани. Для покрытия на основе МУНТ и ОУНТ в матрице БСА получено на 17 и 26 % больше клеток нервной ткани по сравнению с контрольным значением через 72 ч инкубации. Таким образом, предложенные структуры на основе композиционных материалов со сложной атомно-молекулярной топологией на нано- и микроуровнях могут использоваться в качестве контактных площадок имплантируемых биоподобных нейроинтерфейсов [63].

На этапе синтеза структуры единой системы нейростимуляции для управления передачей болевых сигналов в мозг отметим основные результаты, полученные на этапе анализа известных научных знаний в рассматриваемой области:

– нейрофизиологическая система человека подчиняется законам теории управления и включает в себя ряд локальных и глобальных контуров управления с обратной связью;

– ощущение боли возникает в головном мозге в результате высшей нервной деятельности;

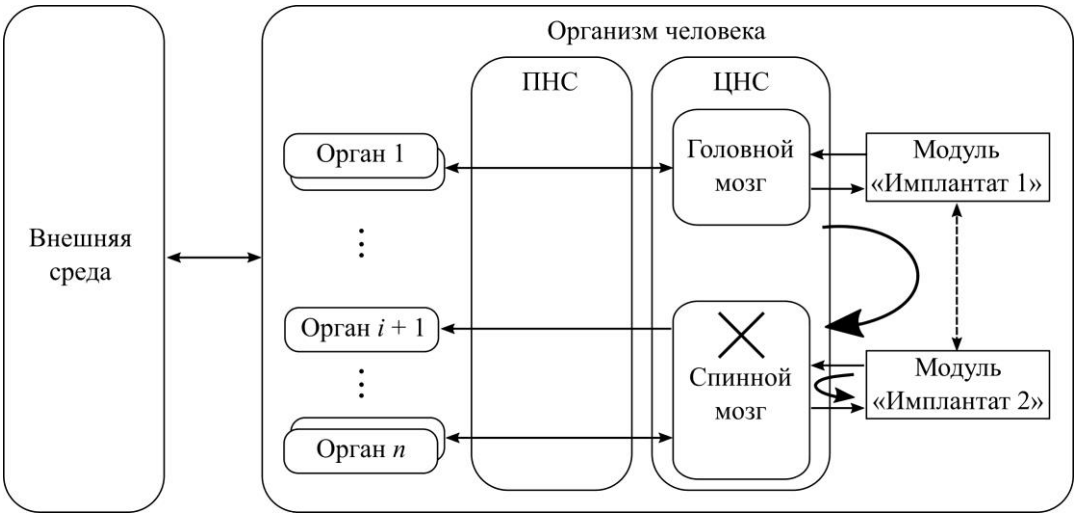
– значительное влияние на передачу болевых сигналов в мозг оказывает электрическая стимуляция спинного мозга;

– эффективность стимуляции SCS повышается при замыкании локальной обратной связи на основе сигналов ECAP;

– для организации адаптивной нейростимуляции с обратной связью глобального типа необходимо наличие биомаркеров боли.

Исходя из сформулированных подходов и на основе полученных ранее результатов [64] проведен синтез функциональной модели единой системы нейростимулятора и разработана функциональная модель (рисунок), имеющая следующие особенности:

– состоит из двух независимых имплантируемых модулей («Имплантат 1» и «Имплантат 2»), объединенных каналом обмена информацией;



Сетевая система нейростимуляции с локальной и глобальной обратными связями
(ПНС – периферическая нервная система, ЦНС – центральная нервная система)
Network-based neurostimulation system with local and global feedback loops
(ПНС – peripheral nervous system, ЦНС – central nervous system)

– имплантируемый модуль «Имплантат 2» осуществляет электрическую стимуляцию спинного мозга с локальной обратной связью на основе регистрации ECAP;

– имплантируемый модуль «Имплантат 2» осуществляет регистрацию биомаркеров, связанных с болевыми ощущениями в головном мозге, и управляет работой модуля «Имплантат 1», замыкая обратную связь глобального типа;

– для унификации имплантируемый модуль «Имплантат 2» обладает функционалом электрической стимуляции и дополнительно осуществляет возбуждение требуемых зон головного мозга.

Предложенный подход к построению МИН как распределенной сетевой системы позволяет организовать поэтапное проведение исследований, в первую очередь разработав унифицированный имплантируемый модуль и экспериментально подтвердив его характеристики в режиме работы SCS с локальной обратной связью и в режиме регистрации биомаркеров боли, а затем без значительных изменений проверить выдвинутые гипотезы путем замыкания глобальной обратной связи.

На базе НМИЦ им. В. А. Алмазова Минздрава России проведен комплекс исследований на крупных лабораторных животных, включающий в себя как фундаментальные механизмы и закономерности передачи болевых сигналов от периферийных нервов и спинного мозга в головной мозг, так и задел по внедрению результатов проекта в клиническую практику, в том числе экспериментальные исследования процессов интеграции нейроинтерфейсов и взаимодействия нервных тканей организма с биоподобными интерфейсами. Исследованы особенности процессов в клетках и волокнах, в том числе в желатинозной субстанции, тракте Лиссауэра и других, обеспечивающих передачу нервных импульсов от периферических волокон к центральным клеткам, действие афферентных импульсов на передачу сигналов по нервным волокнам.

В рамках экспериментальных исследований разработана и апробирована методика формирования нейропатического болевого синдрома на основе комбинации хирургических и медикаментозных воздействий, приводящих к гиперэксцитабельности поврежденных нервных волокон и хронической боли. Эксперименты проведены на свиньях породы вьетнамская вислобрюхая, нервная система которых позволяет моделировать нейропатическую боль с высокой точностью. Животным был установлен нейроинтерфейс с массивом электродов в заднее эпидуральное пространство слева. В ответ на стимуляцию прямоугольными импульсами силой 2 мА длительностью 0,5 мс возникли четкие и стабильно вызванные потенциалы, что подтвердило эффективное воздействие нейроинтерфейса на целевые структуры спинного мозга. После операции в течение девяти дней состояние животных оценивалось по шкалам боли [65], UNESP-Botucatu, шкале гримас, состоянию послеоперационного шва, пребыванию в сознании, наличию аппетита, выделительных процессов, потреблению воды.

В ходе морфологического и иммуногистохимического исследований процессов интеграции разработанных образцов нейроинтерфейсов проведен забор кожных, мышечных и мягких тканей, периферических нервов и спинного мозга, показано формирование невромы и утолщение периферических нервов в месте осуществления на них воздействия в рамках формирования модели боли. При этом патологических изменений в области нейроинтерфейса не выявлено.

Заключение. В результате анализа параметров противоболевой внешней электростимуляции разработанным нейроинтерфейсом удалось достигнуть положительного эффекта в виде снижения прохождения болевых импульсов от периферической нервной системы через спинной мозг в головной мозг и улучшения состояния животного. Это свидетельствует о высокой эффективности и безопасности использованных технологий.

Литература / References

1. Treede R.-D., Rief W., Barke A., Aziz Q., Bennett M. I., Benoliel R. et al. Chronic pain as a symptom or a disease: The IASP classification of chronic pain for the International Classification of Diseases (ICD-11). *Pain.* 2019;160(1):19–27. https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001384
2. Dahlhamer J., Lucas J., Zelaya C., Nahin R., Mackey S., DeBar L. et al. Prevalence of chronic pain and high-impact chronic pain among adults – United States, 2016. *MMWR Morb. Mortal Wkly Rep.* 2018;67(36):1001–1006. https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6736a2
3. Амелин А. В., Афанасьев В. В., Баранцевич Е. Р., Бурд С. Г., Григолашвили М. А., Давыдов О. С. и др. Место пиримидиновых нуклеотидов в практике лечения боли. Результаты консенсуса международной группы специалистов. *Российский журнал боли.* 2023;21(1):78–84. https://doi.org/10.17116/pain20232101178. EDN: SWCDCD.
   Amelin A. V., Afanasiev V. V., Barantsevich E. R., Burd S. G., Grigolashvili M. A., Davydov O. S. et al. Pyrimidine nucleotides in pain management. Consensus of the international group of specialists. *Rossiyskiy zhurnal boli = Russian Journal of Pain.* 2023;21(1):78–84. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/pain20232101178
4. Fatima K., Javed S. O., Saleem A., Marsia S., Zafar R., Noorani K. et al. Long-term efficacy of spinal cord stimulation for chronic primary neuropathic pain in the contemporary era: A systematic review and meta-analysis. *J. Neurosurg. Sci.* 2024;68(1):128–139. https://doi.org/10.23736/s0390-5616.23.05930-1
5. Huygen F. J. P. M., Soulanis K., Rtveladze K., Kamra S., Schlueter M. Spinal cord stimulation vs medical management for chronic back and leg pain: A systematic review and network meta-analysis. *JAMA Netw. Open.* 2024;7(11):e2444608. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.44608
6. Курушина О. В., Шкарин В. В., Ивашева В. В., Барулин А. Е. Проблемы изучения эпидемиологии хронической боли в Российской Федерации. *Российский журнал боли.* 2022;20(3):31–35. https://doi.org/10.17116/pain20222003131. EDN: RDXSFC.
   Kurushina O. V., Shkarin V. V., Ivasheva V. V., Barulin A. E. Problems of studying the epidemiology of chronic pain in the Russian Federation. *Rossiyskiy zhurnal boli = Russian Journal of Pain.* 2022;20(3):31–35. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/pain20222003131
7. Яхно Н. Н., Кукушкин М. Л. Хроническая боль: медико-биологические и социально-экономические аспекты. *Вестник Российской академии медицинских наук.* 2012;67(9):54–58. https://doi.org/10.15690/vramn.v67i9.407. EDN: PEVYZZ.
   Yakhno N. N., Kukushkin M. L. Chronic pain: Medico-biologic and sotsio-economic aspects. *Vestnik Rossiyskoy akademii meditsinskikh nauk = Annals of the Russian Academy of Medical Sciences.* 2012;67(9):54–58. (In Russ.). https://doi.org/10.15690/vramn.v67i9.407
8. Brady B., Andary T., Sheng Min Pang, Dennis S., Liamputtong P., Boland R. et al. A mixed-methods investigation into patients' decisions to attend an emergency department for chronic pain. *Pain Med.* 2021;22(10):2191–2206. https://doi.org/10.1093/pm/pnab081
9. Kiran S. 14 days to a better North America spinal cord stimulation market. *DataM Intelligence.* Available at: https://www.datamintelligence.com/blogs/north-america-spinal-cord-stimulation-market (accessed: 02.07.2025).
10. Debashree B. Spinal cord stimulation market size, share & trends analysis report by product (rechargeable, non-rechargeable), by application (failed back syndrome, complex regional pain syndrome, degenerative disk disease, unsuccessful disk surgery, others) and by region (North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM): Forecasts, 2025–2033. *Straits Research.* Available at: https://straitsresearch.com/report/spinal-cord-stimulation-market (accessed: 02.07.2025).
11. Spinal cord stimulation market size, share & COVID-19 impact analysis, by product (rechargeable and non-rechargeable), by disease indication (failed back surgery syndrome (FBSS), degenerative disc disease (DDD), complex regional pain syndrome (CRPS), arachnoiditis, and others) by end user (hospitals, ambulatory surgery centers, and specialty clinics), and regional forecast, 2025–2032. *Fortune Business Insights.* Last upd.: 16.06.2025. Available at: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/spinal-cord-stimulation-market-100313 (accessed: 02.07.2025).
12. Томский А. А., Бриль Е. В., Гамалея А. А., Федорова Н. В., Левин О. С. Функциональная нейрохирургия при болезни Паркинсона в России. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2019;13(4):10–15. https://doi.org/10.25692/ACEN.2019.4.2. EDN: OVWDUB.
   Tomskiy A. A., Bril' E. V., Gamaleya A. A., Fedorova N. V., Levin O. S. Functional neurosurgery in Parkinson's disease in Russia. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology.* 2019;13(4):10–15. (In Russ.). https://doi.org/10.25692/ACEN.2019.4.2

13. НИУ МИЭТ. *Микроэлектронные технологии формирования мультимасштабных имплантируемых нейроинтерфейсов живых – технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг:* отчет о НИР (промежут.). Рук. С. А. Гаврилов. М., 2025. 803 с. № ГР 124053100035-4.
MIET. *Microelectronic technologies of forming multi-scale implanted neuroelectronic interfaces living – engineering systems for controlling transmission of pain signals to brain:* research work report (interim). Head: S. A. Garvilov. Moscow, 2025. 803 p. State reg. no. 124053100035-4. (In Russ.).
14. Wiener N. *Cybernetics or Control and communication in the animal and the machine.* New York: John Wiley & Sons; Paris: Hermann et Cie; 1948. 194 p.
15. Ashby W. R. *An introduction to cybernetics.* London: Chapman and Hall; 1956. ix, 295 p.
16. Парин В. В., Баевский Р. М. *Введение в медицинскую кибернетику.* М.: Медицина; Прага: Изд-во мед. лит.; 1966. 298 с.
Parin V. V., Bayevskiy R. M. *Introduction to medical cybernetics.* Springfield, VA: National Aeronautics and Space Administration; 1967. 222 p.
17. Казначеев В. П., Берг А. И., авт., ред., Брайнес С. Н., Михайлова Л. П., Шурин С. П., Амосов Н. М. и др. *Прогресс биологической и медицинской кибернетики.* Пер. с венг., нем., пол., рум., чеш. Б. Л. Старостин. М.: Медицина; 1974. 487 с. EDN: RZXYSH.
Kaznacheev V. P., Berg A. I., auth., ed., Braynes S. N., Mikhaylova L. P., Shurin S. P., Amosov N. M. et al. *Progress in biological and medical cybernetics.* Transl. B. L. Starostin. Moscow: Meditsina Publ.; 1974. 487 p. (In Russ.).
18. Директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 г. о защите животных, использующихся для научных целей. *ГАРАНТ.* Available at: https://base.garant.ru/70350564/ (accessed: 04.07.2025).
Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. *Official Journal of the European Union.* 2010; L276:33–79.
19. Resolution on the accommodation and care of laboratory animals: adopted by the Multilateral Consultation of the Parties to the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes on 30 May 1997. *European Committee on Legal Co-operation.* Available at: https://www.coe.int/en/web/cdcj/1997-res-accommodation-care-lab-animals (accessed: 04.07.2025).
20. Melzack R., Wall P. D. Pain mechanisms: A new theory. *Science.* 1965;150(3699):971–979. https://doi.org/10.1126/science.150.3699.971
21. Wiech K. Deconstructing the sensation of pain: The influence of cognitive processes on pain perception. *Science.* 2016;354(6312):584–587. https://doi.org/10.1126/science.aaf8934
22. Simopoulos T., Sharma S., Aner M., Gill J. S. The long-term durability of multilumen concentric percutaneous spinal cord stimulator leads. *Pain Pract.* 2018;18(7):845–849. https://doi.org/10.1111/papr.12682
23. Durand D. M., Ghovanloo M., Krames E. Time to address the problems at the neural interface. *J. Neural Eng.* 2014;11(2):020201. https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/2/02020
24. Miller S., Matharu M. S. The use of electroceuticals and neuromodulation in the treatment of migraine and other headaches. In: *Electroceuticals: Advances in electrostimulation therapies.* Ed. A. Majid. Cham: Springer; 2017, pp. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28612-9_1
25. Wang J., Chen Z. S. Closed-loop neural interfaces for pain: Where do we stand? *Cell Reports Medicine.* 2024;5(10):101662. https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2024.101662
26. Lee K. Y., Bae C., Lee D., Kagan Z., Bradley K., Chung J. M., La J.-H. Low-intensity, kilohertz frequency spinal cord stimulation differently affects excitatory and inhibitory neurons in the rodent superficial dorsal horn. *Neuroscience.* 2020;428:132–139. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.12.031
27. Ploner M., Sorg C., Gross J. Brain rhythms of pain. *Trends Cogn. Sci.* 2017;21(2):100–110. https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.12.001
28. Shirvalkar P., Prosky J., Chin G., Ahmadipour P., Sani O. G., Desai M. et al. First-in-human prediction of chronic pain state using intracranial neural biomarkers. *Nat. Neurosci.* 2023;26(6):1090–1099. https://doi.org/10.1038/s41593-023-01338-z
29. Bock D. C., Marschilok A. C., Takeuchi K. J., Takeuchi E. S. Batteries used to power implantable biomedical devices. *Electrochim. Acta.* 2012;84:155–164. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.057
30. Eldridge P., Simpson B. A., Gilbart J. The role of rechargeable systems in neuromodulation. *European Neurological Review.* 2011;6(3):187–192. https://doi.org/10.17925/ENR.2011.06.03.187
31. Barbruni G. L., Ros P. M., Demarchi D., Carrara S., Ghezzi D. Miniaturised wireless power transfer systems for neurostimulation: A review. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2020;14(6):1160–1178. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2020.3038599
32. Данилов А. А. Технический облик системы индуктивного питания имплантируемого нейростимулятора. In: *Микроэлектронные имплантируемые нейроинтерфейсы 2024 (МИН-2024):* сб. статей Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 11–12 дек. 2024. М.: Наш стиль; 2023, с. 55–57.

Danilov A. A. Technical appearance of an inductive power supply system for an implantable neural stimulator. In: *Mikroelektronnye implantiruemye neyrointerfeysy 2024 (MIN-2024):* proceedings of International sci.-tech. conf., Moscow, Dec. 11–12, 2024. Moscow: Nash Stil' Publ.; 2024, pp. 55–57. (In Russ.).

33. Данилов А. А. Определение технического облика системы энергообеспечения имплантируемого нейростимулятора спинного мозга. In: *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ'2024):* сб. трудов XVI Междунар. науч. конф., Суздаль, 02–04 июня 2024. Владимир; Суздаль: Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых; 2024, с. 373–376.
Danilov A. A. Determining the technical appearance of a power supply system for an implantable spinal cord neural stimulator. In: *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii (FREME'2024):* proceedings of 16th International sci. conf., Suzdal, June 02–04, 2024. Vladimir; Suzdal: Vladimir State University n. a. Alexander and Nikolay Stoletovs; 2024, pp. 373–376. (In Russ.).
34. Аубакиров Р. Р., Данилов А. А. Использование эффекта сильной связи для уменьшения размера принимающей катушки без понижения устойчивости системы индуктивной передачи энергии к имплантатам. *Изв. вузов. Электроника*. 2024;29(6):819–831. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-819-831. EDN: DJLEVK.
Aubakirov R. R., Danilov A. A. Using the strong coupling effect to reduce the size of the receiving coil without reducing the stability of the inductive energy transfer system to implants. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2024;29(6):819–831. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-6-819-831
35. Аубакиров Р. Р. Предварительная оценка габаритов передающей катушки индуктивности в составе системы индуктивного питания нейростимулятора. *Медицинская техника*. 2024;(4):17–20. EDN: SVFTPB.
Aubakirov R. R. Preliminary assessment of the size of the transmitting induction coil in an inductive power supply system for a neural stimulator. *Biomed. Eng.* 2024;58:238–241. https://doi.org/10.1007/s10527-024-10407-x
36. Аубакиров Р. Р., Гуров К. О., Данилов А. А. Алгоритм проектирования LC-контуров с параллельной компенсацией в приемном контуре для систем индуктивного питания. *Изв. вузов. Электроника.* 2024;29(3):319–330. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-319-330. EDN: AHOKOP.
Aubakirov R. R., Gurov K. O., Danilov A. A. Algorithm for designing LC circuits with parallel compensation in the receiving circuit for inductive power systems. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2024;29(3):319–330. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-319-330
37. Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. Применение ШИМ-управления емкостью конденсаторов для стабилизации выходных характеристик системы индуктивного питания имплантатов. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(1):87–93. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-1-87-93. EDN: BIJCQL.
Gurov K. O., Mindubaev E. A., Danilov A. A. Application of PWM actuation of capacitor capacitance to stabilize the output characteristics of the implant inductive power supply system. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics.* 2025;30(1):87–93. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-1-87-93
38. Boehler C., Stieglitz T., Asplund M. Nanostructured platinum grass enables superior impedance reduction for neural microelectrodes. *Biomaterials.* 2015;67:346–353. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.07.036
39. Bradley K. The technology: The anatomy of a spinal cord and nerve root stimulator: The lead and the power source. *Pain Med.* 2006;7(s1):S27–S34. https://doi.org/10.1111/j.1526-4637.2006.00120.x
40. Normann R. A., Fernandez E. Clinical applications of penetrating neural interfaces and Utah Electrode Array technologies. *J. Neural Eng.* 2016;13(6):061003. https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/6/061003
41. Hayden C. J., Dalton C. Direct patterning of microelectrode arrays using femtosecond laser micromachining. *Appl. Surf. Sci.* 2010;256(12):3761–3766. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.022
42. Cagnan H., Denison T., McIntyre C., Brown P. Emerging technologies for improved deep brain stimulation. *Nat. Biotechnol.* 2019;37(9):1024–1033. https://doi.org/10.1038/s41587-019-0244-6
43. Green R. A., Lovell N. H., Wallace G. G., Poole-Warren L. A. Conducting polymers for neural interfaces: Challenges in developing an effective long-term implant. *Biomaterials.* 2008;29(24–25):3393–3399. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.04.047
44. Daubinger P., Kieninger J., Unmüssig T., Urban G. A. Electrochemical characteristics of nanostructured platinum electrodes – a cyclic voltammetry study. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014;16:8392–8399. https://doi.org/10.1039/C4CP00342J
45. Cogan S. F. Neural stimulation and recording electrodes. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 2008;10:275–309. https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160518

46. Green R. A., Matteucci P. B., Dodds C. W. D., Palmer J., Dueck W. F., Hassarati R. T. et al. Laser patterning of platinum electrodes for safe neurostimulation. *J. Neural Eng.* 2014;11(5):056017. https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/5/056017
47. Ben-Jacob E., Hanein Y. Carbon nanotube micro-electrodes for neuronal interfacing. *J. Mater. Chem.* 2008;18(43):5181–5186. https://doi.org/10.1039/B805878B
48. Driscoll N., Maleski K., Richardson A. G., Murphy B., Anasori B., Lucas T. H. et al. Fabrication of Ti_3C_2 MXene microelectrode arrays for in vivo neural recording. *J. Vis. Exp.* 2020;(156):e60741. https://doi.org/10.3791/60741
49. Latif T., McKnight M., Dickey M. D., Bozkurt A. In vitro electrochemical assessment of electrodes for neurostimulation in roach biobots. *PLoS One.* 2018;13:e0203880. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203880
50. Green R., Abidian M. R. Conducting polymers for neural prosthetic and neural interface applications. *Adv. Mater.* 2015;27(46):7620–7637. https://doi.org/10.1002/adma.201501810
51. Seidlits S. K., Lee J. Y., Schmidt C. E. Nanostructured scaffolds for neural applications. *Nanomedicine.* 2008;3(2):183–199. https://doi.org/10.2217/17435889.3.2.183
52. Ahmed A. A. A., Alegret N., Almeida B., Alvarez-Puebla R., Andrews A. M., Ballerini L. et al. Interfacing with the brain: How nanotechnology can contribute. *ACS Nano.* 2025;19(11):10630–10717. https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10525
53. Мурашко Д. Т., Курилова У. Е., Попович К. Д., Куксин А. В., Герасименко А. Ю. Исследование механических характеристик слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов. *ЖТФ.* 2025;95(5):892–900. https://doi.org/10.61011/JTF.2025.05.60279.441-24. EDN: ZEOEXX.
Murashko D. T., Kurilova U. E., Popovich K. D., Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu. Study of mechanical characteristics of layered structures based on carbon nanomaterials for creation of bioelectronic components. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Technical Physics.* 2025;70(5):838–846. https://doi.org/10.61011/TP.2025.05.61120.441-24
54. Ku S. H., Lee M., Park C. B. Carbon-based nanomaterials for tissue engineering. *Adv. Healthcare Mater.* 2013;2(2):244–260. https://doi.org/10.1002/adhm.201200307
55. Kim J., Kim G. G., Kim S., Jung W. Plasmonic welded single walled carbon nanotubes on monolayer graphene for sensing target protein. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(20):203110. https://doi.org/10.1063/1.4952397
56. Gerasimenko A. Yu., Kuksin A. V., Shaman Yu. P., Kitsyuk E. P., Fedorova Yu. O., Murashko D. T. et al. Hybrid carbon nanotubes–graphene nanostructures: Modeling, formation, characterization. *Nanomaterials.* 2022;12(16):2812. https://doi.org/10.3390/nano12162812
57. Gerasimenko A. Yu., Kuksin A. V., Shaman Yu. P., Kitsyuk E. P., Fedorova Yu. O., Sysa A. V. et al. Electrically conductive networks from hybrids of carbon nanotubes and graphene created by laser radiation. *Nanomaterials.* 2021;11(8):1875. https://doi.org/10.3390/nano11081875
58. Gerasimenko A. Yu., Ten G. N., Ryabkin D. I., Shcherbakova N. E., Morozova E. A., Ichkitidze L. P. The study of the interaction mechanism between bovine serum albumin and single-walled carbon nanotubes depending on their diameter and concentration in solid nanocomposites by vibrational spectroscopy. *Spectrochim. Acta, Part A.* 2020;227:117682. https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117682
59. 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;260:113517. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113517
60. Kang B.-C., Ha T.-J. Wearable carbon nanotube based dry-electrodes for electrophysiological sensors. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2018;57(5S):05GD02. https://doi.org/10.7567/JJAP.57.05GD02
61. Zhao Q.-L., Wang Z.-M., Chen J.-H., Liu S.-Q., Wang Y.-K., Zhang M.-Y. et al. A highly conductive self-assembled multilayer graphene nanosheet film for electronic tattoos in the applications of human electrophysiology and strain sensing. *Nanoscale.* 2021;13(24):10798–10806. https://doi.org/10.1039/D0NR08032B
62. Murashko D., Kurilova U., Savelyev M., Selishchev S. Formation of carbon nanomaterials layers to create passive and active implantable devices for nerve tissue repair. In: *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM).* Altai: IEEE; 2025, pp. 1660–1664. https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096707
63. Василевский П. Н., Савельев М. С., Орлов А. П., Герасименко А. Ю. Нелинейно-оптические свойства одностенных углеродных нанотрубок для применений в области фотоники. *ЖТФ.* 2025;95(3):587–597. https://doi.org/10.61011/JTF.2025.03.59866.407-24. EDN: CJWWPO.
Vasilevsky P. N., Savelyev M. S., Orlov A. P., Gerasimenko A. Yu. Nonlinear optical properties of single-wall carbon nanotubes for photonics applications. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Technical Physics.* 2025;70(3):548–557. https://doi.org/10.61011/TP.2025.03.60861.407-24

64. Telyshev D., Nesterenko I., Bochkov A., Malinina A., Markov A., Bordovsky S. Functional evaluation of larynx nerve stimulator with EMG acquisition capability and wireless connectivity. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2021;15(3):629–641. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2021.3094890
65. National Research Council (US) Committee on Pain and Distress in Laboratory Animals. *Recognition and alleviation of pain and distress in laboratory animals.* Washington, DC: National Academies Press; 1992. 160 p. https://doi.org/10.17226/1542

Информация об авторах

Гаврилов Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, ректор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rnd@miee.ru

Герасименко Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент, начальник НИЛ «Биомедицинские нанотехнологии» Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gerasimenko@bms.zone

Данилов Арсений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник НИЛ «Беспроводные биомедицинские интерфейсы» Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), arseny.danilov@gmail.com

Нездоровин Олег Викторович – руководитель НИГ нейромодуляционных технологий в нейрохирургии Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Россия, 197341, г. Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, 2), neurosurgery.almazovcentre@gmail.com

Нездоровина Виктория Геннадьевна – кандидат медицинских наук, заведующая нейрохирургическим отделением № 2 РНХИ имени профессора А. Л. Поленова Национального медицинского исследовательского центра имени В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Россия, 197341, г. Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, 2), neurosurgery.almazovcentre@gmail.com

Нестеренко Игорь Валерьевич – ведущий инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Nesterenko@bms.zone

Переверзев Алексей Леонидович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационному развитию, директор Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), pal@olvs.miee.ru

Пожар Кирилл Витольдович – кандидат технических наук, доцент, начальник НИЛ «Системы искусственной биомедицинской регуляции» Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина 1), pozhar@bms.zone

Рябкин Дмитрий Игоревич – кандидат физико-математических наук, доцент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ryabkindi@gmail.com

Селищев Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), selishchev@bms.zone

Information about the authors

Sergey A. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), rnd@miee.ru

Alexander Yu. Gerasimenko – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory “Biomedical Nanotechnologies”, Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gerasimenko@bms.zone

Arseniy A. Danilov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory “Wireless biomedical interfaces”, Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), arseny.danilov@gmail.com

Oleg V. Nezdorovin – Head of the Research Group of Neuromodulation Technologies in Neurosurgery, Almazov National Research Medical Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (Russia, 197341, Saint Petersburg, Akkuratov st., 2), neurosurgery.almazovcentre@gmail.com

Viktoriya G. Nezdorovina – Cand. Sci. (Med.), Head of Neurosurgical Department No. 2, Russian National Research Medical Institute named after Professor A. L. Polenov, Almazov National Research Medical Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (Russia, 197341, Saint Petersburg, Akkuratov st., 2), neurosurgery.almazovcentre@gmail.com

Igor V. Nesterenko – Leading Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Nesterenko@bms.zone

Alexey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Innovative Development, Director of the Institute of Micro Devices and Control Systems, Leading Researcher of the Research Institute of Computing Tools and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pal@olvs.miee.ru

Kirill V. Pozhar – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Research Laboratory “Artificial biomedical regulation”, Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pozhar@bms.zone

Dmitry I. Ryabkin – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ryabkindi@gmail.com

Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Director of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), selishchev@bms.zone

Поступила в редакцию / Received 23.04.2025
Поступила после рецензирования / Revised 23.06.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.94
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-657-666
EDN: XIVCYR

Виртуальное прототипирование интерактивных симуляторов сложного оборудования и высокотехнологичных процессов микроэлектроники

Т. Ю. Соколова*, Б. Ю. Кулагин

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

* *sokolova-ta@mail.ru*

Аннотация. Развитие технологий виртуального прототипирования способствует созданию точных интерактивных визуализированных киберфизических моделей и виртуальных прототипов и их внедрению в структуру цифровых двойников. Разработка виртуальных прототипов необходима для имитационного моделирования дорогостоящего высокотехнологичного оборудования микроэлектронного и робототехнического производства, сложных систем управления и др. В работе рассмотрены особенности проектирования интерактивных виртуальных прототипов сложного высокотехнологичного оборудования, симулирующих технологические процессы и производство в электронной промышленности. Приведены результаты исследования целесообразности и эффективности создания интерактивных киберфизических моделей при разработке цифровых двойников. Определены способы и методы моделирования и визуализации производственных пространств и технологического оборудования на основе реальных объектов с применением технологий твердотельного или поверхностного геометрического моделирования, фотограмметрии, лазерного сканирования, а также полигонального моделирования. Дана сравнительная оценка алгоритмов и методов создания интерактивных киберфизических моделей оборудования с учетом точности и временных затрат на формирование геометрических моделей. Изучены особенности специализированных и универсальных инструментов, обеспечивающих интерактивное взаимодействие, реалистичную визуализацию и анимацию в режиме реального времени в виртуальном ландшафте. Описаны разработанные интерактивные киберфизические комплексы, реализованные с применением технологий имитационного трехмерного моделирования, визуализации, анимации, визуального программирования, виртуальной и смешанной реальности.

© Т. Ю. Соколова, Б. Ю. Кулагин, 2025

Новизна разработок заключается в создании симуляторов сложного технологического оборудования с применением интеграции киберфизических моделей установок и математических зависимостей технологических процессов. Результаты апробации разработанных виртуальных интерактивных онлайн-симуляторов при подготовке студентов технических специальностей в МИЭТ показали значительное повышение эффективности при использовании точных интерактивных виртуальных прототипов в обучении студентов и профессиональной переподготовке персонала предприятий, а также при разработке нового оборудования.

Ключевые слова: виртуальное прототипирование, интерактивная киберфизическая модель, цифровой двойник, интерактивный симулятор, визуализация, виртуальная реальность, фотограмметрия, полигональное моделирование

Для цитирования: Соколова Т. Ю., Кулагин Б. Ю. Виртуальное прототипирование интерактивных симуляторов сложного оборудования и высокотехнологичных процессов микроэлектроники. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):657–666. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-657-666. EDN: XIVCYR.

Original article

Virtual prototyping of interactive simulators of complex equipment and high-tech microelectronics processes

T. Yu. Sokolova**, *B. Yu. Kulagin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *sokolova-ta@mail.ru*

Abstract. The development of virtual prototyping technologies has contributed to the creation of accurate interactive visualized cyber-physical models and virtual prototypes and to their implementation into the structure of digital twins. The development of virtual prototypes is necessary for simulation modeling of expensive high-tech equipment for semiconductor and robotics fabrication plants, complex control systems etc. In this work, the design features of interactive virtual prototypes of complex high-tech equipment simulating technological processes and production in the electronic industry are considered. The results of the study of the expediency and effectiveness of creating interactive cyber-physical models in the development of digital twins are presented. The techniques and methods of simulation and visualization of industrial spaces and technological equipment based on real objects using technologies of solid-state or surface geometric simulation, photogrammetry, laser scanning, and polygonal modeling were revealed. A comparative assessment of algorithms and methods for creating interactive cyber-physical models of equipment is given, with account for the accuracy and time spent on forming geometric models. The features of specialized and universal tools providing interactive communication, realistic visualization and real-time animation in a virtual landscape were studied. The developed interactive cyber-physical complexes implemented using technologies of simulated three-dimensional modeling, visualization, animation, visual programming, virtual and mixed reality are described. The novelty of the developments is in the creation of simulators of complex technological equipment using the integration of cyber-physical models of installations and mathematical dependencies of technological processes. The results of testing the de-

veloped virtual interactive online simulators in the training of engineering students at the National Research University of Electronic Technology have shown a significant increase in effectiveness when using accurate interactive virtual prototypes in the training of students and retraining of personnel of enterprises, as well as in the new equipment development.

Keywords: virtual prototyping, interactive cyber-physical model, digital twin, interactive simulator, visualization, virtual reality, photogrammetry, polygonal modeling

For citation: Sokolova T. Yu., Kulagin B. Yu. Virtual prototyping of interactive simulators of complex equipment and high-tech microelectronics processes. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):657–666. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-657-666.

Введение. На современном этапе развития технологии виртуального прототипирования встраиваются в системы управления жизненным циклом изделия на всех этапах разработки и производства оборудования электронной промышленности и являются их неотъемлемой частью. Внедрение инновационных инструментов для проектирования, оптимизации и контроля изделий способствует развитию наиболее динамичных и технологически сложных отраслей. Разработка виртуальных прототипов особенно значима для имитационного моделирования дорогостоящего высокотехнологичного оборудования микроэлектронного и робототехнического производства, сложных цифровых систем управления и др. [1].

Одно из перспективных направлений в данной сфере – создание цифровых двойников, представляющих собой не только систему математических и компьютерных моделей, точно отражающих физические объекты и процессы в режиме реального времени, но и виртуальные прототипы – интерактивные киберфизические модели, в том числе еще не существующих объектов.

Цифровые двойники, согласно международной классификации, могут иметь несколько уровней проработки – от цифрового прототипа (Pre-Digital Twin) до цифрового двойника (Digital Twin). При этом не подразумевается визуализированное представление изделия, соответствующее реальному. Традиционно цифровые двойники – это программные либо программно-аппаратные комплексы, выполненные в виде программного продукта с минималистичным пользовательским интерфейсом или работающие в режиме терминала, позволяющего задавать параметры и проводить расчеты без реалистичной визуализации внешнего вида реального образца. Однако потенциал виртуального прототипа раскрывается в большей степени при интеграции с интерактивными и иммерсивными технологиями, позволяющими воспроизводить не только функционал, но и внешний вид, а также конструкцию устройства [2–4].

Таким образом, точные интерактивные визуализированные киберфизические модели и виртуальные прототипы в структуре цифровых двойников значительно повышают эффективность разработок нового оборудования, технологий и процессов, а также обучения и профессиональной переподготовки персонала предприятий. Несмотря на увеличение затрат на создание такого цифрового двойника, сферы его применения значительно расширяются, особенно при модульном и масштабируемом подходе [5, 6].

В настоящей работе рассматриваются особенности проектирования интерактивных виртуальных прототипов сложного высокотехнологичного оборудования, симулирующих технологические процессы и производства в электронной промышленности.

Методы исследования. Создание комплексного цифрового двойника, включающего в себя визуализированную интерактивную киберфизическую модель объекта, можно условно разделить на несколько взаимосвязанных этапов: разработка математической модели,

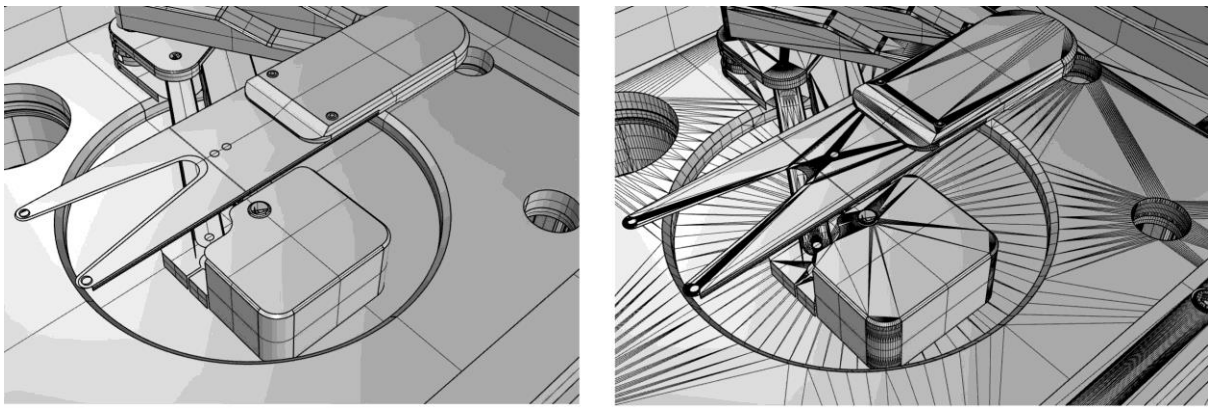
в том числе расчеты и программные интерфейсы; разработка геометрической модели объекта; воспроизведение пользовательского интерфейса, выводимого на экран монитора; моделирование и визуализация реальных органов управления устройства – кнопок, переключателей, мониторов и пр.; создание визуализированных анимаций работы оборудования; перенос геометрических моделей в интерпретатор процессов реального времени; разработка логики интерактивного взаимодействия; окончательная сборка программного комплекса с учетом взаимодействия математических, программных и геометрических моделей. Многие этапы могут выполняться параллельно, независимо друг от друга, так как для их реализации требуются различные компетенции.

Одним из важных и трудоемких этапов создания комплексной киберфизической модели является трехмерное геометрическое моделирование, которое может осуществляться разными методами: твердотельное или поверхностное моделирование в системах автоматизированного проектирования (САПР); лазерное сканирование; фотограмметрия; полигональное моделирование.

Твердотельное и поверхностное моделирование в основном используется при проектировании промышленных изделий и осуществляются в САПР, так как сопровождается разработкой конструкторской документации для производства. Однако в таком случае перенос этих моделей в интерпретатор процессов реального времени затруднен прежде всего из-за необходимости преобразования их в полигональное представление.

Можно выделить несколько ключевых проблем, которые возникают при переносе моделей, созданных в САПР, в интерпретатор процессов реального времени.

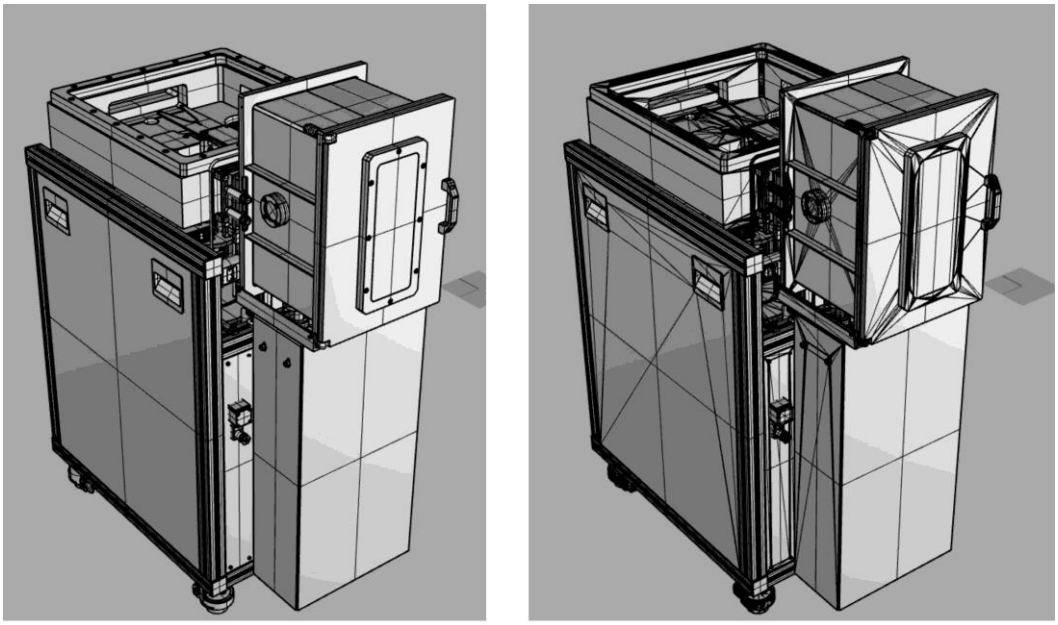
Несовместимость форматов данных. В САПР (например, НаноCAD, КОМПАС3D, T-FLEX и др.) используются специализированные форматы файлов, которые не поддерживаются движками реального времени напрямую. Конвертация создаваемых моделей в совместимые полигональные форматы (.gltf, .fbx) всегда сопряжена с рядом трудностей, связанных с принципиальными различиями логики построения модели. В САПР используется математический аппарат для генерации и представления кривых и поверхностей, базирующийся на неоднородных сплайнах с рациональной основой (NURBS). При этом все поверхности независимы друг от друга и при конвертировании в полигональную поверхность возникают разрывы на границах поверхностей (рис. 1). Решение этой проблемы сводится к инспекции моделей и удалению разрывов, как правило, вручную либо к моделированию с нуля с использованием исходной модели в качестве образца [7–9].



а ***б***

Рис. 1. Разрывы поверхностей при конвертировании твердотельной модели (*а*) в полигональную (*б*)
Fig. 1. Surface discontinuities when converting a solid model (*a*) to a polygonal model (*b*)

Высокая полигональная плотность. Модели, полученные из САПР, часто содержат избыточную геометрию (миллионы треугольных граней), что критично для производительности в режиме реального времени. Оптимизация этих моделей, проведенная в автоматическом режиме, приводит к недопустимому искажению исходной формы (рис. 2). Кроме того, излишняя детализация, например, болтов или резьбы в моделях, созданных в САПР, избыточна для применения в проектах реального времени и требует оптимизации вплоть до замены геометрии текстурами либо отказа от детальной проработки.



а *б*

Рис. 2. Исходная модель САПР (*а*) и результат работы автоматической оптимизации модели перед переносом в полигональный формат (*б*)
Fig. 2. CAD source model (*a*) and the result of automatic model optimisation before exporting to polygonal format (*b*)

Отсутствие поддержки сложных материалов и современных приемов текстурирования. Инструменты текстурирования и назначения материалов модели в САПР не всегда используют современные подходы и приемы в области построения материалов, в которых учитываются физические законы взаимодействия света с поверхностью объекта, поэтому материалы в большинстве случаев приходится создавать заново, добавляя шероховатость, светоотражение, прозрачность и пр. В большинстве случаев в САПР отсутствует возможность создания комплексной детальной развертки текстурных координат, без которой сложно добиться оптимального расположения текстур на поверхностях объектов.

Ограничения анимации. В САПР анимация либо отсутствует, либо создается в несовместимом формате. Как правило, анимацию механизмов приходится разрабатывать с первоначального этапа. Световые эффекты, распространение газов и жидкостей, волновые эффекты создаются исключительно в программах трехмерной графики и анимации (например, Blender3D) или непосредственно в интерпретаторе процессов реального времени.

Рассмотренные проблемы ставят разработчиков интерактивных виртуальных проектов перед выбором: либо переформатировать и доработать существующую модель,

либо моделировать с нуля, используя исходную модель в качестве образца. На практике применяются оба подхода, критериями выбора являются трудоемкость и время на выполнение модели.

Рассмотрим методы лазерного сканирования и фотограмметрии, которые, несмотря на их кажущиеся различия, имеют схожие недостатки [10]:

– высокая полигональная плотность. Модели, полученные данными методами, содержат миллионы полигонов, что критично для производительности в режиме реального времени. Детализация, необходимая для точного воспроизведения объектов, приводит к избыточной геометрии, которую движки не способны обрабатывать без оптимизации;

– некачественная поверхность. Так как при сканировании неизбежно имеет место ошибка, связанная с аппаратной неточностью сканера или неточностью его калибровки, в большинстве случаев поверхность, полученная данным методом, содержит небольшие неровности. То же самое относится и к моделям, полученным методом фотограмметрии, где ошибка появляется уже на этапе обработки изображений;

– несоответствие линейных размеров модели реальным размерам объекта. Ошибка возникает в том случае, когда при сканировании не проведена аппаратная калибровка. Это не является критической ошибкой, если пропорции модели соответствуют реальному объекту. В основном пропорции модели искажаются при использовании фотограмметрии без применения юстировочных шаблонов.

Указанные недостатки не позволяют использовать непосредственно модели, созданные данными методами. Подобные модели служат хорошими образцами для дальнейшей разработки как в САПР, так и методами полигонального моделирования, но при условии доступа к точным чертежам или обмерам исходного объекта.

Трехмерные модели, полученные разными методами, необходимо преобразовать в полигональные модели для передачи в интерпретатор процессов реального времени. Во многих случаях эффективнее сразу начинать полигональное моделирование объекта, используя чертежи или модели, полученные другими методами (рис. 3).

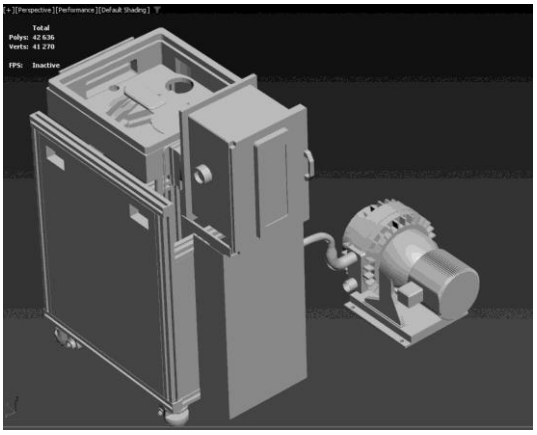


Рис. 3. Модель транспортного модуля установки магнетронного распыления, полученная методом полигонального моделирования

Fig. 3. Simulation of the transport module of the magnetron sputtering unit obtained by polygonal modeling

Метод полигонального моделирования часто является предпочтительным при создании трехмерных геометрических моделей для дальнейшего использования их в интерпретаторе процессов реального времени, так как исключает этап конвертирования, но при этом имеет ряд недостатков, в частности трудоемкость. Так как основное редактирование (например, вершин и граней) при построении моделей ведется на низком уровне, то процесс построения полигональной модели с нуля более трудоемок, чем построение модели в программах твердотельного и поверхностного моделирования. Кроме того, при построении моделей необходимо постоянно отслеживать их корректность и целостность с применением линейных и угловых привязок. Другой недостаток – сложности при построении криволинейных поверхностей и сопряжений. Так как модель изначально состоит из треугольных

граней, то при построении криволинейных поверхностей и сопряжений необходимо контролировать уровень подразбиения поверхностей – интерполяцию. При недостаточной интерполяции модель выглядит угловатой, при избыточной – происходит перегрузка вычислительных ресурсов.

Таким образом, при полигональном моделировании контролируется весь процесс создания модели от начала и до конца, что дает возможность получить модель, имеющую оптимальные характеристики – от визуального представления до сложности, зависящей от количества треугольных граней. Рационально использовать комбинированные методы, когда основная часть модели создается в САПР и дорабатывается на полигональном уровне.

Применение технологий имитационного 3D-моделирования и виртуальной реальности особенно востребовано в индустрии образования, а именно: опережающая подготовка специалистов, в том числе для научных организаций; повышение квалификации и профессиональная переподготовка специалистов; подготовка персонала к сложным процессам эксплуатации дорогостоящего высокотехнологичного оборудования; обучение студентов колледжей и вузов; формирование технологических и профессиональных компетенций; разработка образовательных программ по разным направлениям подготовки, например в высокотехнологичных областях микроэлектроники, – все это позволяет решать задачи по развитию кадрового потенциала [11].

При подготовке студентов ряда технических специальностей возникают сложности с доступом к реальному технологическому и лабораторному оборудованию. Например, в производстве микроэлектроники и микросистемной техники существуют особые требования к чистоте производственных помещений, в так называемых чистых комнатах содержание пыли в воздухе контролируется вплоть до нескольких единиц на кубический метр. Кроме того, реальные установки используют в сложных технологических цепочках, и манипуляции с ними строго ограничены и определяются производственными задачами. Для ознакомительного прохода на технологический участок задействованы либо так называемые серые зоны, демонстрирующие только тыльную часть оборудования, либо переходы между чистыми комнатами, где технологические установки видны издалека через стеклянные перегородки. Поэтому посещение студентами высокотехнологичных производств имеет преимущественно характер экскурсий.

В то же время будущим специалистам в области микроэлектроники и микросистемной техники необходимо иметь целостное представление о технологических процессах производства, а также о принципах работы отдельных единиц оборудования. Решение указанных задач возможно путем применения программно-аппаратных комплексов виртуальной реальности (Virtual reality, VR). На сегодняшний день в мире накоплен значительный опыт по их разработке и применению в образовательной сфере, несомненным преимуществом VR-технологий является возможность интерактивного взаимодействия с моделируемой средой.

Результаты и их обсуждение. В Центре виртуального прототипирования (ЦВП) Института цифрового дизайна МИЭТ ведутся работы над проектами по разработке программных интерактивных виртуальных производственных комплексов на основе реальных объектов; цифровых двойников технологического оборудования, обеспечивающих интерактивное взаимодействие в режиме реального времени с применением инструментов виртуальной, дополненной и смешанной реальности (VR/AR/MR); интерактивных виртуальных обучающих и тестирующих систем; VR-лабораторий; VR-экскурсий на сложные производства и др.

Рассмотрим проекты, в которых применены технологии моделирования комбинированными методами, включая создание точных интерактивных визуализированных киберфизических сред и виртуальных прототипов, интегрированных в структуру цифровых двойников.

Разработанный в ЦВП виртуальный производственный участок «Термическая диффузия» представляет собой интерактивный симулятор технологического цикла, содержащий киберфизическую модель горизонтальной диффузионной печи, анимированную визуализацию конструкции установки и технологического процесса в режиме реального времени, а также обучающий тренинг с возможностью тестирования полученных результатов и знаний (рис. 4). Проект разработан совместно с Зеленоградским нанотехнологическим центром и Институтом нано- и микросистемной техники МИЭТ. Проект виртуального производственного участка «Магнетронное распыление» включает в себя интерактивную киберфизическую модель вакуумной установки магнетронного нанесения металлических и диэлектрических нанопленок МАГНА ТМ 200-02 (рис. 5). Программный комплекс обеспечивает работу в нескольких режимах: демонстрация виртуального производственного участка с оборудованием (виртуальная экс-



Рис. 4. Фрагмент интерактивной киберфизической модели горизонтальной диффузионной печи
Fig. 4. Fragment of the interactive cyber-physical model of the horizontal diffusion furnace



Рис. 5. Интерфейс виртуального производственного участка «Магнетронное распыление»
Fig. 5. Interface of the virtual production area “Magnetron sputtering”

курсия), сопровождаемая справочной информацией по работе с установкой; интерактивное изучение оборудования и технологического процесса в режиме реального времени; самостоятельная работа на виртуальном производственном участке в режиме реального времени с возможностью ввода параметров из технологических карт и контроля ввода; симуляция поэтапного выполнения операций с контролем текущих процессов, сопровождаемая анимацией технологического цикла; тестирование полученных результатов и знаний, в том числе сообщения об ошибках и предложения способов их устранения с фиксацией в журнале действий пользователя и формирование отчета, содержащего статистику ошибок. Проект разработан совместно с НИИ точного машиностроения и Институтом перспективных материалов и технологий МИЭТ.

Виртуальные производственные комплексы «Фотолитография» и «Ионная имплантация», разработанные в рамках проекта «Передовые инженерные школы» в партнерстве с АО «Микрон», содержат интерактивные виртуальные пространства производственных участков, моделирующие технологические процессы фотолитографии и элионных процессов производства изделий микроэлектроники. Данные комплексы обеспечивают анимированную интерактивную демонстрацию конструкций установок, технологических процессов в режиме реального времени и обучающий тренинг. В со-

ставе виртуальных технологических участков имеется следующее оборудование: трек для нанесения и проявления фоторезиста; сканер фотолитографии; установка для контроля рассовмещения топологических слоев; электронный микроскоп для контроля линейных размеров; установки оптического (визуального) контроля пластин, ионного легирования, плазмохимического травления, осаждения и вакуумного напыления, контроля качества рабочей продукции и др. (рис. 6).



Рис. 6. Виртуальный производственный участок «Фотолитография»
Fig. 6. Virtual production area “Photolithography”

Заключение. Апробация разработанных виртуальных программных комплексов при подготовке студентов МИЭТ технических специальностей показала эффективность предложенных подходов к разработке виртуальных прототипов.

В перспективе в целях более эффективного предиктивного обслуживания и проектирования данные технологии будут интегрироваться с процессами производства и технического обслуживания изделий.

Литература / References

1. *ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий: Общие положения.* М.: Рос. ин-т стандартизации; 2021. IV, 10 с.
   GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins for devices: General provisions. Moscow.: Ros. in-t standartizatsii Publ.; 2021. IV, 10 p. (In Russ.).
2. Вигер И. Возможности технологии виртуального прототипирования на всех этапах жизненного цикла продукта. *CAD/CAM/CAE Observer.* 2016;(8(108)):48–53.
   Viger I. Possibilities of virtual prototyping technology at all stages of the product life cycle. *CAD/CAM/CAE Observer.* 2016;(8(108)):48–53. (In Russ.).
3. Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *Dassault Systèmes.* 2014. Available at: https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf (accessed: 07.07.2025).
4. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт.* М.: АльянсПринт; 2020. 400 с.
   Prokhorov A., Lysachev M. *Digital twin: Analysis, trends, world experience.* Moscow: Al’yansPrint; 2020. 400 p. (In Russ.).
5. Вихман В. В., Ромм М. В. «Цифровые двойники» в образовании: перспективы и реальность. *Высшее образование в России.* 2021;30(2):22–32. https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-2-22-32. EDN: FODZSG.
   Vikhman V. V., Romm M. V. “Digital twins” in education: Prospects and reality. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia.* 2021;30(2):22–32. (In Russ.). https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-2-22-32
6. Rosen R., Wichert G. von, Lo G., Bettenhausen K. D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine.* 2015;48(3):567–572. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141
7. Потемкин А. Е. *Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D.* СПб.: БХВ-Петербург; 2004. 501 с.
   Potemkin A. E. *Solid state modeling in KOMPAS-3D System.* St. Petersburg: BHV-Peterburg; 2004. 501 p. (In Russ.).
8. Большаков В. П., Бочков А. Л., Лячек Ю. Т. Проблемы обмена графическими данными между CAD-системами. *Компьютерные инструменты в образовании.* 2013;(2):37–46. EDN: RXQXFP.
   Bol’shakov V. P., Bochkov A. L., Lyachek Yu. T. Problems of graphic data interchange between CAD-systems. *Kompjuternye instrumenty v obrazovanii = Computer Tools in Education.* 2013;(2):37–46. (In Russ.).

9. Rogers D. F. *An introduction to NURBS: With historical perspective.* San Francisco, CA: Morgan Kaufmann; 2001. 344 p. https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-669-2.X5000-3
10. Szeliski R. *Computer vision: Algorithms and applications.* 2nd ed. Cham: Springer; 2022. XXII, 925 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9
11. Соколова Т. Ю., Кулагин Б. Ю. Виртуальное прототипирование технологического оборудования в образовании. In: *VI Международная научная конференция по междисциплинарным исследованиям (SDE-IR II 2024),* Екатеринбург, 15 июня 2024 г.: сб. статей. Екатеринбург: Ин-т цифровой экономики и права; 2024, с. 481–486. EDN: APAXDP.
Sokolova T. Yu., Kulagin B. Yu. Virtual prototyping of production equipment in education. In: *VI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po mezhdistsiplinarnym issledovaniyam (SDE-IR II 2024),* Ekaterinburg, June 15, 2024: proceedings. Ekaterinburg: Institute of Digital Economics and Law; 2024, pp. 481–486. (In Russ.).

Информация об авторах

Соколова Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, директор Института цифрового дизайна Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sokolova-ta@mail.ru

Кулагин Борис Юрьевич – доцент, заместитель директора Института цифрового дизайна Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kulaginb@mail.ru

Information about the authors

Tatiana Yu. Sokolova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Institute of Digital Design, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sokolova-ta@mail.ru

Boris Yu. Kulagin – Assoc. Prof., Deputy Director of the Institute of Digital Design, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kulaginb@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 12.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

Уважаемые авторы!

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

Научная статья
УДК 621.391
https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-667-674
EDN: VXNFNF

Разработка алгоритма межуровневого взаимодействия в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET

А. А. Бахтин, А. С. Волков, С. С. Муратчаев*[*]

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

[*] *said.muratchaev@gmail.com*

Аннотация. Мобильные самоорганизующиеся сети MANET (Mobile Ad hoc Networks) характеризуются сложностью в построении маршрутизации в условиях постоянных изменений структуры сети. Рост числа узлов приводит к экспоненциальному увеличению объема служебного трафика, что снижает пропускную способность и увеличивает энергопотребление. Данные ограничения обусловливают актуальность разработки алгоритмов, позволяющих обеспечить устойчивость, масштабируемость и минимальные задержки сети в динамической среде. В работе предложен новый подход к функционированию децентрализованных самоорганизующихся сетей MANET, основанный на применении кластерного анализа для построения маршрутов. Показано, что кластерный анализ позволяет сгруппировать узлы сети по их топологическим и функциональным характеристикам, что дает возможность адаптировать процесс маршрутизации при увеличении количества устройств. Применяемый алгоритм иерархической кластеризации DBSCAN способствует объединению мобильных узлов в группы с сохранением преимущества реактивных и проактивных протоколов маршрутизации.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети MANET, маршрутизация, кластерный анализ, протокол Ad hoc

Для цитирования: Бахтин А. А., Волков А. С., Муратчаев С. С. Разработка алгоритма межуровневого взаимодействия в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET. *Изв. вузов. Электроника*. 2025;30(5):667–674. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-667-674. EDN: VXNFNF.

© А. А. Бахтин, А. С. Волков, С. С. Муратчаев, 2025

Original article

Development of an algorithm for inter-layer interaction in decentralized self-organizing MANETs

A. A. Bakhtin, A. S. Volkov, S. S. Muratchaev*

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

* *said.muratchaev@gmail.com*

Abstract. The self-organizing Mobile Ad hoc Networks (MANETs) are characterized by complicated routing under constant changes in network structure. The growing number of network nodes leads to exponential growth of maintenance traffic, which decreases bandwidth capacity and increases energy consumption. These limitations actualize the development of algorithms that deliver such results as stability, scalability and minimal network delays in dynamic medium. In this work, a novel approach to decentralized self-organizing MANETs functioning is proposed, based on the application of cluster analysis to routing. It has been demonstrated that cluster analysis allows nodes grouping based on their topological and functional characteristics, which is enabling adaptive and efficient route construction as the number of nodes increases. The employed DBSCAN hierarchical clustering algorithm makes it possible to group nodes while keeping the advantage of reactive and proactive routing protocols.

Keywords: self-organizing network, MANET, routing, cluster analysis, Ad hoc

For citation: Bakhtin A. A., Volkov A. S., Muratchaev S. S. Development of an algorithm for inter-layer interaction in decentralized self-organizing MANETs. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*. 2025;30(5):667–674. (In Russ.). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-5-667-674.

Введение. В современных технологиях беспроводной связи отмечается растущий спрос на гибкие, устойчивые и масштабируемые решения, функционирующие в условиях отсутствия стационарной инфраструктуры. Мобильные самоорганизующиеся сети MANET (Mobile Ad hoc Networks) представляют собой перспективную парадигму, где узлы динамически формируют децентрализованную топологию, выступая одновременно как конечные устройства, так и маршрутизаторы [1]. Такие сети находят применение в критически важных сценариях – от ликвидации последствий стихийных бедствий и специализированных операций до развертывания систем «умного города» и Интернета вещей. Однако высокая мобильность узлов, ограниченная пропускная способность, энергоэффективность и динамически меняющаяся топология приводят к фундаментальным вызовам в целях обеспечения надежной и эффективной передачи данных.

В настоящей работе рассматривается новый подход к функционированию сетей MANET, который основан на применении кластерного анализа при построении таблицы маршрутизации.

Актуальность и проблематика MANET. Основная проблема MANET заключается в сложности построения маршрутизации в условиях постоянных изменений структуры сети. Традиционные протоколы, разработанные для статичных инфраструктур, оказываются неэффективными ввиду высоких накладных расходов, задержек и неспособности адаптироваться к частым разрывам связей. Кроме того, рост количества узлов

приводит к экспоненциальному росту объема служебного трафика, что уменьшает пропускную способность и увеличивает энергопотребление [2]. Эти ограничения обусловливают необходимость разработки алгоритмов, способных обеспечить устойчивость, масштабируемость и минимальные задержки в динамической среде.

MANET – динамические системы, в которых узлы могут свободно перемещаться, а топология сети подвержена непрерывным изменениям. В таких условиях для традиционных протоколов маршрутизации, разработанных для статичных инфраструктурных сетей, характерны низкая эффективность работы из-за высокой нагрузки, создаваемой служебным трафиком, и неспособность адаптироваться к частым разрывам связей. Для решения этих проблем разработаны специализированные алгоритмы маршрутизации, которые можно классифицировать на три основные категории: проактивные, реактивные и гибридные. Каждая категория имеет особые характеристики, определяющие их применимость в разных сценариях.

Проактивные алгоритмы ориентированы на поддержание актуальной информации о топологии сети посредством периодического обмена служебными сообщениями. Узел в таких системах хранит таблицу маршрутов ко всем возможным адресатам, что минимизирует задержку в начале передачи данных. Примером данного подхода является протокол OLSR (Optimized Link State Routing), использующий механизм MPR (Multi-Point Relays) для оптимизации широковещательных рассылок. Узлы, выбранные в качестве MPR, ретранслируют TC-сообщения (Topology Control), что сокращает объем служебного трафика. OLSR демонстрирует эффективность в сетях с высокой плотностью узлов и умеренной мобильностью [3]. Проактивный протокол DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) основан на дистанционно-векторном алгоритме с добавлением порядковых номеров для предотвращения петель маршрутизации. Его недостаток – высокие накладные расходы, связанные с частым обновлением таблиц, что делает его непригодным для сетей с экстремальной мобильностью. Преимущество проактивных алгоритмов – незначительная задержка установления соединения – нивелируется повышенным энергопотреблением и непропорционально высокими затратами ресурсов в условиях динамически изменяющейся топологии [4].

Реактивные алгоритмы используют принцип установления маршрутов по требованию. Это уменьшает объем служебного трафика в период отсутствия передачи данных. Протокол AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) реализует механизм запроса маршрута (RREQ) и ответа (RREP), при котором маршрут формируется только при необходимости отправки пакетов. Как следствие, AODV предпочтителен для сетей с высокой мобильностью и низкой интенсивностью трафика. Протокол DSR (Dynamic Source Routing) расширяет эту концепцию, включая полный путь передачи в заголовок каждого пакета, что позволяет узлам кешировать маршруты для последующего использования [5]. Однако увеличение накладных расходов при передаче длинных маршрутов ограничивает его применение в сетях с высокой нагрузкой. Реактивные алгоритмы обнаруживают компромисс между уменьшением объема служебного трафика и увеличением задержки при инициализации передачи, поэтому они менее подходят для приложений, требующих минимальной латентности.

Гибридные алгоритмы комбинируют элементы проактивного и реактивного подходов для достижения баланса между служебными затратами и задержкой. Протокол ZRP (Zone Routing Protocol) разделяет сеть на зоны, внутри которых используется проактивная маршрутизация IARP (Intra-zone Routing Protocol), а для межзонового взаимодействия применяется реактивный механизм IERP (Inter-zone Routing Protocol). Это позволяет эффективно масштабировать сеть и адаптироваться к переменной мобильности

узлов. CBRP (Cluster-Based Routing Protocol) организует узлы в кластеры с выделенными лидерами Cluster Heads, обеспечивая проактивное управление внутри кластера и реактивную маршрутизацию между ними. Несмотря на преимущества, гибридные протоколы требуют сложной настройки параметров, таких как размер зоны или критерии формирования кластеров, что ограничивает их универсальность.

Дополнительные подходы расширяют классические методы маршрутизации за счет интеграции новых технологий. Географическая маршрутизация, например, использует данные о физическом расположении узлов GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing), применяя алгоритмы ближайшего соседа для минимизации количества прыжков. Метрики качества канала, такие как ETX (Expected Transmission Count), интегрируются в протоколы (например, в модифицированный OLSR) для оценки надежности связи на основе исторических данных о потерях пакетов [6]. Перспективным направлением является внедрение методов искусственного интеллекта, включая машинное обучение, для прогнозирования изменений топологии и адаптивного выбора маршрутов. Эти методы позволяют оптимизировать маршрутизацию в условиях неопределенности, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и сложны в реализации.

Выбор алгоритма маршрутизации в MANET определяется спецификой сетевой среды: плотностью узлов, уровнем мобильности, интенсивностью трафика и требованиями к энергоэффективности. Проактивные протоколы предпочтительны для стабильных сетей с постоянным трафиком, реактивные – для динамичных сред с редкой передачей данных, а гибридные подходы обеспечивают компромисс для крупномасштабных гетерогенных систем. Дальнейшее развитие методов маршрутизации связано с интеграцией когнитивных технологий и адаптивных механизмов, способных автоматически оптимизировать параметры в режиме реального времени.

Кластерные алгоритмы маршрутизации в MANET целесообразно применять в условиях оптимизации управляющих нагрузок и повышения масштабируемости сети. Их использование критически важно в крупномасштабных средах с высокой плотностью узлов, где традиционные плоские архитектуры генерируют избыточный служебный трафик ввиду необходимости поддержания полносвязной топологии. Кластеризация позволяет сегментировать сеть на логические группы, делегируя функции маршрутизации выделенным узлам-координаторам (кластерным головкам), за счет чего снижается дублирование управляющих сообщений и минимизируются энергозатраты рядовых узлов. Это особенно значимо в сценариях с ограниченными ресурсами устройств, таких как сенсорные сети или Интернет вещей, где продление времени автономной работы является приоритетным [7].

Эффективность кластерных алгоритмов также проявляется в условиях умеренной или локализованной мобильности узлов. Если перемещения устройств сохраняют относительную стабильность внутри кластеров, но варьируются между ними, иерархическая структура обеспечивает устойчивость маршрутов на внутригрупповом уровне, сокращая частоту реконфигурации путей. Кроме того, кластерные подходы показывают преимущества в гетерогенных сетях, где имеют место узлы с разной вычислительной мощностью и энергетическим потенциалом. Назначение более ресурсообеспеченных устройств в качестве кластерных головок позволяет рационально распределять нагрузку во избежание перегрева или преждевременного разряда критически важных узлов.

Предполагается использование протокола CBHP (Cluster-Based Hybrid Protocol) – гибридного алгоритма маршрутизации для MANET, сочетающего в себе преимущества реактивных и проактивных подходов. Сеть разделяется на кластеры, каждый из которых управляется кластерной головкой, выбираемой по уровню энергии, вычислительной мощности и стабильности соединения. Внутри кластеров используется реактивная

маршрутизация, такая как AODV или DSR, что минимизирует объем служебного трафика в период простоя. Для межкластерного взаимодействия применяются проактивные протоколы, например OLSR или DSDV, обеспечивающие стабильность маршрутов. CBHP уменьшает объем управляющих сообщений за счет локализации обмена данными внутри кластеров.

Важным аспектом является адаптивность кластерных алгоритмов к динамическим изменениям. В средах с периодическими флуктуациями трафика или сегментами с разной интенсивностью передачи данных кластеризация обеспечивает балансировку нагрузки за счет локальной оптимизации маршрутов внутри групп. Это уменьшает вероятность коллизий и задержек в ключевых сегментах сети, что актуально для мультимедийных приложений с требованиями к качеству обслуживания (QoS). Таким образом, кластерные алгоритмы становятся предпочтительным выбором в сложных сценариях, где необходимо сочетать энергоэффективность, управляемость и устойчивость к частичным изменениям топологии [8].

Роль кластеризации в межуровневом взаимодействии. Кластеризация как ключевой метод оптимизации MANET позволяет преодолевать указанные ограничения. Ее суть заключается в логическом разделении сети на кластеры – группы узлов, управляемые лидерами Cluster Heads [9, 10]. Это создает иерархическую структуру, где взаимодействие происходит на двух уровнях: внутри кластера – используются реактивные протоколы (AODV, DSR), эффективные для локальной маршрутизации в условиях высокой мобильности; между кластерами – применяются проактивные протоколы (OLSR, DSDV), обеспечивающие стабильность и предсказуемость на межкластерном уровне.

Кластеризация решает несколько ключевых задач: уменьшает объем служебного трафика путем ограничения обмена информацией внутри кластеров и координации межкластерного взаимодействия через лидеров; повышает масштабируемость благодаря разделению сети на автономные группы, позволяя локально управлять ресурсами без глобальных обновлений топологии; улучшает энергоэффективность, делегируя роль шлюза лидерам кластеров, в результате уменьшается нагрузка на другие узлы; адаптируется к динамическим изменениям, обеспечивая реконфигурацию кластеров при перемещении узлов и поддерживая целостность сети.

Оценка результатов моделирования децентрализованный самоорганизующейся сети MANET. Для проверки и сравнения эффективности протоколов маршрутизации в среде NS-3 разработаны сценарии имитационного моделирования, учитывающие разные условия мобильности, плотности сети, интенсивности трафика и энергетических ограничений, включая анализ ключевых метрик, таких как показатель PDR (Packet Delivery Ratio), характеризующий надежность доставки данных, средняя задержка передачи пакетов End-to-End Delay, отражающая временные затраты на маршрутизацию, пропускная способность сети.

В условиях высокой мобильности, когда скорость узлов варьируется от 5 до 25 м/с, ключевыми факторами являются показатель PDR и способность минимизировать потерю пакетов. На рис. 1 приведена зависимость PDR от скорости узлов, где видно, что CBHP

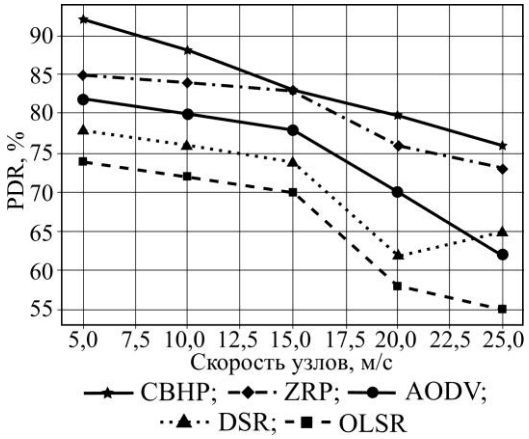


Рис. 1. Результаты имитационного моделирования для сценария с высокой мобильностью узлов

Fig. 1. Simulation results for the scenario with high node portability

стабильно обеспечивает высокие показатели PDR, достигая 92 % при минимальной скорости и постепенно снижая PDR до 76 % при скорости 25 м/с. В то время как протоколы AODV и OLSR характеризуются значительным снижением PDR с увеличением скорости (AODV падает до 62 %, OLSR – до 55 %), CBHP сохраняет более высокий уровень PDR. Это объясняется особенностями кластерной маршрутизации, при которой кластерные шлюзы предсказывают возможные разрывы маршрутов и минимизируют потери пакетов.

В статичной сети, где ограничены энергетические ресурсы (рис. 2), CBHP показывает наибольшее время жизни сети – 12,1 ч. Это на 30–50 % больше, чем у других протоколов. Как следует из рисунка, CBHP значительно превосходит AODV (8,2 ч), OLSR (6,5 ч) и другие протоколы. Это преимущество обусловлено более эффективной организацией нагрузки на кластерные головки (CH), а также равномерным распределением энергии между узлами, что предотвращает преждевременную разрядку узлов и продлевает срок службы сети.

В условиях пикового трафика, когда узлы сети обрабатывают большие объемы данных (рис. 3), важными метриками являются пропускная способность и коэффициент потерь. Как видно из рис. 3, CBHP достигает максимальной пропускной способности 8,9 Мбит/с, что на 15–20 % выше, чем у других протоколов (AODV – 6,2 Мбит/с и DSR – 5,9 Мбит/с). Это связано с эффективной балансировкой нагрузки между кластерами и использованием интеллектуального кеширования маршрутов, в итоге уменьшается количество коллизий и повышается эффективность передачи данных. Следует отметить, что CBHP показал лучший коэффициент потерь (12 %), что значительно превосходит такие протоколы, как AODV (22 %) и DSR (25 %). Это указывает на более стабильную работу CBHP в условиях высокой нагрузки и пикового трафика.

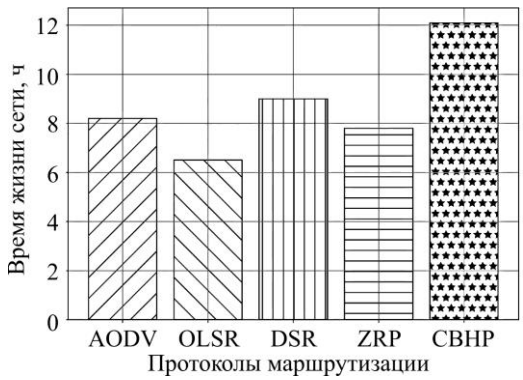


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования для сценария с оценкой времени жизни сети

Fig. 2. Simulation results for the scenario with network lifetime assessment

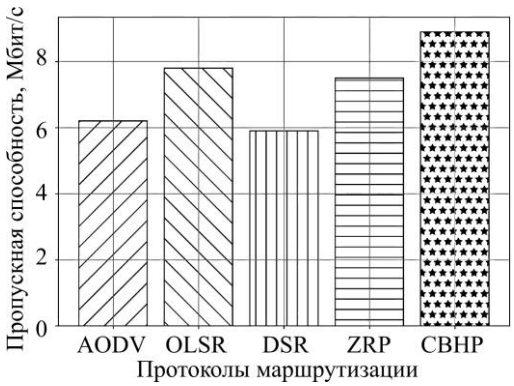


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования для сценария с оценкой пропускной способности при нагрузке на сеть

Fig. 3. Simulation results for the scenario with throughput assessment under network loads

На рис. 4 показано, что CBHP продемонстрировал минимальный коэффициент потерь 12 %, это наилучший результат среди всех протоколов (AODV – 22 %, OLSR – 18 %, DSR – 25 %). Данный результат свидетельствует о высоком качестве маршрутизации и минимизации потерь пакетов при высоких нагрузках в сети. Меньшие потери пакетов в CBHP обусловлены эффективной маршрутизацией и равномерным распределением нагрузки по узлам, что позволяет избежать перегрузок и сбоев в сети.

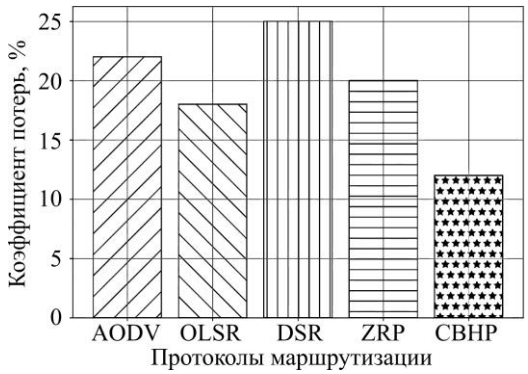


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования для сценария с оценкой коэффициента доставки пакетов данных

Fig. 4. Simulation results for the scenario with data packet delivery rate assessment

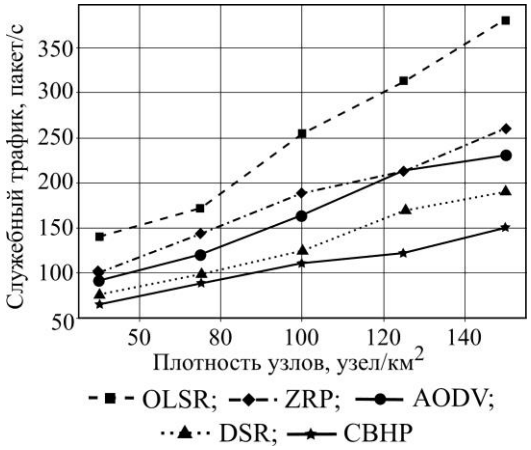


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования для сценария с оценкой объема служебного трафика при разной плотности узлов

Fig. 5. Simulation results for the scenario with service traffic assessment under different node densities

Для оценки устойчивости протоколов к изменениям плотности узлов в сети построена зависимость служебного трафика при изменении плотности узлов (рис. 5). Как видно из рисунка, CBHP значительно уменьшает объем служебного трафика по сравнению с другими протоколами. Например, при плотности 100 узлов/км^2 служебный трафик для CBHP составляет 110 пакетов/с, что на 20–40 % ниже, чем у AODV (160 пакетов/с) и OLSR (250 пакетов/с). Это преимущество обусловлено кластерной архитектурой CBHP, ограничивающей количество широковещательных рассылок и снижающей избыточный трафик.

Рост объема служебного трафика в CBHP имеет линейную зависимость от плотности узлов, а для OLSR этот рост экспоненциальный. Такое поведение свидетельствует о более эффективном использовании ресурсов сети в CBHP, что позволяет протоколу успешно справляться с увеличением плотности узлов.

Заключение. Анализ показателей разных протоколов маршрутизации в MANET, включая CBHP, выявил, что гибридный протокол на основе кластеризации значительно превосходит другие алгоритмы по ключевым меткам, таким как PDR, время жизни сети, пропускная способность, коэффициент потерь и служебный трафик. Преимущество CBHP заключается в эффективном сочетании проактивной и реактивной маршрутизации, что позволяет данному протоколу адаптироваться к изменениям в сети, минимизировать потери пакетов и снижать энергозатраты.

Проведенное моделирование показало, что протокол CBHP превосходит протоколы AODV, OLSR и DSR по ключевым метрикам.

Литература / References

1. Hosmani S., Mathpati B. Survey on cluster based routing protocol in VANET. In: *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT).* Mysuru: IEEE; 2017, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICEECCOT.2017.8284584
2. Lavadya N. D., Amgoth N. R., Reddy V. B. A novel reliable routing protocol for MANETs. In: *2024 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. Guwahati: IEEE; 2024, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ANTS63515.2024.10898714
3. Shivarudra A., Gupta G. K., Vijayabaskar S., Dandu M. M. K., Agarwal S., Bhatt S. Developing a secure, trust-based, and energy-efficient hybrid protocol for mobile ad hoc networks (MANETs). In: *2024 7th In-*

ternational Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I). Greater Noida: IEEE; 2024, pp. 1114–1118. https://doi.org/10.1109/IC3I61595.2024.10829155
4. Atti S. P., Niranjan L., Taseen R., Yaseen H., Suneetha J., Pasha A. An innovative method for improving lifetime ratio in a wireless sensor network for EV vehicles using improved cybernated clustering scheme. In: *2024 2nd World Conference on Communication & Computing (WCONF)*. Raipur: IEEE; 2024, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/WCONF61366.2024.10691913
5. Agarwal R., Motwani M. Survey of clustering algorithms for MANET: preprint. *arXiv.org*. 11.12.2009. Available at: https://arxiv.org/abs/0912.2303 (accessed: 09.07.2025). https://doi.org/10.48550/arXiv.0912.2303
6. Suman P. *Introduction to MANET and clustering in MANET*. Hamburg: Anchor Academic Publ.; 2016. 40 p.
7. Yilmaz K., Kara R., Katircioglu F. Energy-efficient hybrid adaptive clustering for dynamic MANETs. *IEEE Access*. 2025;13:51319–51331. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3552232
8. Pathak S., Jain S., Borah S. Clustering algorithms for MANETs: A review on design and development. In: *Soft Computing Techniques and Applications: proceeding of the International Conference on Computing and Communication (IC3 2020)*. Eds S. Borah et al. Singapore: Springer; 2021, pp. 563–578. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7394-1_51
9. Gopala Krishnan C., Nishan A. H., Gomathi S., Aravind Swaminathan G. Energy and trust management framework for MANET using clustering algorithm. *Wireless Pers. Commun*. 2022;122(2):1267–1281. https://doi.org/10.1007/s11277-021-08948-5
10. Muruganandam S., Renjit J. A. Real-time reliable clustering and secure transmission scheme for QoS development in MANET. *Peer-to-Peer Netw. Appl.* 2021;14(6):3502–3517. https://doi.org/10.1007/s12083-021-01175-6

Информация об авторах

Бахтин Александр Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), bah@miee.ru

Волков Алексей Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), leshvol@mail.ru

Муратчаев Султансаид Султанханович – старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), said.muratchaev@gmail.com

Information about the authors

Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bah@miee.ru

Aleksey S. Volkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), leshvol@mail.ru

Sultansaid S. Muratchaev – Senior Lecturer of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), said.muratchaev@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 24.03.2025
Поступила после рецензирования / Revised 04.04.2025
Принята к публикации / Accepted 07.08.2025

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 7 августа 2025 г.)

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;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **электронное машиностроение;**
- **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 или института, 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 быть структурирована и содержать: введение; основную часть; заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: рубрика, в которой автор планирует опубликовать свою статью; 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 названиями рубрики, статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названиями рубрики, 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. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется по единым правилам для оригинального списка и References, основанным на элементах Ванкуверского и Гарвардского стандартов: фамилии авторов всегда пишутся перед заглавием; указываются по возможности все авторы (но не более 6-7); исключаются знаки / и //; не разделяются пробелами год выпуска, номера тома, выпуска, статьи и диапазон страниц;

– 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 (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2026

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): https://www.ural-press.ru/catalog
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- ООО «Руспресса»: http://abcpress.ru/
- ООО «ГЛОБАЛПРЕСС»: globalpress.ms@mail.ru
- подписное агентство «Криэйтив Сервис Бэнд»: https://periodicals.ru/
- редакцию – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

Сайт: http://ivuz-e.ru