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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 25
№ 3
май - июнь

Vol. 25
No. 3
May - June

2020

75 лет со дня Победы в Великой Отечественной войне

1945
2020



Мемориальный комплекс «Штыки» на 40-м километре Ленинградского шоссе

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 25, № 3, 2020
май – июнь

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Грибов Борис Георгиевич – чл.-корр. РАН, д.хим.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Коноплев Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© “Известия вузов. Электроника”, 2020
© МИЭТ, 2020

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

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

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

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

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

Подписано в печать 15.06.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 11,16 усл.печ.л., 10,53 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 9. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

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

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

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

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать» – 47570

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Федянина М.Е., Лазаренко П.И., Воробьев Ю.В., Козюхин С.А., Дедкова А.А., Якубов А.О., Левицкий В.С., Сагунова И.В., Шерченков А.А. Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $Ge_2Sb_2Te_5$..... 203

Элементы интегральной электроники

Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов А.А. Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления нитрид-галлиевых HEMT-транзисторов..... 219

Схемотехника и проектирование

Иванов Е.А., Якунин А.Н. Цифровая схема коммутации силовых ключей источников питания в квазирезонансном режиме..... 234

Тимошенко А.В., Калеев Д.В., Перлов А.Ю., Антошина В.М., Рябченко Д.В. Сравнительный анализ аналитических и эмпирических методик оценки текущих параметров надежности радиолокационных комплексов мониторинга..... 244

Биомедицинская электроника

Базаев Н.А. Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови..... 255

Информационно-коммуникационные технологии

Шепилова К.М., Сотников А.В., Шипатов А.В., Савченко Ю.В. Метод трехмерной реконструкции сцены в относительных координатах по двум изображениям с неоткалиброванных видеокамер..... 265

Краткие сообщения

Никифоров М.О., Дедкова А.А., Рыгалин Б.Н. Влияние технологических параметров процесса атомно-слоевой эпитаксии на однородность толщины зародышевых слоев GaN..... 277

Головлев А.А., Березина Н.В., Кондратьева О.В., Кольцов В.Б. Оценка эффективности мероприятий по снижению накопления полиэтиленовых отходов в окружающей среде на основе инфологической модели..... 282

Юбилеи

Сигову Александру Сергеевичу – 75 лет..... 287
Неволину Владимиру Николаевичу – 75 лет..... 288

Конференции

27-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2020»..... 289

IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2020)..... 290

К сведению авторов..... 291

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 25, No. 3, 2020
May – June
The scientifical and technical journal
Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Signed to print 15.06.2020. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 11,16. Number of copies 150. Order no. 9. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

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

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

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

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

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue of Agency Rospechat – 47570

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405

ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

CONTENTS

Electronics materials

Fedyanina M.E., Lazarenko P.I., Vorobyev Yu.V., Kozyukhin S.A., Dedkova A.A., Yakubov A.O., Levitskiy V.S., Sagunova I.V., Sherchenkov A.A. Influence of Crystallization Degree on the Dispersion of the Optical Parameters for Phase-Change Memory $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films..... 203

Integrated electronics elements

Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Kulikov A.A. Comparative Analysis of Methods for Measuring Thermal Resistance of Gallium Nitride HEMT-Transistors..... 219

Circuit engineering and design

Ivanov E.A., Yakunin A.N. Digital Switching Circuit of Power Transistors of Power Supplies in Quasi-Resonant Mode..... 234

Timoshenko A.V., Kaleev D.V., Perlov A.Yu., Antoshina V.M., Ryabchenko D.V. Comparative Analysis of Analytical and Empirical Methods of Assessment of Radar Monitoring Systems Current Reliability Parameters..... 244

Biomedical electronics

Bazaev N.A. Key Aspects of Autonomous Wearable Artificial Blood Purification Apparatus Development..... 255

Information-communication technologies

Shepilova K.M., Sotnikov A.V., Shipatov A.V., Savchenko Yu.V. 3D Scene Reconstruction Method in Relative Coordinates with Two Images from Non-Calibrated Video Cameras..... 265

Brief reports

Nikiforov M.O., Dedkova A.A., Rygalin B.N. Influence of Technological Parameters of the Atomic-Layer Epitaxy Process on the Uniformity of the Thickness of the Obtained Nucleation Layers GaN..... 277

Golovlev A.A., Berezina N.V., Kondratyeva O.V., Koltsov V.B. Assessment of the Effectiveness of Measures to Reduce Accumulation of Polyethylene Waste in Environment Based on the Infological Model..... 282

Anniversaries

Sigov Aleksandr Sergeevich is 75 years old..... 287

Nevolin Vladimir Nikolaevich is 75 years old..... 288

Conferences

27 All-Russian Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Graduate Students «Microelectronics and Informatics - 2020»..... 289

IX All-Russian Science and Technology Conference «Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development»..... 290

Instructions for authors..... 291

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 546.22/.24 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218

Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $Ge_2Sb_2Te_5$

М.Е. Федянина[1], П.И. Лазаренко[1], Ю.В. Воробьев[2], С.А. Козюхин[3], А.А. Дедкова[4], А.О. Якубов[1], В.С. Левицкий[5], И.В. Сагунова[1], А.А. Шерченков[1]

[1]Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва, Россия
[2]Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия
[3]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, г. Москва, Россия
[4]ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ, г. Москва, Россия
[5]ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург, Россия

fedyanina.m@org.miet.ru

Активное исследование материала $Ge_2Sb_2Te_5$ связано с возможностью создания многоуровневых энергонезависимых элементов для быстродействующих интегрально-оптических функциональных схем. Принцип многоуровневой записи в данных устройствах основан на формировании областей в тонких пленках $Ge_2Sb_2Te_5$ с частичной кристаллизацией и существенно различающимися оптическими свойствами. Для прогнозирования параметров инициирующего фазовые превращения воздействия и надежного обеспечения обратимого перехода между множеством логических состояний необходима достоверная информация об оптических характеристиках тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в состояниях с разной степенью кристалличности и условиях их получения. В работе исследовано влияние фазового состояния пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ на коэффициент экстинкции и показатель преломления, изучено изменение значений оптической ширины запрещенной зоны в зависимости от температуры термообработки. Образцы тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ исследованы методами атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа для определения их толщины, морфологии, фазового состояния и состава. С помощью метода спектральной эллипсометрии получены спектры эллипсометрических углов ψ и Δ (амплитудной и фазовой составляющих световой волны) и

© М.Е. Федянина, П.И. Лазаренко, Ю.В. Воробьев, С.А. Козюхин, А.А. Дедкова, А.О. Якубов, В.С. Левицкий, И.В. Сагунова, А.А. Шерченков, 2020

определены значения коэффициента экстинкции и показателя преломления. Рассмотрено влияние слоевых и математических моделей на расчет дисперсий оптических параметров пленок $Ge_2Sb_2Te_5$. Установлено существенное увеличение значений коэффициента экстинкции и показателя преломления на длине волны излучения 1550 нм при термообработке выше 200 °С. Показано, что оптическая ширина запрещенной зоны тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в аморфном состоянии равна 0,71 эВ, а в кристаллическом – 0,47 эВ. Выяснено, что зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ близки к линейным.

Ключевые слова: многоуровневые устройства; нанофотоника; фазовая память; тонкие пленки; $Ge_2Sb_2Te_5$; эллипсометрия; показатель преломления; коэффициент экстинкции; оптическая ширина запрещенной зоны; кристаллизация; степень кристалличности

***Для цитирования*:** Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $Ge_2Sb_2Te_5$ / М.Е. Федянина, П.И. Лазаренко, Ю.В. Воробьев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 203–218. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-01092), гранта Президента РФ (тема № МК-6347.2018.3, Соглашение 075-02-2018-16) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ, ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» и ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ при поддержке Минобрнауки России.

Influence of Crystallization Degree on the Optical Parameters Dispersion of $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films for Phase-Change Memory

M.E. Fedyanina[1], P.I. Lazarenko[1], Yu.V. Vorobyev[2], S.A. Kozyukhin[3], A. A. Dedkova[4], A.O. Yakubov[1], V.S. Levitskii[5], I.V. Sagunova[1], A. A. Sherchenkov[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia
[3]Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[4]Science-Technology Center «Microsystem Engineering and Electronic Component Base» National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[5]R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russia

fedyanina.m@org.miet.ru

Abstract: Active research of the $Ge_2Sb_2Te_5$ material (GST225) is connected with the possibility of creating multi-level non-volatile elements for high-speed integrated optical functional circuits. The principle of multi-level recording in these devices is based on the formation of regions in $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films with partial crystallization and significantly different optical properties. To predict the pa-

rameters of the effect that initiates phase transformations and reliably ensure a reversible transition between a set of logical states, it is necessary to have reliable information about the optical characteristics of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films in states with different degrees of crystallization and the conditions for their production. Thereby, the purpose of this research was to determine the influence of phase state $Ge_2Sb_2Te_5$ films on the extinction coefficient (k) and refractive index (n) and study changes in the values of optical band gap depending on the annealing temperature have been considered. The obtained samples of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films were examined using atomic force microscopy, X-ray phase analysis, and energy dispersion X-ray phase analysis, and energy-dispersive microanalysis to determine the film thickness, morphology, phase state, and composition of the films. The ellipsometry method was used to obtain the spectra of ellipsometric angles ψ and Δ (the amplitude and phase components of light wave) and the parameters n and k were determined. The influence of layer and mathematical models on the calculation dispersion of optical parameters of $Ge_2Sb_2Te_5$ films, have been considered. It was found a significant increase in the values of n and k on the wavelength of 1550 nm when annealing above 200 °C has been found. It has been shown that in the amorphous state, $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films have an optical band gap $\left(E_g^{\text{опт}}\right)$ equal to 0,71 eV, and in the crystalline $\left(E_g^{\text{опт}}\right)$ = 0,47 eV. It was determined that the dependences of the refractive index, extinction coefficient, and optical band gap on the degree of crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films are close to linear.

Keywords: multilevel devices; nanophotonics; phase-change memory; thin films; $Ge_2Sb_2Te_5$; ellipsometry; refractive index; extinction coefficient; optical band gap; degree of crystallization

***For citation*:** Fedyanina M.E., Lazarenko P.I., Vorobyev Yu.V., Kozyukhin S.A., Dedkova A.A., Yakubov A.O., Levitskii V.S., Sagunova I.V., Sherchenkov A.A. Influence of Crystallization Degree on the Optical Parameters Dispersion of $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films for Phase-Change Memory. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 203–218. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218

Funding: This study has been supported by the Russian Foundation for basic Research (project № 20-07-01092), the Russian Federation President's grant (subject № МК-6347.2018.3, Agreement 075-02-2018-16). The studies have been performed using equipment of Regional Center of Probe Microscopy of RSREU and Core facilities centers «Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjets», «MEMS and Electronic Components», and «STI Sensory» of MIET with the support of the Ministry of Education and Science of Russia.

Введение. Энергонезависимые электрические запоминающие устройства фазовой памяти (Phase Change Memory, PCM) на основе халькогенидных полупроводниковых соединений системы Ge–Sb–Te в течение последних пяти лет успешно применяются в качестве памяти класса Storage-Class Memory (SCM) [1]. Устройства электрической PCM, изготавливаемые компанией Intel на основе материала системы Ge–Sb–Te по технологии 3D-Xpoint, Intel Optane, характеризуются в 1000 раз более высоким быстродействием по сравнению с флэш-памятью NAND [2] и в 4,5 раз более высокой плотностью записи информации по сравнению с DRAM, изготовленными по 20-нм технологии.

При переходе от аморфного состояния к кристаллическому под действием импульсов лазерного излучения [3] или тока [4] наблюдается существенное изменение оптических свойств тонких пленок Ge-Sb-Te. Возможность формирования промежуточных состояний с частичной кристаллизацией [5] открывает широкие перспективы для создания многоуров-

невых (Multi Level Cell, MLC) энергонезависимых элементов быстродействующих интегрально-оптических функциональных схем, позволяющих записывать более двух логических состояний [6]. Разработка энергонезависимых элементов нанофотоники с возможностью многоуровневого изменения параметров оптического сигнала имеет важное прикладное значение для дальнейшего развития нанофотоники и интегральной оптики, а также для создания более эффективных вычислительных нейронных сетей [7].

Принцип работы многоуровневых реконфигурируемых PCM-устройств нанофотоники основан на процессах кристаллизации и аморфизации и, соответственно, разном соотношении двух фаз для функциональных областей тонких пленок материалов системы Ge–Sb–Te. Инициация данных процессов может быть осуществлена температурным воздействием [8], лазерным излучением [3] или электрическим током [4]. Варьируя параметры инициирующего воздействия, в функциональной области можно сформировать полностью аморфное и полностью кристаллическое (ГЦК и ГПУ) состояния, а также состояния, характеризующиеся различным объемом аморфизованного и закристаллизованного материала (частичная кристаллизация). Именно возможность формировать в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$ состояния с различной степенью кристалличности и значительный контраст оптических свойств между ними позволяют обеспечить многоуровневость с приемлемым соотношением сигнал/шум. В настоящее время продемонстрирована принципиальная возможность создания работоспособного 5-битного энергонезависимого элемента полностью оптической памяти, сохраняющего более 34 энергонезависимых состояний в одной ячейке [9].

При создании многоуровневых элементов памяти возникает ряд нерешенных проблем. Большинство исследователей изучают оптические свойства полностью аморфных или кристаллических пленок $Ge_2Sb_2Te_5$, которые определяют значения максимально достижимого оптического контраста [10, 11]. Анализ результатов, полученных методами спектрофотометрии [12] и эллипсометрии (рис.1) для аморфных и кристаллических образцов, выявил существенный разброс данных. Причинами такого разброса могут являться особенности получения пленок $Ge_2Sb_2Te_5$, используемые режимы кристаллизации, а также применение различных подходов и моделей на этапе обработки экспериментальных результатов, например моделей дисперсии оптических постоянных Тауца – Лоренца [13, 14], Коши [15], Коди – Лоренца [16].

Для прогнозирования параметров воздействия, инициирующего фазовые превращения, и надежного обеспечения обратимого перехода между множеством логических состояний необходимо иметь достоверную и надежную информацию об оптических параметрах пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в состояниях с различной степенью кристалличности и условиях их получения. При этом измерения следует проводить в одинаковых условиях, что позволит исключить дополнительные погрешности, например из-за проявления термооптического эффекта [17].

В работе [12] представлены результаты исследования оптических свойств частично закристаллизованных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ методом спектрофотометрии. Метод эллипсометрии позволяет определить эллипсометрические углы ψ и Δ, описывающие эллиптическую поляризацию света, отраженного от интерфейсов многослойного образца. Далее с использованием соответствующей модели можно оперативно и с высокой чувствительностью к особенностям поверхности определить оптические параметры (показатель преломления и коэффициент экстинкции) тонких пленок, сформированных на непрозрачных подложках. Метод обеспечивает более высокую точность по сравнению со спектрофотометрическими методами, так как нет необходимости измерять коэффициенты пропускания и отражения имеющих сильное поглощение тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$.

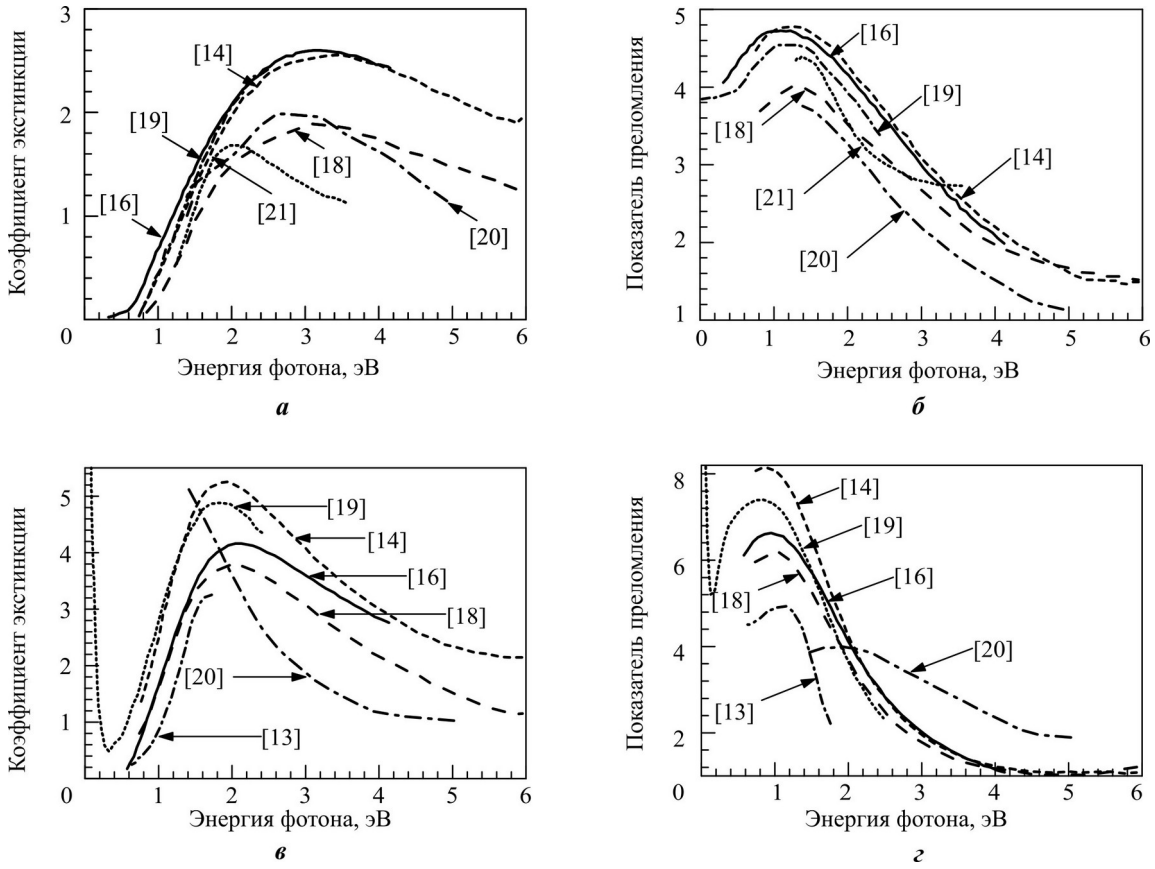


Рис.1. Спектральные зависимости коэффициента экстинкции и показателя преломления для аморфных (*а*, *б*) и кристаллических (*в*, *г*) пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ [13, 14, 16, 18–21]
Fig.1. Spectra of the extinction coefficient and refractive index for the amorphous (*a*, *b*) and crystalline (*c*, *d*) $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films [13, 14, 16, 18–21]

Цель настоящей работы – исследование оптических свойств аморфных, частично закристаллизованных и кристаллических тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с применением метода эллипсометрии.

Методика эксперимента. Исследовались тонкие пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, сформированные методом магнетронного распыления поликристаллической мишени. Давление аргона во время нанесения составляло $5{,}7\cdot10^{-1}$ Па, мощность – 100 Вт. В качестве подложек использовались кремниевые пластины КДБ-12.

Контроль исходных образцов тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с применением атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47-Pro выявил следующее: толщина всех исследуемых пленок составляет ~101 нм, значение средней арифметической шероховатости не превышает 1 нм (рис.2). По результатам исследований на просвечивающем электронном микроскопе FEI Titan Themis 200-80 с использованием приставки для проведения энергодисперсионного микроанализа установлено, что осажденные пленки имеют равномерное распределение состава по толщине, близкое к распределению в пленках $Ge_2Sb_2Te_5$. Структура пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ исследовалась методом рентгенофазового анализа (Rigaku SmartLab). Для рентгенограмм исходных аморфных пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ характерно наличие аморфного гало, что свидетельствует о некристаллической фазе пленок. При этом термообработка тонких пленок при температуре 250 °С приводит к появлению рефлексов, положение которых характерно для пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с кубической кристаллической структурой типа NaCl.

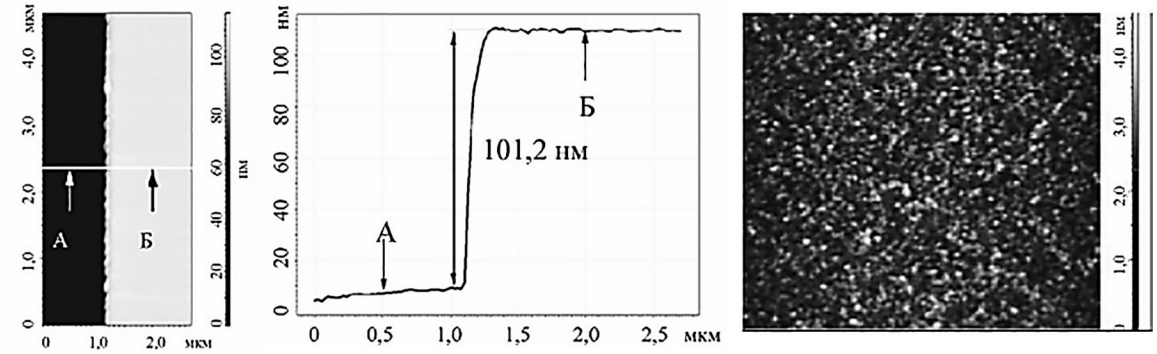


Рис.2. Результаты АСМ: изображение ступенчатой поверхности (*а*), профиль сечения ступеньки с указанием толщины (*б*), морфология поверхности (*в*) исходной пленки $Ge_2Sb_2Te_5$
Fig.2. The results of AFM: images of the step surface (*a*), the cross-section profile of the step with indicating the thickness (*b*), surface morphology (*c*) as-deposited $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film

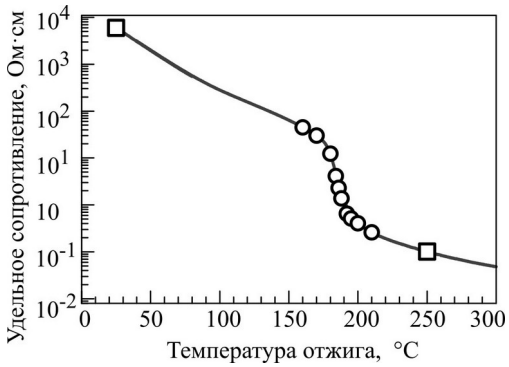


Рис.3. Температурная зависимость удельного сопротивления тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ (□, ○ – значения выбранной температуры термообработки для исследования оптических свойств)
Fig.3. Temperature dependence of resistivity for $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film (□, ○ – annealing temperatures used for optical measurements)

Для более точного определения температурного диапазона кристаллизации и выбора температуры термообработки для формирования образцов с частичной кристаллизацией измерялись температурные зависимости удельного сопротивления тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в потоке аргона с применением аппаратно-программного комплекса на основе термостолика Linkam HFS600E-PB4. Измерения тока проводились при напряженности поля 0,77 В/см со скоростью 1 точка/с в диапазоне от комнатной температуры до 300 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. Из рис.3 видно, что фазовый переход из аморфного состояния в кристаллическое, сопровождающийся уменьшением удельного сопротивления тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, происходит в диапазоне температур 170–200 °С. На основе полученных данных для дальнейших исследований выбраны 11 значений температуры термообработки образцов (см. рис.3). Термообработка заключалась в нагреве образцов до одного из значений выбранной температуры и последующем охлаждении в потоке аргона со скоростью изменения температуры 5 °С/мин. Выдержка при достижении максимальной температуры не проводилась.

Спектральные зависимости эллипсометрических параметров I_c и I_s, определяющих характеристики световой волны после отражения от образца, измерялись на спектральном эллипсометре Horiba Uvisel 2 в диапазоне длин волн 200–2100 нм с шагом изменения длины волны 5 нм и при углах наклона поляризатора и анализатора 70°. С использованием параметров I_s и I_c определены спектры значений эллипсометрических углов ψ и Δ, показатели преломления n, коэффициенты экстинкции k, значения оптической ширины запрещенной зоны $E_g^{\text{опт}}$ и толщины пленок. Управление работой эллипсометра во время измерений и последующее определение результатов путем моделирования проводилось с помощью программы DeltaPsi2 (Horiba).

Результаты и их обсуждение. Спектральные зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ получены для образцов в аморфном состоянии и после термообработки при выбранных температурах. В качестве примера на рис.4 представлены результаты измерения для исходного аморфного образца и образца, прошедшего термообработку при температуре 250 °С.

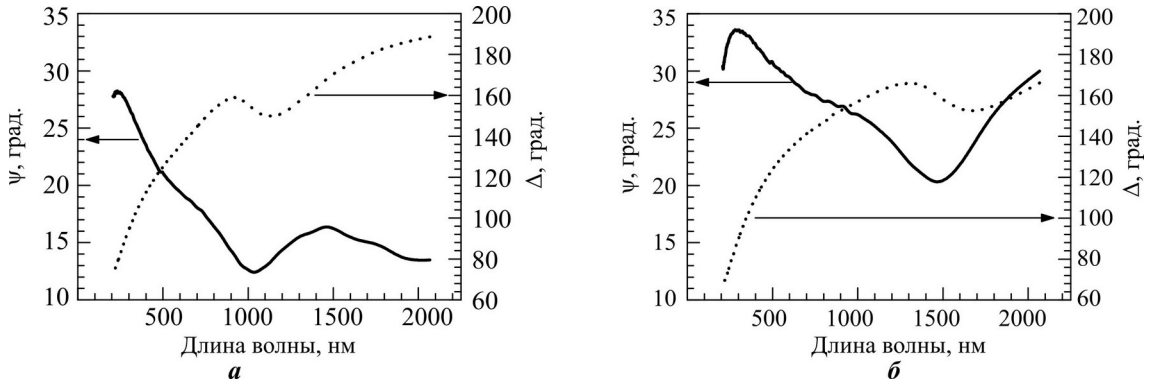


Рис.4. Спектральные зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ для аморфного (*а*) и кристаллического (*б*) образцов
Fig.4. Spectra of ψ and Δ for amorphous (*a*) and crystalline (*b*) samples

Используя полученные эллипсометром спектральные характеристики и соответствующую модель дисперсии оптических постоянных, можно определить спектры комплексного показателя преломления и коэффициента экстинкции, рассчитать комплексную диэлектрическую функцию, а также оценить толщину слоев исследуемых образцов. Выбор моделей оптических постоянных разнообразен и зависит от типа материала, спектрального диапазона и т.д. Наиболее часто при интерпретации эллипсометрических измерений аморфных тонких пленок, в том числе пленок $Ge_2Sb_2Te_5$, используются модели Тауца – Лоренца [13, 14] и Коди – Лоренца [16].

Модель Тауца – Лоренца разработана Джеллисоном и Модином на основе плотности состояний Тауца и осциллятора Лоренца [22]. Мнимая часть диэлектрической функции $\varepsilon_2(E)$ в данной модели может быть определена с использованием следующего уравнения в случае, когда энергия фотонов E больше оптической ширины запрещенной зоны:

$$\varepsilon_2(E)=T(E)L(E)=\frac{AE_0C\left(E-E_g^{\text{опт}}\right)^2}{\left(E^2-E_0^2\right)^2+C^2E^2}\frac{1}{E},\quad E>E_g^{\text{опт}}.$$

В случае, когда $E<E_g^{\text{опт}}$, $\varepsilon_2(E)=0$.

Модель Коди – Лоренца предложена в работе Ферлауто [23]. Особенностью использования при расчете данной модели является учет энергии Урбаха, характеризующей протяженность плотности локализованных состояний хвостов в щели подвижности аморфного полупроводника. Функциональная форма модели определяется системой из двух уравнений:

$$\varepsilon_2(E)=\frac{E_tG(E_t)L(E_t)}{E}\exp\left(\frac{E-E_t}{E_\mu}\right),\quad 0<E\le E_t,$$

$$\varepsilon_2(E)=G(E)L(E)=\left[\frac{\left(E-E_g^{\text{опт}}\right)^2}{\left(E-E_g^{\text{опт}}\right)^2+E_p^2}\right]\left[\frac{AE_0\Gamma E}{\left(E^2-E_0^2\right)^2+\Gamma^2E^2}\right],\quad E>E_t.$$

С помощью модели Коди – Лоренца можно получить семь параметров, в том числе энергию E_t, разделяющую преобладающий вклад поглощения на локализованных состояниях хвоста Урбаха при $0 < E < E_t$ и собственного поглощения, обусловленного межзонными переходами; энергию E_p, характеризующую переход от поглощения при $E < (E_p+E_g^{опт})$ к поглощению при $E > (E_p+E_g^{опт})$, которое описывается моделью Лоренца; энергию Урбаха E_μ.

На рис.5 представлены зависимости мнимой части диэлектрической функции от энергии фотона и пояснен принцип определения следующих параметров: оптической ширины запрещенной зоны $E_g^{опт}$; максимума интенсивности поглощения A; энергии, характеризующей пик плотности состояний E_0; коэффициента уширения пика C [24].

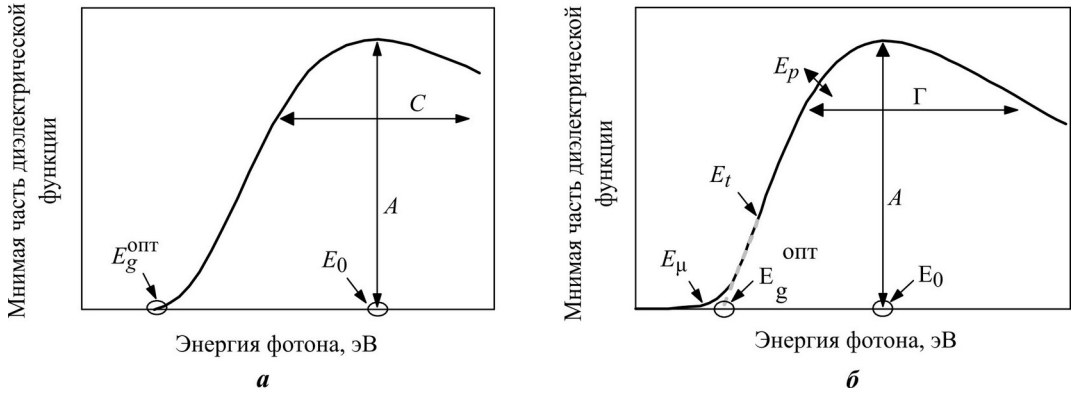


Рис.5. Схематические изображения принципа определения параметров моделей Тауца – Лоренца (*а*) и Коди – Лоренца (*б*)

Fig.5. Schematic representation of the determination of parameters for the Tauc – Lorentz (*a*) and Cody – Lorentz (*b*) models

Существенное влияние на результаты помимо математической модели оказывает слоевая модель образца. Наиболее простым случаем является применение двухслойной модели I, состоящей из Si^*-подложки и исследуемой тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$. Однако эта модель не учитывает прилегающие слои, например образующиеся на воздухе оксиды, а также принимает поверхность пленки идеально ровной. В связи с этим проведено сравнение нескольких слоевых моделей для оценки влияния отдельных слоев на результат моделирования. В модели II учитывается наличие на поверхности тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ слоя, характеризующего шероховатость. Данный слой задается как смесь воздуха и материала $Ge_2Sb_2Te_5$ в соотношении 1:1. В модели III поверхность пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ принимается идеально ровной, но при этом учитывается наличие естественного оксидного слоя кремния между пленкой $Ge_2Sb_2Te_5$ и Si^*-подложкой. Модель IV учитывает все перечисленные слои, а именно: Si^* / SiO_x / $Ge_2Sb_2Te_5$ / $Ge_2Sb_2Te_5$ и воздух (1:1).

С применением описанных слоевых моделей и модели Тауца – Лоренца получены зависимости, представленные на рис.6,*а*, и выходные параметры моделирования (табл.1).

На результаты моделирования оказывает существенное влияние слоевая модель, в особенности использование поверхностного слоя пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ с воздухом (1:1). Рассчитанные дисперсии оптических параметров можно условно разделить на две группы: учитывающие (модели I и III) и не учитывающие (модели II и IV) слой, отвечающий за шероховатость. Различие наблюдается как в дисперсиях оптических параметров, так и в выходных параметрах моделирования. Например, оптическая ширина запрещен-

ной зоны для пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ может отличаться более чем на 15 % (см. табл.1). Для проведения дальнейших расчетов выбрана модель IV, как наиболее близкая к результатам, полученным другими методами, например с помощью спектрофотометрии [12].

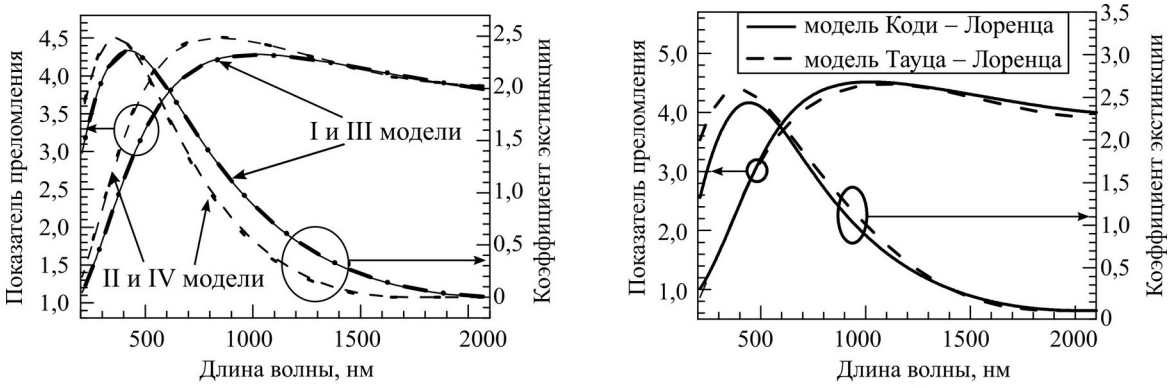


Рис.6. Зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от длины волны для слоевых (*а*) и математических (*б*) моделей

Fig.6. Dependences of refractive index and extinction coefficient on the wavelength for the different layer (*a*) and mathematical (*b*) models

Таблица 1

Сравнение выходных параметров для различных слоевых моделей

Table 1

Comparison of simulation output parameters obtained by different layer models

Модель	$E_g^{опт}$, эВ	A	C	E_0, эВ	h_1, нм	h_2, нм	h_3, нм	n_{1550}	k_{1550}
I	0,58	97,4	3,80	2,46	–	104,1	–	4,075	0,181
II	0,73	127,0	4,10	2,74	–	104,0	4,6	4,053	0,018
III	0,57	96,5	3,82	2,47	2,6	105,6	–	4,078	0,188
IV	0,71	120,6	2,64	3,95	3,0	106,5	3,5	4,049	0,031

Примечание: h_1, h_2 и h_3 – толщина слоев SiO_x, $Ge_2Sb_2Te_5$ и $Ge_2Sb_2Te_5$ с воздухом (1:1) соответственно; k_{1550} и n_{1550} – коэффициент экстинкции и показатель преломления, полученные для длины волны излучения 1550 нм.

Следует отметить, что наблюдается различие между значением толщины слоя $Ge_2Sb_2Te_5$ с воздухом (1:1), полученным в результате моделирования по данным эллипсометрии с применением модели IV, и значением шероховатости пленки, измеренным методом атомно-силовой микроскопии (менее 1 нм). Данный факт обусловлен применением различных по физической природе методов измерения, а также дополнительным вкладом в результаты моделирования естественного оксидного слоя на поверхности пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, толщина которого, согласно результатам вторичной ионной масс-спектрометрии [25] и спектроскопии низкоэнергетического ионного рассеяния [26], составляет ~ 5 нм.

На рис.6,*б* представлены результаты, полученные для исходных аморфных тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с применением моделей Тауца – Лоренца и Коди – Лоренца. Для показателя преломления значения практически совпадают, имеются небольшие расхождения вблизи пиковых значений и при больших длинах волн. Однако для коэффициента экстинкции наблюдается более существенное расхождение в значениях на длинах волн менее 500 нм. Модель Тауца – Лоренца показывает более линейное изменение коэффициента экстинкции в диапазоне 600–1300 нм. В табл.2 представлены выходные параметры моделирования с применением моделей Тауца – Лоренца и Коди – Лоренца для аморфного образца.

Таблица 2

Выходные параметры моделирования, полученные для аморфного образца

Table 2

The output parameters obtained for an amorphous sample

Модель	$E_g^{опт}$, эВ	A	C/Г	E_0, эВ	$E_μ$, мэВ	h_1, нм	h_2, нм	h_3, нм	n_{1550}	k_{1550}
Тауца – Лоренца	0,71	120,6	2,64	3,95	–	3,0	106,5	3,5	4,049	0,031
Коди – Лоренца	0,77	108,8	6,73	3,37	142,5	2,0	103,2	6,0	4,03	0,03

Несмотря на сходство спектров показателя преломления и коэффициента экстинкции, имеются существенные различия в выходных параметрах. Такое расхождение параметров также наблюдалось в работе [23]. Однако значения оптической ширины запрещенной зоны, полученные для модели Тауца – Лоренца, лучше соотносятся с литературными данными, а также результатами для аморфного образца, полученными методом спектрофотометрии [12]. В связи с этим для дальнейших исследований используется модель Тауца – Лоренца.

На рис.7 представлены спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции, полученные для образцов с разной температурой термообработки (см. рис.2). В табл.3 приведены выходные параметры моделирования для аморфного образца пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ и образцов, прошедших термообработку при различных температурах.

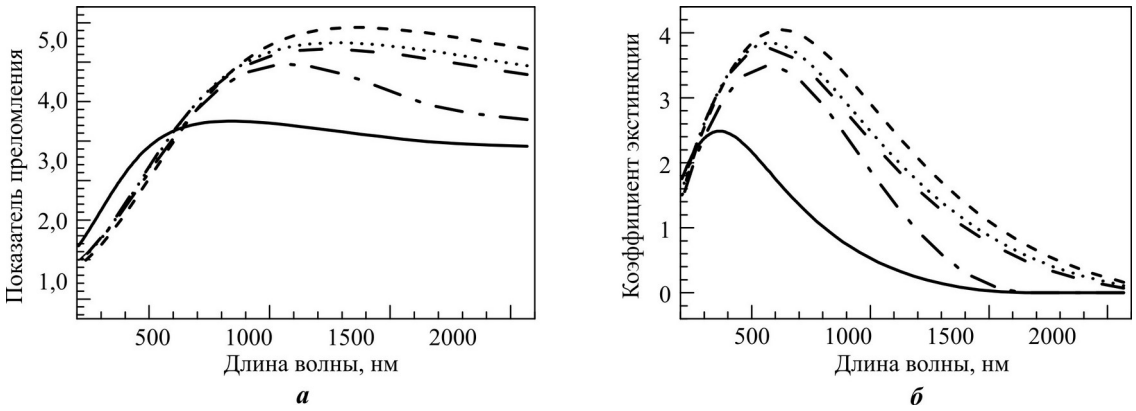


Рис.7. Спектры показателя преломления (*а*) и коэффициента экстинкции (*б*) для образцов пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с разной температурой термообработки: —— аморфный образец; — - 180 ºС; – – 192 ºС; ···· 200 ºС; - - - 250 ºС

Fig.7. Comparison of the spectra of refractive index (*a*) and extinction coefficient (*b*) for $Ge_2Sb_2Te_5$ film samples with different annealing temperature: —— amorphous sample; — - 180 ºС; – – 192 ºС; ···· 200 ºС; - - - 250 ºС

Анализ полученных данных показывает, что термообработка при температуре выше 180 °С приводит к существенному увеличению значений показателя преломления и коэффициента экстинкции, а также смещению пиковых значений в область больших длин волн. При дальнейшем повышении температуры термообработки значения также увеличиваются, однако не так резко. Отметим, что полученные спектры для аморфных и полностью закристаллизованных образцов имеют схожие тенденции изменения оптических параметров показателя преломления и коэффициента экстинкции со спектрами, представленными на рис.1. При этом с повышением температуры термообработки зафиксировано уменьшение толщины h_2 тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ с 106,5 до 98 нм (на 7,98%). Это может быть объясне-

но увеличением плотности материала при переходе из аморфного состояния (5,87 г·см^3) в кристаллическое состояние с кубической структурой типа NaCl (6,33 г·см^3) приблизительно на 7,27% [27].

Таблица 3

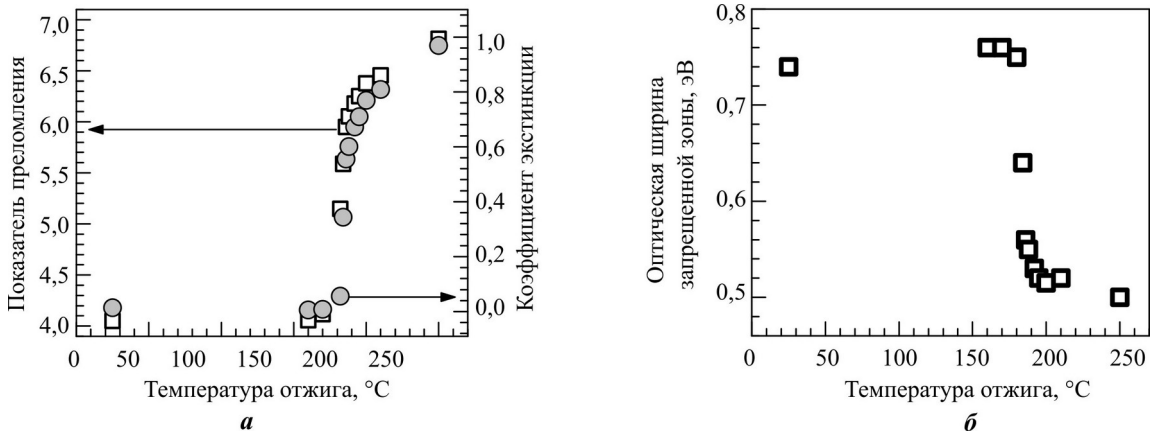
Выходные параметры моделирования, полученные для образцов после термообработки при разной температуре

Table 3

Simulation output parameters for the samples after annealing at different temperatures

T, °C	α	$E_g^{опт}$, эВ	A	E_0, эВ	C	h_1, нм	h_2, нм	h_3, нм
–	–	0,71	120,6	2,64	3,95	3,0	106,5	3,5
160	–	0,69	124,3	2,60	3,93	1,0	106,0	3,5
170	0	0,69	120,0	2,61	3,85	3,0	104,7	3,5
180	0,24	0,66	200,0	1,70	2,56	4,0	103,0	3,5
184	0,33	0,59	190,0	1,68	2,55	3,0	102,0	3,5
186	0,42	0,57	195,4	1,63	2,46	3,0	102,0	3,52
188	0,49	0,55	190,0	1,64	2,49	3,0	101,0	3,7
192	0,61	0,53	186,0	1,65	2,47	4,0	101,0	4,0
195	0,68	0,53	191,3	1,66	2,47	4,0	100,5	4,3
200	0,76	0,50	186,5	1,68	2,48	2,0	101,0	4,4
210	0,83	0,50	187,7	1,62	2,38	3,0	99,0	4,5
250	1,00	0,47	193,0	1,59	2,29	3,0	98,0	4,5

На рис.8 показано, как влияет температура термообработки на показатель преломления и коэффициент экстинкции тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ при телекоммуникационной длине волны, равной 1550 нм, а также на оптическую ширину запрещенной зоны.



а ***б***

Рис.8. Влияние температуры термообработки на показатель преломления, коэффициент экстинкции пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ на длине волны 1550 нм (*а*) и оптическую ширину запрещенной зоны (*б*)
Fig.8. Influence of annealing temperature on the refractive index, extinction coefficient of $Ge_2Sb_2Te_5$ films at a wavelength of 1550 nm (*a*) and optical band gap (*b*)

Из рис.8,*а* видно, что термообработка приводит к заметному увеличению показателя преломления и коэффициента экстинкции. При этом в диапазоне температур 170–200 °C наблюдается резкое изменение оптических параметров, что связано с кристаллизацией тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$. При термообработке выше 200 °C происходит дальнейшее увеличение значений, что может быть связано, в частности, с увеличением размера зерен поликристаллической структуры. На рис.8,*б* представлены результаты расчета оптической ширины запрещенной зоны. Диапазон фазового перехода соотно-

сится с зависимостями на рис.8,*а*. При этом уменьшение $E_g^{\text{опт}}$ с 0,71 до 0,47 эВ наблюдается при нагреве образца от комнатной температуры до 250 °С.

Рассчитана степень кристалличности α [28] и оценено ее влияние на оптические параметры тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$:

$$\alpha = \frac{\ln\sigma - \ln\sigma_a}{\ln\sigma_c - \ln\sigma_a},$$

где σ – проводимость исследуемой тонкой пленки; σ_a, σ_c – проводимость для 100 %-ного аморфного и 100 %-ного кристаллического состояния соответственно.

Для полностью аморфного состояния использовалась электропроводность при температуре начала фазового перехода, определенной по результатам измерения температурной зависимости удельного сопротивления с применением метода первой производной [29]. В качестве электрпроводности полностью закристаллизованного материала выбрана величина, полученная для тонкой пленки при 250 °С. В результате степень кристалличности α, т.е. доля закристаллизовавшегося материала, изменяется от 0 (100 %-ное аморфное состояние) до 1 (100 %-ное кристаллическое состояние). Зависимости оптических параметров от степени кристалличности представлены на рис.9.

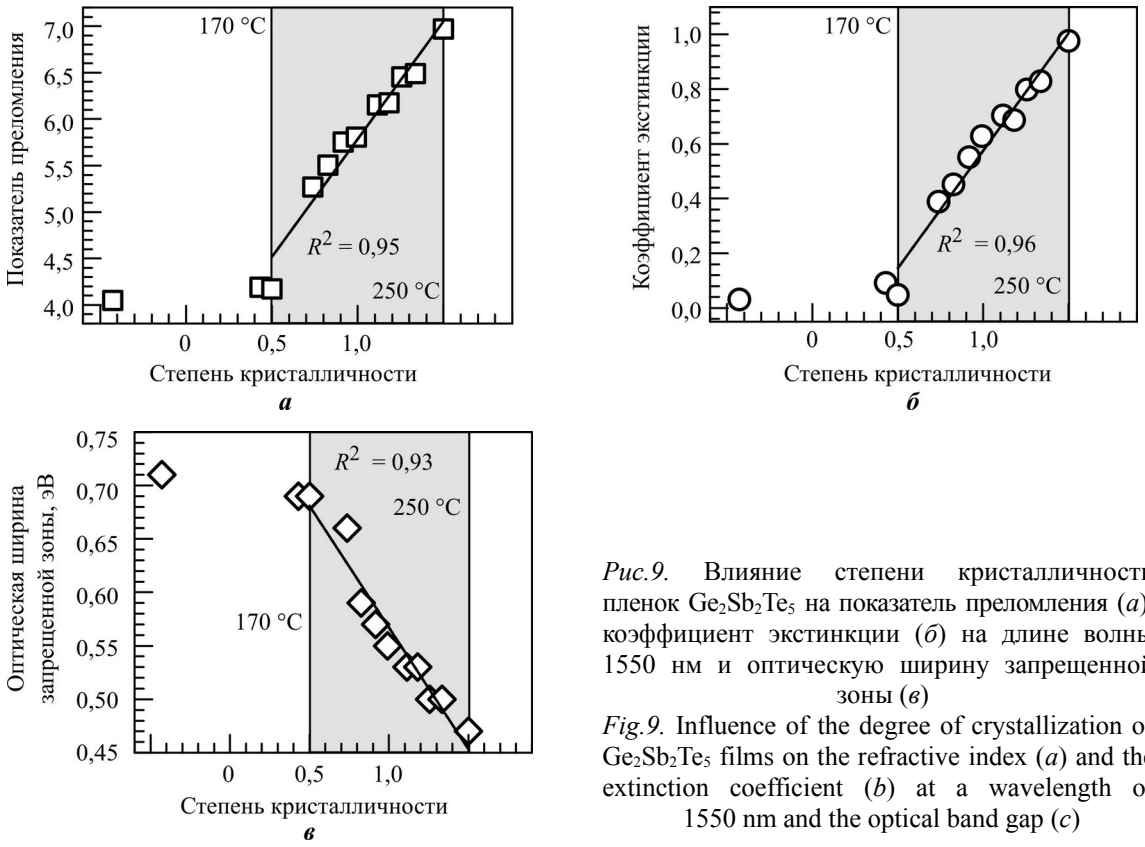


Рис.9. Влияние степени кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ на показатель преломления (*а*), коэффициент экстинкции (*б*) на длине волны 1550 нм и оптическую ширину запрещенной зоны (*в*)

Fig.9. Influence of the degree of crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ films on the refractive index (*a*) and the extinction coefficient (*b*) at a wavelength of 1550 nm and the optical band gap (*c*)

В пределах температурного диапазона кристаллизации слоя $Ge_2Sb_2Te_5$ от 170 до 250 °С зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от степени кристалличности близки к линейным. Данный результат коррелирует с зависимостью оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности, близкой к линейной. Полученные результаты показывают, что степень кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ влияет на их оптические свойства посредством изменения оптической ширины запре-

щенной зоны. Такая линейная взаимосвязь оптических свойств и степени кристалличности с учетом существенного изменения оптических свойств при фазовом переходе позволит надежно фиксировать промежуточные состояния в ячейках фазовой памяти.

Заключение. Исследование методом эллипсометрии оптических свойств тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$, подверженных термообработке при разной температуре, показало следующее.

На определяемые оптические параметры и дисперсию оказывает влияние применение разных слоевых и математических моделей. При фазовом переходе существенно увеличиваются значения показателя преломления и коэффициента экстинкции. Оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается с 0,71 до 0,47 эВ при переходе от аморфного состояния к кристаллическому. Зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ близки к линейным.

Литература

1. 3D Cross-point phase change memory for storage-class memory / ***H.-Yu Cheng, F. Carta, W.C. Chien et al.*** // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. No. 47. P. 473002-1–473002-89.
2. Intel and micron produce breakthrough memory technology: URL: https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/#gs.vjlolb (дата обращения 10.02.2020).
3. Isothermal and CW laser crystallization of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films / ***S. Kozyukhin, Yu. Vorobyov, P. Lazarenko et al.*** // Non-Crystalline Solids. 2018. Vol. 480. P. 51–56.
4. Electro-optical switch using $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material in a silicon MZI structure / ***H. Zhang, L. Zhou, L. Lu et al.*** // Conf. on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Optical Society of America. 2017. P. s1972.
5. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials / ***Z. Cheng, C. Rios, N. Youngblood et al.*** // Adv. Mater. 2018. Vol. 30. No. 32. P. 1802435-1–1802435-8.
6. Integrated 256 cell photonic phase-change memory with 512-bit capacity / ***J. Feldmann, N. Youngblood, X. Li et al.*** // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 1–7.
7. Toward fast neural computing using all-photonic phase change spiking neurons / ***I. Chakraborty, G. Saha, A. Sengupta et al.*** // Scientific reports. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 1–9.
8. Effect of heating rate on the activation energy for crystallization of amorphous $ge_2sb_2te_5$ thin film / ***Y. Choi, M. Jung, Y.-K. Leez*** // Electrochem. Solid-State Lett. 2009. Vol. 12. No. 7. P. 17–19.
9. Fast and reliable storage using a 5 bit, nonvolatile photonic memory cell / ***X. Li, N. Youngblood, C. Rios et al.*** // Optica. 2019. Vol. 6. No. 1. P. 1–6.
10. Structural transition and enhanced phase transition properties of Se doped $Ge_2Sb_2Te_5$ alloys / ***E.M. Vinod, K. Ramesh, K.S. Sangunni*** // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. P. 8050-1–8050-7.
11. Improved thermal and electrical properties of Al-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ films for phase-change random access memory / ***G. Wang, X. Shen, Q. Nie. et al.*** // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. No. 37. P. 375302-1–375302-6.
12. Особенности определения оптической ширины запрещенной зоны тонких пленок материалов фазовой памяти / ***П.И. Лазаренко, Ю.В. Воробьев, М.Е. Федянина и др.*** // Перспективные материалы. 2019. № 10. С. 14–25.
13. Optical constants acquisition and phase change properties of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films based on spectroscopy / ***Z. Xu, C. Chen, Z. Wang et al.*** // RSC Adv. 2018. Vol. 8. P. 21040–21046.
14. ***Redaelli An.*** Phase change memory. Device physics, reliability and applications. Springer, 2018. 342 p.
15. Effect of indium doping on $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films for phase-change optical storage / ***K.Wang, C. Steimer, D.Wamwangi et al.*** // Appl. Phys. A. 2005. Vol. 80. P. 1611–1616.
16. Ge-Sb-Te thin films deposited by pulsed laser: An ellipsometry and Raman scattering spectroscopy study / ***P. Nemec, A. Moreac, V. Nazabal et al.*** // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 103509-1–103509-7.
17. Thermo-optical effect in phase-change nanophotonics / ***Matthias Stegmaier, Carlos Rios, Harish Bhaskaran et al.*** // ACS Photonics. 2016. Vol. 3. P. 828−835.
18. Optical properties of (GeTe, Sb_2Te_3) pseudobinary thin films studied with spectroscopic ellipsometry / ***J.-W. Park, S.Ho Baek, T.D. Kang et al.*** / Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 021914-1–021914-3.

19. ***Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T.*** Phase-change materials for non-volatile photonic applications // Nature photonics. 2017. Vol 11. P. 465–476.

20. Mechanism of the isotermic amorphous-to-crystalline phase transition in Ge:Sb:Te ternary alloys / ***J. Gonzalez-Hernandez, E.F. Prokhorov, Yu.V. Vorobiev et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. Vol. 19. No. 4. P. 1623–1629.

21. ***Нгуен Х.Ф., Козюхин С.А., Певцов А.Б.*** Влияние висмута на оптические свойства тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 5. С. 597–603.

22. ***Jellison G.E., Modine F.A.*** Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 371–373.

23. Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics / ***A.S. Ferlauto, G.M. Ferreira, J.M. Pearce et al.*** // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 2424–2434.

24. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO_2 films using spectroscopic ellipsometry / ***M. Di, Er. Bersch, Al. C. Diebold et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. Vol. 29. P. 041001-1–041001-8.

25. Effect of tin ion implantation on the properties of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films / ***D.N. Seleznev, A.L. Sitnikov, A.V. Kozlov et al.*** // RUPAC. 2018. P. 230–232.

26. Oxygen incorporation into GST phase-change memory matrix / ***R. Golovchak, Y.G. Choi, S. Kozyukhin et al.*** // Applied Surface Science. 2015. Vol. 332. P. 533–541.

27. Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of $Ge_2Sb_2Te_5$ / ***K. Wang, D. Wamwangi, S. Ziegler et al.*** // Citation: Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 96. No. 10. P. 5557–5562.

28. ***Mehta N., Kumar A.*** Studies of crystallization kinetics in a-$Se_{80-x}Te_{20}Cd_x$ and a-$Se_{80-x}Te_{20}Ge_x$ alloys using D.C. conductivity measurements // J. Therm. Anal. Calorim. 2006. Vol. 83. No. 3. P. 669–673.

29. ***Muchira I.W., Njoroge W.K., Karimi P.M.*** Crystallization kinetics of $In_{40}Se_{60}$ thin films for phase change random access memory (PRAM) applications // Journal of Ovonic Research. 2015 Vol. 11. No. 3. P. 131–136.

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.; после доработки 14.02.2020 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Федянина Мария Евгеньевна – студентка Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), fedyanina.m@org.miet.ru

Лазаренко Петр Иванович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lpi@org.miet.ru

Воробьев Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Рязанского государственного радиотехнического университета (Россия, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59), vorobjov.y.v@rsreu.ru

Козюхин Сергей Александрович – доктор химических наук, профессор Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 31), sergkoz@igic.ras.ru

Дедкова Анна Александровна – ведущий инженер ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), my_name9999@mail.ru

Якубов Алексей Олегович – аспирант, младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alexsey007@mail.ru

Левицкий Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, специалист по измерениям ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике» (Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 28), v.levitskiy@hevelsolar.com

Сагунова Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sagunova@list.ru

Шерченков Алексей Анатольевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

References

1. Cheng H.-Yu, Carta, F., Chien W.C. et al. 3D cross-point phase change memory for storage-class memory. *J. Phys. D: Appl. Phys.,* 2019, vol. 52, no. 47, pp. 473002-1–473002-89.

2. Intel and Micron Produce Breakthrough Memory Technology: Available at: https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/#gs.vjlolb (accessed: 10.02.2020).

3. Kozyukhin S., Vorobyov Yu., Lazarenko P. et al. Isothermal and CW laser crystallization of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *Non-Crystalline Solids*, 2018, vol. 480, pp. 51–56.

4. Zhang H., Zhou L., Lu L. et al. Electro-optical switch using $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material in a silicon MZI structure. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. – Optical Society of America*, 2017, p. s1972.

5. Cheng Z., Rios C., Youngblood N. et al. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials. *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, no. 32, p. 1802435-1–1802435-8.

6. Feldmann J., Youngblood N., Li X. et al. Integrated 256 cell photonic phase-change memory with 512-bit capacity. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 1–7.

7. Chakraborty I., Saha G., Sengupta A. et al. Toward fast neural computing using all-photonic phase change spiking neurons. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–9.

8. Choi Y., Jung M., Leez Y.-K. Effect of heating rate on the activation energy for crystallization of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2009, vol. 12, no. 7, pp. 17–19.

9. Li X., Youngblood N., Rios C. et al. Fast and reliable storage using a 5 bit, nonvolatile photonic memory cell. *Optica,* 2019, vol. 6, no. 1, pp. 1–6.

10. Vinod E.M., Ramesh K., Sangunni K.S. Structural transition and enhanced phase transition properties of Se doped $Ge_2Sb_2Te_5$ alloys. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, p. 8050-1–8050-7.

11. Wang G., Shen X., Nie Q. et al. Improved thermal and electrical properties of Al-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ films for phase-change random access memory. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45, no. 37, p. 375302-1–375302-6.

12. Lazarenko P.I., Vorobiev Yu.V., Fedyanina M.E. et al. Peculiarities of estimating the optical band gap of thin films of phase change memory materials. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 330–337.

13. Xu Z., Chen C., Wang Z. et al. Optical constants acquisition and phase change properties of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films based on spectroscopy. *RSC Adv*., 2018, vol. 8,pp. 21040–21046.

14. Redaelli An. *Phase change memory. Device physics, reliability and applications.*Springer, 2018. 342 p.

15. Wang K., Steimer C., Wamwangi D. et al Effect of indium doping on $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films for phase-change optical storage. *Appl. Phys. A*, 2005, vol. 80, pp. 1611–1616.

16. Nemec P., Moreac A., Nazabal V. et al. Ge–Sb–Te thin films deposited by pulsed laser: An ellipsometry and Raman scattering spectroscopy study. *J. Appl. Phys.,* 2009, vol. 106, p. 103509-1–103509-7.

17. Matthias Stegmaier, Carlos Rios, Harish Bhaskaran et el. Thermo-optical effect in phase-change nanophotonics. *ACS Photonics*, 2016, vol. 3, pp.828−835.

18. Park J.-W., Ho Baek S., Kang T.D. et al. Optical properties of (GeTe, Sb_2Te_3) pseudobinary thin films studied with spectroscopic ellipsometry. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, p. 021914-1–021914-3.

19. Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications. *Nature photonics*, 2017, vol. 11, pp. 465–476.

20. Gonzalez-Hernandez J., Prokhorov E.F., Vorobiev Yu.V. et al. Mechanism of the isotermic amorphous-to-crystalline phase transition in Ge:Sb:Te ternary alloys. J. *Vac. Sci. Technol. A,* 2001, vol. 19, no. 4, pp. 1623–1629.

21. Nguyen X.F., Kozyukhin S.A., Pevtsov A.B. The effect of bismuth on the optical properties of thin films $Ge_2Sb_2Te_5$. *Physics and technology of semiconductors*, 2014, vol. 48, no 5, pp. 597–603. (In Russian).

22. Jellison G.E., Modine F.A. Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, pp. 371–373.

23. Ferlauto A.S., Ferreira G.M., Pearce J.M. et al. Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics. *J. Appl. Phys.,* 2002, vol. 92, pp. 2424–2434.

24. Di M., Bersch Er., Diebold Al.C. et al. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO_2 films using spectroscopic ellipsometry. *J. Vac. Sci. Technol. A,* 2011, vol. 29, p. 041001-1–041001-8.

25. Seleznev D.N., Sitnikov A.L., Kozlov A.V. et al. Effect of tin ion implantation on the properties of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *RUPAC*, 2018, pp. 230–232.

26. Golovchak R., Choi Y.G., Kozyukhin S. et al. Oxygen incorporation into GST phase-change memory matrix. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 332, pp. 533–541.

27. Wang K., Wamwangi D., Ziegler S. et al. Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of $Ge_2Sb_2Te_5$. *J. Appl. Phys.,* 2004, vol. 96, no. 10, pp. 5557–5562.

28. Mehta N., Kumar A. Studies of crystallization kinetics in *a*-$Se_{80-x}Te_{20}Cd_x$ and *a*-$Se_{80-x}Te_{20}Ge_x$ alloys using D.C. conductivity measurements. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006, vol. 83, no. 3, pp. 669–673.

29. Muchira I.W., Njoroge W.K., Karimi P.M. Crystallization kinetics of $In_{40}Se_{60}$ thin films for phase change random access memory (PRAM) applications. *Journal of Ovonic Research*, 2015, vol. 11, no 3, pp. 131–136.

Received 14.02.2020; Revised 14.02.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Mariya E. Fedyanina – Student of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), fedyanina.m@org.miet.ru.

Petr I. Lazarenko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lpi@org.miet.ru

Yuri V. Vorobyov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ryazan State Radio Engineering University (Russia, 390005, Ryazan, Gagarin st., 59), vorobjov.y.v@rsreu.ru

Sergey A. Kozyukhin **–** Dr. Sci. (Chem.), Prof., Kurnakov Insitute of General and Inorganic Chemistryof Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky pr., 31), sergkoz@igic.ras.ru

Anna A. Dedkova – Lead Engineer, National Research University of Electronic Technology Core facilities center «MEMS and electronic components» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solar Alley, 6), my_name9999@mail.ru

Aleksey O. Yakubov – PhD Student, Junior Researcher of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alexsey007@mail.ru

Vladimir S. Levitskii – Cand. Sci. (Eng.), Measurement Specialist, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics (Russia, 194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 28), v.levitskiy@hevelsolar.com

Irina V. Sagunova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sagunova@list.ru

Aleksey A. Sherchenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 681.518.3 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-219-233

Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления нитрид-галлиевых HEMT-транзисторов

В.И. Смирнов[1,2], В.А. Сергеев[1,2], А.А. Гавриков[1], А.А. Куликов[1]

[1]Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия
[2]Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Мощность HEMT-транзисторов на подложке из кремния достигает 100 Вт, на подложках из карбида кремния – 1,5 кВт. Это предъявляет высокие требования к качеству отвода тепла от активной области кристалла к корпусу и далее в окружающую среду. В работе представлены результаты измерений теплового сопротивления переход–корпус нитрид-галлиевых HEMT-транзисторов. Измерения проведены с помощью аппаратно-программного комплекса, в котором реализованы два метода измерения теплового сопротивления. В первом методе согласно ОСТ 11 0944-96 через канал транзистора пропущена серия импульсов греющего тока и измерена температура канала в паузах между импульсами. Во втором методе использована модуляция рассеиваемой в транзисторе мощности и измерен отклик на это воздействие – переменная составляющая температуры перехода. Для исключения влияния длительности греющих импульсов на результаты измерений, характерного для стандартного метода, предварительно измерена переходная характеристика теплового импеданса, анализ которой позволил определить оптимальные значения длительности импульсов. Для уменьшения влияния времени задержки, обусловленной переходными электрическими процессами при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения температурочувствительного параметра, проведена экстраполяция сигнала данного параметра к моменту окончания греющего импульса. Сравнительный анализ показал, что результаты измерений, полученные стандартным и модуляционным методами, отличаются друг от друга менее чем на 2 %. Определено влияние амплитуды импульсов греющего тока на тепловое сопротивление. Установлено, что с ростом греющего тока измеренные значения теплового сопротивления увеличиваются. Это указывает на нелинейный характер зависимости температуры в канале транзистора от рассеиваемой в нем мощности.

© В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков, А.А. Куликов, 2020

Ключевые слова: HEMT-транзистор; тепловое сопротивление; измерение; модуляционный метод; переходная характеристика

Для цитирования: Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов А.А. Сравнительный анализ методов измерения теплового сопротивления нитрид-галлиевых HEMT-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 219–233. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-219-233

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Ульяновской области (проект № 18-47-730024).

Comparative Analysis of Methods for Measuring Thermal Resistance of Gallium Nitride HEMT-Transistors

V.I. Smirnov[1,2], V.A. Sergeev[1,2], A.A. Gavrikov[1], A.A. Kulikov[1]

[1]Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia
[2]Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

sva@ulstu.ru

Abstract: The power of the HEMT-transistors on the substrate from silicon achieves 100 W, on the substrate from silicon carbide – 1.5 kW. This presents high requirements to the quality of heat removal from the crystal active region to case and further to the environment. In the paper the thermal resistance "junction-to-case" the measurement results for GaN HEMT-transistors have been presented. The measurements have been performed using the apparatus, which includes two methods of thermal resistance measurements. In the first method – according to the standard OCT 11 0944-96, a sequence of heating current pulses is passing through the transistor channel and the junction temperature is measured. In the second method the modulated heating power has been used and the response – variable component of the junction temperature has been measured. To exclude the influence of the heating pulses duration, that is typical for the standard method, preliminary measurements of the transient response of the thermal impedance have been performed. To reduce the influence of the delay time, caused by transient electrical processes in the transistor when it switches from the heating mode to the measurement of the thermal sensitive parameter (TSP) mode, an extrapolation of the TSP signal of this parameter has been performed by the end of the heating pulse. The comparative analysis has shown that the measurements results, obtained by the standard and modulation methods differ by less than 2%. The influence of the amplitude of pulses of the heating current heating pulses has been shown. It has been determined that with increasing the heating current the thermal resistance measured values increases, which indicates to the nonlinear nature of the dependence of the temperature in the transistor channel on the power dissipated in it.

Keywords: HEMT-transistor; thermal resistance; measurement; modulation method; transient characteristic

For citation: Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Kulikov A.A. Comparative analysis of methods for measuring thermal resistance of gallium nitride HEMT-transistors. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 219–233. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-219-233

Funding: the work has been carried out within the framework of the state task and partially has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-47-730024).

Введение. Нитрид-галлиевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor, HEMT) широко применяются в силовой и СВЧ-электронике (мобильная и космическая связь, локация, транспорт, DC/DC-преобразователи и др.). Большая ширина запрещенной зоны нитрида галлия GaN (3,4 эВ) обеспечивает высокую стабильность работы HEMT-транзисторов при изменении температуры или воздействии радиации. Расчеты показывают, что такие транзисторы должны сохранять работоспособность при температурах до 500 °С [1]. Высокая критическая напряженность поля GaN (3,3 МВ/см) дает возможность увеличить плотность мощности при высоких рабочих частотах. Сочетание высокой подвижности и большой концентрации носителей в канале делают HEMT-транзисторы на основе GaN уникальными по своим мощностным и частотным свойствам. В настоящее время имеются образцы HEMT-транзисторов, работающих на частотах до 300 ГГц и имеющих удельную выходную мощность на единицу ширины затвора 40 Вт/мм [2].

Структура нитрид-галлиевого HEMT-транзистора. Структура HEMT-транзистора на основе GaN и схема его монтажа представлены на рис.1 [3]. Активной областью транзистора является гетеропереход GaN–AlGaN, в области которого из-за различия ширины запрещенной зоны образуется потенциальная яма для электронов. Кристаллы GaN и AlGaN имеют полярную природу, поэтому в процессе роста на их границе происходит спонтанная поляризация с образованием поверхностных зарядов. Из-за рассогласования кристаллических решеток GaN и AlGaN в области гетероперехода возникают тангенциальные механические напряжения, вызывающие в результате эффекта поляризации появление дополнительных поляризационных зарядов. Вследствие этого в потенциальной яме образуется заряд электронов высокой плотности – двумерный электронный газ, который и является каналом HEMT-транзистора. Высокая подвижность электронов в канале обеспечивается совершенством кристаллической решетки слоя GaN и отсутствием в нем примесных атомов. Тонкий вышележащий слой *i*-AlGaN (спейсер) предназначен для увеличения разрыва зон в области гетероперехода, что уменьшает вероятность перехода электронов из канала в слой AlGaN. Высокая концентрация и

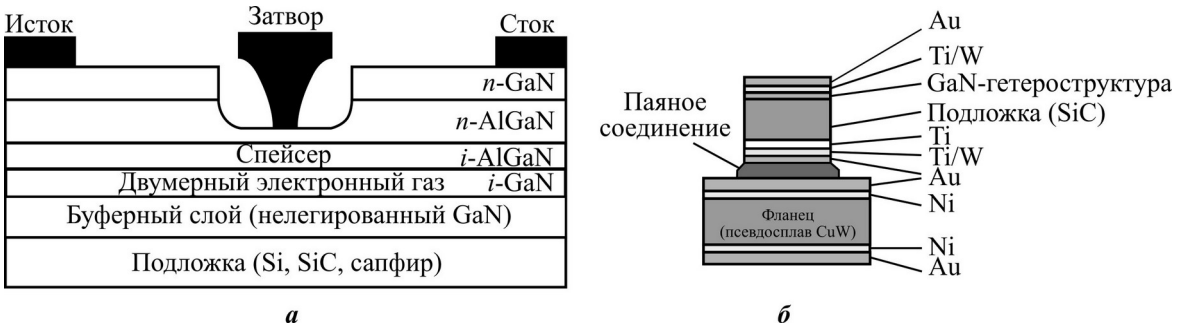


Рис.1. Структура HEMT-транзистора (*а*) и схема его монтажа в корпус (*б*) [3]
Fig.1. The structure of the HEMT transistor (*a*) and the scheme of its installation in the case (*b*) [3]

подвижность электронов позволяют достичь существенного снижения сопротивления канала R_{DS}. По сравнению с кремниевыми МДП-транзисторами в транзисторах на основе GaN может быть достигнуто снижение R_{DS} более чем на порядок в диапазоне напряжений пробоя 100–300 В [4].

Вся структура HEMT-транзистора выращивается на подложке, в качестве которой используются кремний, сапфир и карбид кремния. В последние годы активно ведутся работы по изготовлению HEMT-транзисторов со структурой GaN на подложке из алмаза [5]. По совокупности параметров подложки из кремния наиболее технологичны: они доступны, дешевы, характеризуются достаточно высокой теплопроводностью, не ограничены по диаметру пластин и легко обрабатываются. Но на кремниевых подложках сложно выращивать качественные эпитаксиальные слои GaN из-за большого различия параметров кристаллических решеток GaN и Si, а также их коэффициентов теплового расширения. Для решения проблемы буферный слой формируется между подложкой и слоем *i*-GaN, что обеспечивает плавный переход от подложки к совершенной структуре канала. Иногда буферный слой состоит из нескольких различных слоев, в частности из AlN и AlGaN. Рассогласование кристаллических решеток сапфира и нитрида галлия также велико, к тому же сапфир характеризуется невысокой теплопроводностью и может использоваться только при изготовлении маломощных транзисторов. Наиболее предпочтительным с точки зрения теплопроводности и параметров кристаллической решетки является карбид кремния, однако он имеет высокую стоимость.

Мощность HEMT-транзисторов на подложке из кремния достигает 100 Вт, на подложках из карбида кремния – 1,5 кВт. Это предъявляет высокие требования к качеству отвода тепла от активной области кристалла (канала транзистора) к корпусу и далее в окружающую среду. Качество теплоотвода любого полупроводникового прибора, включая HEMT-транзисторы, характеризуется тепловым сопротивлением переход – корпус:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{I_{\text{гр}} U_{\text{СИ}}}, \qquad (1)$$

где T_j – температура электронно-дырочного перехода транзистора; T_c – фиксированная температура корпуса объекта; P – мощность, рассеиваемая в объекте; $I_{\text{гр}}$ – греющий ток в канале транзистора (ток стока); $U_{\text{СИ}}$ – напряжение между стоком и истоком транзистора.

Температура перехода T_j определяется косвенным способом на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), который линейно зависит от температуры перехода. Для диодов в качестве ТЧП используется прямое падение напряжения на *p–n*-переходе при протекании через него малого измерительного тока $I_{\text{изм}}$ [6], для биполярных транзисторов – напряжение база–эмиттер [6], для мощных MOSFET-транзисторов – сопротивление канала или напряжение на антипараллельном диоде [7], для IGBT-транзисторов – напряжение коллектор–эмиттер [8]. Для HEMT-транзисторов стандарты пока не разработаны, но в работе [9] предлагается использовать в качестве ТЧП прямое напряжение затвор–исток, а в работе [10] – напряжение сток–исток.

Цель настоящей работы – измерение теплового сопротивления переход–корпус нитрид-галлиевого HEMT-транзистора разными методами и сравнение полученных результатов.

Методы измерения теплового сопротивления. Существует большое количество методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов, описанных как в отечественных, так и в зарубежных стандартах. В наиболее простом методе [6]

для повышения точности измерений через образец пропускается серия импульсов греющего тока и для каждого из них измеряется приращение температуры перехода ΔT_j, вызванное рассеиванием в приборе греющей мощности P, с последующим усреднением результатов измерения R_{Tjc}. Тепловое сопротивление определяется по формуле (1). Метод характеризуется невысокой точностью, что обусловлено несколькими причинами. Во-первых, не определена длительность импульса греющего тока. Она должна в 3–5 раз превышать тепловую постоянную времени переход – корпус. Методика определения данного параметра в [6] не представлена. Во-вторых, на результат измерения R_{Tjc} большое влияние оказывают переходные электрические процессы, связанные с рассасыванием неосновных носителей заряда после переключения образца из режима нагрева в режим измерения ТЧП. После окончания импульса греющего тока измерение ТЧП требуется проводить с некоторой временной задержкой, которая для различных объектов измерения разная. Данная проблема может быть решена с помощью экстраполяции сигнала ТЧП к моменту окончания импульса греющего тока, но для этого требуется знать характер зависимости ТЧП от времени после окончания импульса.

Производители электронной компонентной базы, например International Rectifier, Infineon, Fairchild, STMicroelectronics и др., для измерения теплового сопротивления выпускаемой продукции активно используют метод [11], основанный на анализе переходной тепловой характеристики. Для этого через объект пропускается последовательность импульсов греющего тока с изменяющейся по логарифмическому закону длительностью. Далее для каждого импульса вычисляется тепловой импеданс Z_T, определяемый отношением разности температур перехода T_j и начальной температуры $T_j(t = 0)$ к мощности рассеивания P. Анализ временных зависимостей теплового импеданса $Z_T(t)$, полученных при различных коэффициентах заполнения импульсов греющего тока, позволяет определить тепловое сопротивление переход – корпус.

В зарубежных стандартах широко представлены методы измерения теплового сопротивления, основанные на анализе кривой нагрева $T_j(t)$ с использованием аппарата структурных функций [12]. Через объект пропускается последовательность импульсов греющего тока с изменяющейся по логарифмическому закону длительностью до выхода объекта в стационарный тепловой режим. После каждого импульса измеряется изменение температуры перехода $T_j(t)$ относительно начальной температуры $T_j(t=0)$. Анализ переходной характеристики $T_j(t)$ основан на вычислении кумулятивной или дифференциальной структурной функции [13]. Кумулятивная структурная функция представляет собой временную зависимость суммарной теплоемкости $C_{T\Sigma}$ от суммарного теплового сопротивления $R_{T\Sigma}$, которые определяются следующими выражениями:

$$C_{T\Sigma}=\frac{Pt}{T_j(t)-T_j(t=0)}, \quad R_{T\Sigma}=\frac{T_j(t)-T_j(t=0)}{P}.$$

Функция $C_{T\Sigma}(R_{T\Sigma})$ имеет сложную структуру с пологими участками, соответствующими элементам конструкции объекта с высокой теплопроводностью, а также участками с резким ростом, которые соответствуют элементам конструкции с низкой теплопроводностью. Для выявления этих особенностей используется дифференцирование зависимости $C_{T\Sigma}(R_{T\Sigma})$ и вычисляется дифференциальная структурная функция $K(R_{T\Sigma})$:

$$K(R_{T\Sigma})=\frac{dC_{T\Sigma}}{dR_{T\Sigma}}.$$

Структурная функция позволяет определить вклад отдельных элементов структуры и конструкции объекта в общее тепловое сопротивление. Данный метод измерения теплового сопротивления реализован, в частности, в измерительном комплексе T3Ster – Thermal Transient Tester [14].

Другим методом измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов является модуляционный метод [15]. Суть метода заключается в нагреве объекта модулированной по гармоническому закону мощностью и измерении колебаний температуры перехода T_j. Для этого через объект пропускаются импульсы греющего тока амплитудой $I_{гр}$, частота следования $t_{имп}$ которых постоянна, а длительность $\tau(t)$ модулируется по гармоническому закону:

$$\tau(t) = \tau_{ср} (1+a\sin 2\pi\nu t),$$

где $\tau_{ср}$ – средняя длительность импульсов; a – коэффициент модуляции; ν – частота модуляции.

Протекание импульсов тока через p–n-переход вызывает рассеяние в нем тепловой мощности. Среднее значение мощности $P(t)$ за период следования изменяется также по гармоническому закону:

$$P(t)=I_{гр}U_{гр}\frac{\tau(t)}{t_{имп}}=I_{гр}U_{гр}\frac{\tau_{ср}}{t_{имп}}(1+a\sin 2\pi\nu t)=P_0+P_1\sin 2\pi\nu t,$$

где $U_{гр}$ – напряжение на вершине греющих импульсов; P_0 – постоянная составляющая греющей мощности; P_1 – амплитуда переменной составляющей греющей мощности ($P_1 < P_0$).

Изменение по гармоническому закону рассеиваемой мощности $P(t)$ вызывает изменения температуры p–n-перехода $T_j(t)$, которая, как и мощность, изменяется по гармоническому закону, но со сдвигом фазы:

$$T_j(t)=T_{j0}+T_{j1}\sin(2\pi\nu t-\varphi),$$

где T_{j0} – постоянная составляющая температуры перехода; T_{j1} – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции ν; φ – сдвиг фаз между переменными составляющими температуры перехода и греющей мощности.

У измеренной зависимости $T_j(t)$ с помощью преобразования Фурье вычисляется спектр, осуществляются его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости с помощью обратного фурье-преобразования. Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода T_{j1} и мощности P_1 определяет модуль $Z_T(\nu)$ теплового импеданса на частоте модуляции ν, а отношение мнимой $\mathrm{Im}\,T_{j1}$ и вещественной $\mathrm{Re}\,T_{j1}$ фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы $\varphi(\nu)$ теплового импеданса:

$$Z_T=\frac{T_{j1}}{P_1},\quad \varphi=\mathrm{arctg}\frac{\mathrm{Im}\,T_{j1}}{\mathrm{Re}\,T_{j1}}. \qquad (2)$$

Модуляционный метод также основан на анализе переходной тепловой характеристики и позволяет определять компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток от активной области к корпусу прибора и далее в окружающую среду. Для этого проводятся измерение частотной зависимости вещественной части $\mathrm{Re}\,Z_T(\nu)$ теплового импеданса и ее анализ. Цель анализа заключается в выявлении пологих участков или точек перегиба зависимости $\mathrm{Re}\,Z_T(\nu)$, которые связаны с той или иной компонентой теплового сопротивления объекта измерения [16].

Измеритель теплового сопротивления. Тепловое сопротивление измеряется с помощью автоматизированного комплекса [17], в котором реализованы методы согласно ОСТ 11 0944-96, а также модуляционный метод. В состав комплекса входят импульсный характериограф полупроводниковых приборов, компьютер и специализированное программное обеспечение. Работой характериографа управляет микроконтроллер, который, получив из компьютера значения параметров измерения, формирует модулированные по длительности импульсы греющего тока заданной амплитуды, периода следования и частоты модуляции; измеряет напряжения на вершине импульсов и в паузах между ними; измеряет ВАХ; проверяет нештатные ситуации; передает результаты измерений в компьютер для последующей обработки.

Специализированная управляющая программа обеспечивает решение следующих задач:

- формирование и передача в измеритель информационного пакета данных с параметрами измерения (амплитуды и периода следования импульсов греющего тока, частоты модуляции и ряда других параметров, определяющих режимы измерения);
- вычисление модуля и фазы теплового импеданса и их зависимостей от частоты модуляции греющей мощности, что позволяет определять компоненты теплового сопротивления;
- обработка результатов измерения переходной характеристики и определение теплового сопротивления согласно ОСТ 11 0944-96;
- проведение испытаний однотипных объектов и их отбраковка по величине теплового сопротивления;
- отображение результатов измерения и их обработка в текстовом и графическом виде, навигация по базе данных и другие сервисные функции.

Объект исследования – *n*-канальный нитрид-галлиевый HEMT-транзистор CGH40025F производства компании Cree. Основные характеристики транзистора: максимальный ток стока 5,4 А; выходная мощность 30 Вт; частотный диапазон до 4 ГГц; максимальная температура перехода 175 ^{0}C; максимальное тепловое сопротивление переход–корпус 3,8 К/Вт. В качестве ТЧП использовано падение напряжения $U_{ЗИ}$ между затвором и истоком при прямом токе затвора 3 мА. Для определения температурного коэффициента напряжения измерена зависимость $U_{ЗИ}$ от температуры T, которая имеет линейный характер. Значение температурного коэффициента напряжения, полученное методом наименьших квадратов, равно 2,88 мВ/К.

Тепловое сопротивление переход–корпус нитрид-галлиевого HEMT-транзистора измерено стандартным и модуляционным методами. Результаты измерений сравнивали между собой. Определено влияние силы греющего тока на результаты измерения теплового сопротивления HEMT-транзисторов.

Измерения теплового сопротивления стандартным методом. Согласно ОСТ 11 0944-96 [6] измерение теплового сопротивления полупроводниковых приборов стандартным методом осуществляется путем разогрева объекта серией импульсов тока и измерения температуры перехода до и после каждого греющего импульса. Существенное влияние на точность результатов измерений оказывает длительность греющих импульсов, которая должна в 3–5 раз превышать тепловую постоянную времени переход – корпус. В этом случае температура канала транзистора в конце каждого импульса достигает стационарного значения, при этом температура корпуса в процессе измерений остается практически неизменной. Для определения длительности импульсов греющего тока, соответствующих данному условию, проведены измерения переходной характеристики HEMT-транзистора (рис.2). Амплитуда импульсов греющего тока равна 5 А, длительность импульсов меняется от 1 до 1000 мс с равномерным по логарифмической шкале шагом (50 импульсов за декаду).

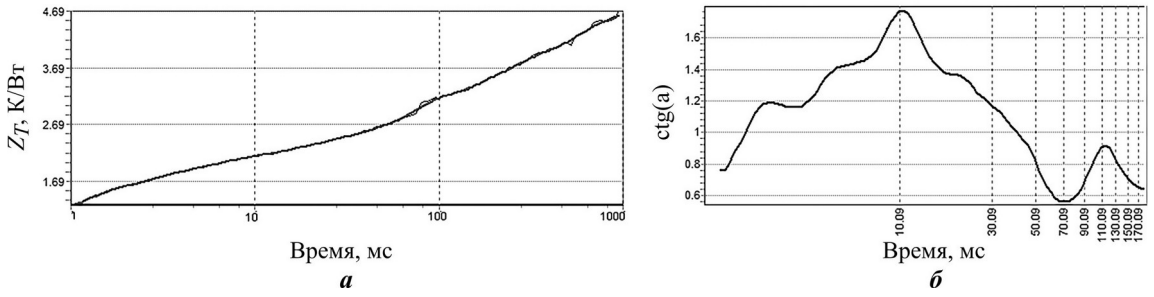


Рис.2. Результаты измерения переходной характеристики HEMT-транзистора CGH40025F: *а*, *б* – временные зависимости теплового импеданса $Z_T(t)$ и $(dZ_T/dt)^{-1}$ соответственно
Fig.2. Measurement results of the transient characteristic of the HEMT transistor CGH40025F: *a* – time dependence of thermal impedance $Z_T(t)$; *b* – time dependency $(dZ_T/dt)^{-1}$

На рис.2,*а* представлены результаты измерения временной зависимости теплового импеданса $Z_T(t)$. Видно, что на графике $Z_T(t)$ имеется относительно пологий участок, который соответствует тепловому сопротивлению переход – корпус объекта измерения. Для определения длительности импульса, при которой возникает пологий участок, проведено вычисление $(dZ_T/dt)^{-1}$, результат которого представлен на рис.2,*б*. Положение максимума графика на рис.2,*б* соответствует точке перегиба функции $Z_T(t)$. Таким образом, для измерения теплового сопротивления HEMT-транзистора CGH40025F стандартным методом длительность импульсов должна быть равна 10 мс.

Формы импульсов напряжения затвор – исток при измерении теплового сопротивления HEMT-транзистора CGH40025F представлены на рис.3. Длительность импульсов греющего тока составляет 10 мс, что следует из анализа переходной характеристики (см. рис.2,*б*). По оси ординат указаны измеренные значения ТЧП – напряжения затвор–исток транзистора при токе затвора 3 мА, по оси абсцисс – номера измерений. Перед каждым импульсом проведено десять измерений ТЧП с минимальным временем преобразования аналого-цифрового преобразователя, равным 13 мкс. Затем проведено десять измерений на вершине греющих импульсов, при этом пауза между измерениями определялась длительностью импульсов. По окончании каждого импульса 130 раз измерен ТЧП с периодичностью 13 мкс.

Особенность определения теплового сопротивления с импульсным нагревом объекта заключается в том, что измерение ТЧП необходимо проводить с некоторой временной задержкой после окончания греющего импульса. Это связано с влиянием процессов рассасывания неосновных носителей заряда при переключении объекта из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Для разных объектов значения временной задержки различны. Для того чтобы исключить влияние времени задержки на результат измерения теплового сопротивления проведена экстраполяция сигнала ТЧП к моменту окончания импульса греющего тока. При этом зависимость ТЧП от времени принимается корневой, что соответствует рекомендациям, изложенным в работах [6, 12]. На вставке рис.3 приведена временна́я зависимость ТЧП. Анализ данной зависимости показал, что за исключением временно́го интервала непосредственно после окончания импульса греющего тока зависимость ТЧП от времени является корневой. Тепловое сопротивление переход – корпус, рассчитанное по формуле (1) с учетом экстраполяции сигнала ТЧП, равно 2,30 К/Вт.

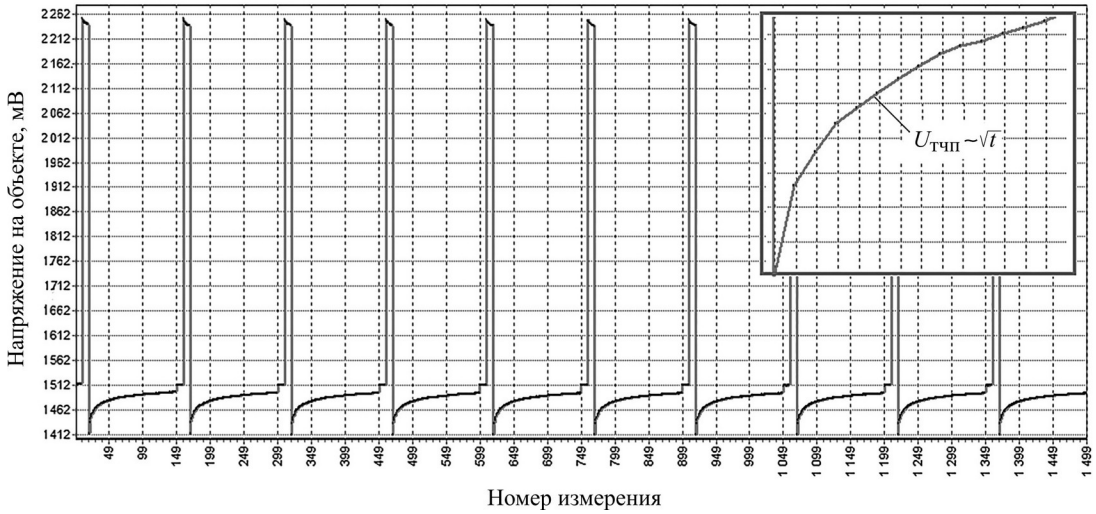


Рис.3. Формы импульсов напряжения затвор – исток при измерении теплового сопротивления HEMT-транзистора CGH40025F стандартным методом (на вставке – временная зависимость ТЧП после окончания греющего импульса)

Fig.3. Forms of voltage pulses gate – source when measuring thermal resistance of the HEMT transistor CGH40025F standard method (insert shows time dependence of TSP after heating pulse termination)

Измерения теплового сопротивления модуляционным методом. В данном случае HEMT-транзистор нагревается последовательностью импульсов тока, которые пропускаются от стока к истоку транзистора при токе затвора 3 мА. Амплитуда импульсов и период следования поддерживаются постоянными, а длительность изменялась по гармоническому закону. Температура канала T_j, как и в стандартном методе, измерена в паузах между греющими импульсами с временной задержкой относительно окончания каждого импульса, равной 20 мкс. На рис.4 представлены временные зависимости длительности импульсов греющего тока и переменной составляющей температуры перехода кристалла. Амплитуда импульсов равна 5 А, период следования импульсов – 100 мкс, частота модуляции греющей мощности – 25 Гц. Значения модуля Z_T и фазы φ теплового импеданса, вычисленные согласно формулам (2), равны 1,93 К/Вт и 15° соответственно.

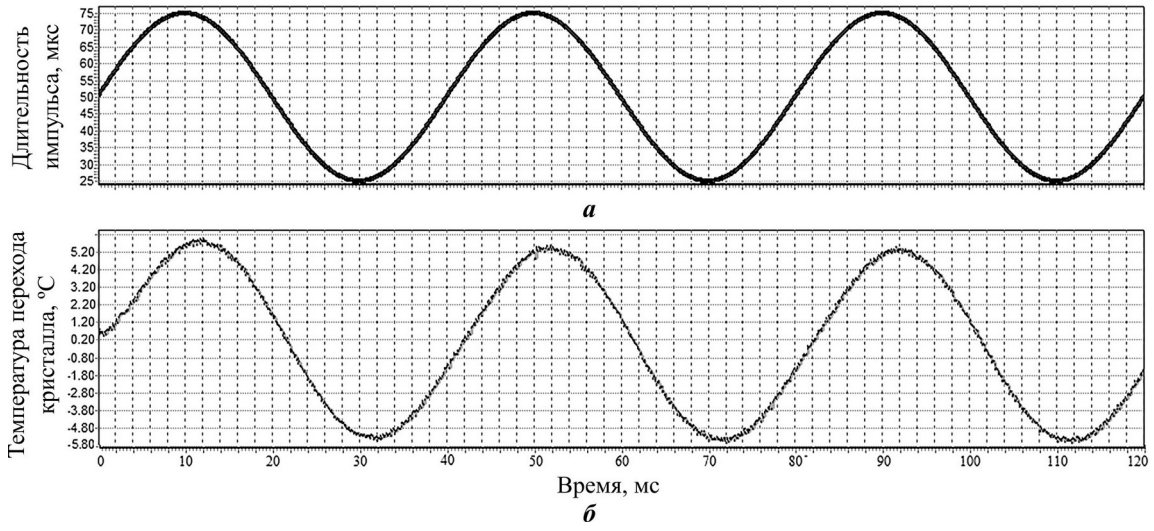
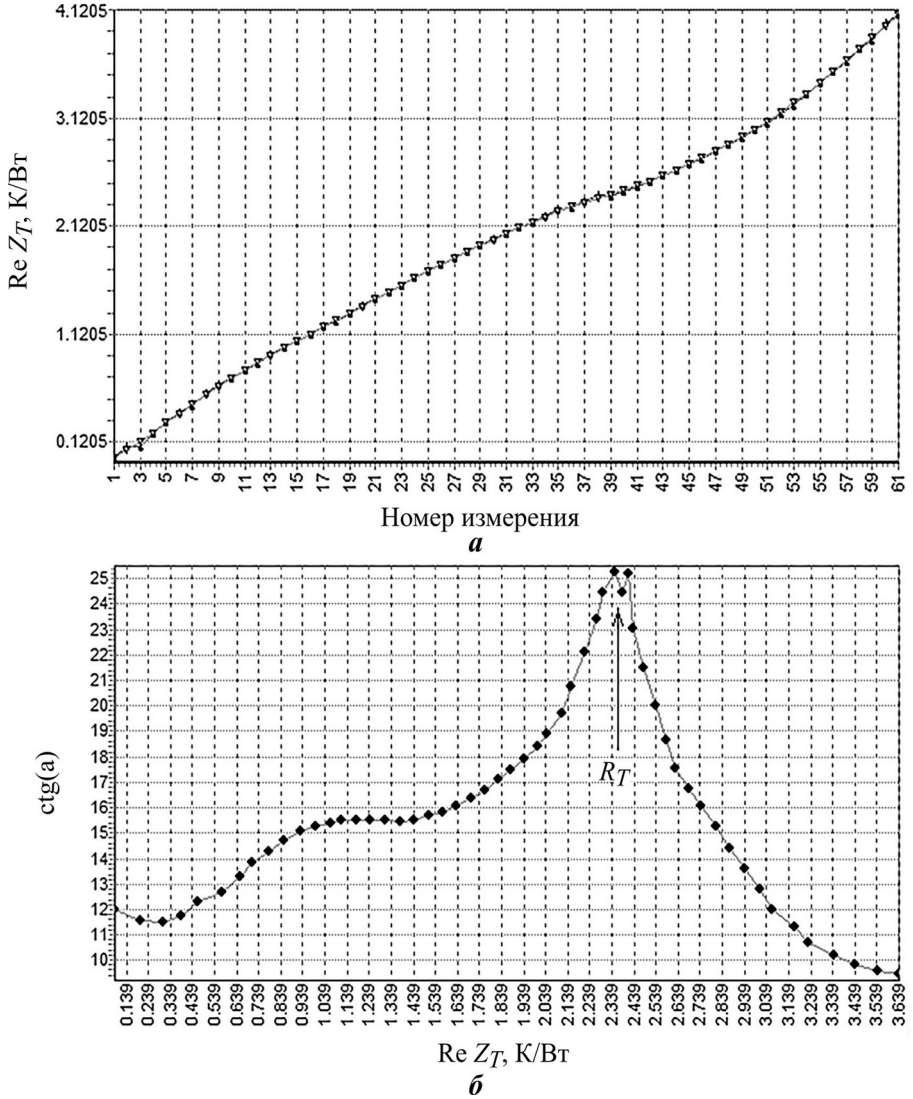


Рис.4. Временные зависимости длительности импульсов греющего тока (*а*) и температуры перехода кристалла (*б*)

Fig.4. Time dependencies of heating current pulse duration (*a*) and crystal transition temperatures (*b*)

Для определения теплового сопротивления переход – корпус измерены зависимости вещественной части теплового импеданса Re $Z_T(\nu)$ от частоты модуляции греющей мощности ν. Результаты измерений представлены на рис.5,*а*. По оси абсцисс отложены номера измерений, каждое из которых проведено при разных частотах модуляции. Соответствие частоты модуляции и номера измерения приведено справа от графика. Частота модуляции уменьшалась равномерно по логарифмической шкале частот от 1000 до 1 Гц с дискретностью 20 значений на декаду.

На рис.5,*б* представлен результат обработки зависимости Re $Z_T(\nu)$, которая включает в себя сглаживание методом «скользящего среднего», вычисление производной $d\mathrm{Re}Z_T/d\nu$ с помощью метода наименьших квадратов и построение зависимости $(d\mathrm{Re}Z_T/d\nu)^{-1}$ от $\mathrm{Re}Z_T$. Положение максимума графика соответствует значению теплового сопротивления R_T переход – корпус, которое для исследуемого HEMT-транзистора равно 2,35 К/Вт. Это значение хорошо согласуется со значением 2,30 К/Вт, полученным стандартным методом.



№	*f*, Гц	Re Z_T, К/Вт
1	1000	0.0229
2	891	0.0748
3	794	0.0874
4	708	0.2004
5	631	0.3060
6	562	0.3915
7	501	0.4638
8	447	0.5754
9	400	0.6565
10	355	0.7094
11	316	0.7880
12	282	0.8545
13	250	0.9314
14	224	0.9952
15	200	1.0633
16	178	1.1154
17	158	1.1857
18	141	1.2452
19	126	1.3153
20	112	1.3812
21	100	1.4409
22	89.1	1.5093
23	79.4	1.5724
24	70.7	1.6375
25	63.1	1.7025
26	56.2	1.7647
27	50.1	1.8266
28	44.7	1.8790
29	40.0	1.9441
30	35.5	2.0010
31	31.6	2.0466

Рис.5. Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса Re $Z_T(\nu)$ (*а*) и результат ее обработки (*б*)

Fig.5. Frequency dependence of the real part of thermal impedance Re $Z_T(\nu)$ (*a*) and its result (*b*)

Измерение токовой зависимости теплового сопротивления. В HEMT-транзисторах ток локализован в пределах канала с двумерным электронным газом. Это приводит к неоднородному распределению температуры по структуре кристалла транзистора. Как следствие, это может привести к нелинейному характеру зависимости температуры канала от рассеиваемой в нем мощности и росту теплового сопротивления переход – корпус с увеличением амплитуды импульсов греющего тока. Для проверки этого предположения исследовано влияние амплитуды импульсов греющего тока на результаты измерения теплового сопротивления HEMT-транзисторов. Измерения проведены модуляционным методом. Амплитуда импульсов варьируется в диапазоне 2–5 А. Результаты измерения зависимости $(d\mathrm{Re}Z_T/d\nu)^{-1}$ от вещественной части теплового импеданса $\mathrm{Re}\,Z_T$ представлены на рис.6,*а*. Для удобства восприятия все графики смещены относительно друг друга по оси ординат на постоянную величину. Для каждого графика указаны значения греющих токов, при которых измерено тепловое сопротивление.

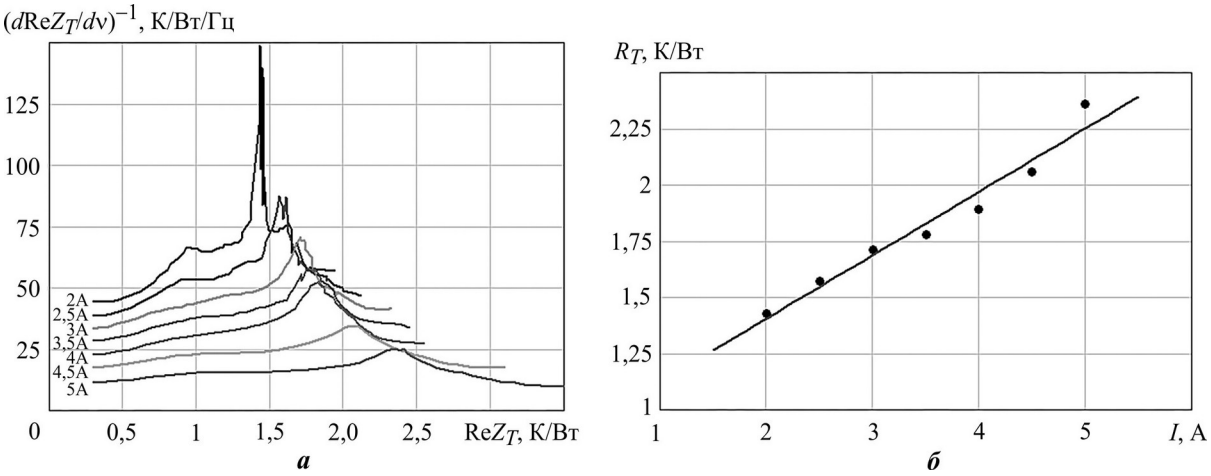


Рис.6. Результаты измерений теплового сопротивления при разных греющих токах: *а* – зависимость $(d\mathrm{Re}Z_T/d\nu)^{-1}$ от вещественной части теплового импеданса $\mathrm{Re}\,Z_T$; *б* – зависимость теплового сопротивления R_T от амплитуды греющего тока $I_{гр}$

Fig.6. Results of thermal resistance measurements at different heating currents: *a* – dependence $(d\mathrm{Re}Z_T/d\nu)^{-1}$ on the real part of thermal impedance $\mathrm{Re}\,Z_T$; *b* – dependence of thermal resistance R_T on heating current amplitude $I_{гр}$

Результаты измерений показывают, что с ростом амплитуды импульсов греющего тока тепловое сопротивление переход – корпус увеличивается. Как показал расчет коэффициентов линейной регрессии (рис.6,*б*, сплошная линия), увеличение составляет 0,28 К/Вт на 1 А. Этот результат указывает на нелинейный характер зависимости температуры в области канала транзистора от рассеиваемой в нем мощности и подтверждается результатами моделирования и эксперимента, представленными в работе [18].

Увеличение теплового сопротивления переход – корпус с ростом тока можно объяснить неоднородностью токораспределения в структуре HEMT-транзистора в результате падения напряжения на сопротивлении истоковых дорожек металлизации. Для качественного описания токовой зависимости теплового сопротивления прибора можно использовать приближение эффективной площади $S_{эфф}$ активной области структуры, определяемой как отношение полного тока $I = S_0 J_{ср}$ к максимальной плотности тока J_{max} в структуре прибора: $S_{эфф} = S_0(J_{ср}/J_{max})$. Откуда

$$R_T = R_{T0}\left(S_0/S_{эфф}\right) = R_{T0}\left(J_{max}/J_{ср}\right), \qquad (3)$$

где R_{T0} – тепловое сопротивление при однородном распределении плотности тока; S_0 – полная площадь активной области структуры; $J_{ср}$ – средняя плотность тока в структуре прибора.

Детальный анализ токораспределения в структурах HEMT-транзисторов представляет самостоятельную задачу. Однако по аналогии с МДП-транзисторами (учитывая их схожесть с HEMT-транзисторами по геометрии структуры и выражению для тока стока в режиме насыщения [19]) плотность тока у начала истоковых дорожек металлизации $J_{ст}(0)$ в режиме относительно небольших токов I_0 можно выразить через среднюю плотность удельного тока стока [20]: $J_{ст}(0)=\bar{J}_{ст}(1-B_м I_0)^{-1}$, где $B_м$ – некоторый коэффициент, определяемый сопротивлением истоковых дорожек металлизации и другими параметрами структуры прибора. После подстановки этого выражения в (3) для токовой зависимости теплового сопротивления получим $R_T=R_{T0}(1-B_м I_0)^{-1}$, что качественно верно описывает полученные экспериментальные результаты. Отметим, что крутизну токовой зависимости теплового сопротивления можно использовать для оценки степени неоднородности токораспределения в структуре HEMT-транзисторов.

Заключение. Сравнительный анализ результатов измерений теплового сопротивления переход – корпус нитрид-галлиевых HEMT-транзисторов, полученных разными методами, показал, что они хорошо согласуются между собой: при использовании стандартного метода по ОСТ 11 0944-96 и амплитуде импульсов греющего тока 5 А тепловое сопротивление R_{Tjc} = 2,30 К/Вт; при использовании модуляционного метода и такой же амплитуде импульсов греющего тока R_{Tjc} = 2,35 К/Вт. Таким образом, подтверждена объективность и корректность обоих методов.

В стандартном методе на точность измерений наибольшее влияние оказывают выбор длительности импульсов греющего тока и переходные электрические процессы при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения ТЧП. Для повышения точности определения теплового сопротивления следует предварительно измерять переходную тепловую характеристику, анализ которой позволяет найти оптимальные значения длительности импульсов греющего тока. Для уменьшения влияния переходных электрических процессов при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения ТЧП необходимо проводить экстраполяцию сигнала ТЧП к моменту окончания импульса греющего тока. В модуляционном методе, использующем разогрев транзистора периодически изменяющейся мощностью, влияние переходных электрических процессов значительно меньше.

Для практического применения можно рекомендовать оба метода, которые реализованы на основе разработанного и сертифицированного импульсного характериографа полупроводниковых приборов. При этом стандартный метод удобнее использовать в условиях массового контроля из-за большей простоты реализации, а модуляционный предпочтительнее для ответственных измерений из-за меньшей методической погрешности.

Литература

1. ***Верхулевский К.*** Новые возможности с транзисторами на основе GaN компании Microsemi // Компоненты и технологии. 2012. № 9. С. 161–164.

2. Temperature-dependent thermal resistance of GaN-on-diamond HEMT wafers / ***H. Sun, J. Pomeroy W., R.B. Simon et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2016. Vol. 37. No. 5. P. 621–624.

3. Напайка GaN-кристаллов мощных СВЧ транзисторов для *L*- и *S*-диапазонов частот / ***А.И. Земляński, А.Е. Бормонтов, С.В. Тарасов и др***. // Вестник ВГУ. Серия: Физика, математика. 2017. № 3. С. 14–20.

4. ***Кулиев М.В.*** Обзор современных GaN транзисторов и направления развития // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2017. № 2. С. 18–28.

5. Performance comparison of GaN HEMTs on diamond and SiC substrates Based on Surface Potential Model / ***Qingzhi Wu, Yuehang Xu, Jianjun Zhou et al.*** // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2017. Vol. 6. No 12. P. 171–178.

6. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. М.: ГУП НПП Пульсар, 1997. 110 с.

7. JEDEC JESD24-3 standard. Thermal impedance measurements for vertical power MOSFETs (Delta source-drain voltage method). URL: https://www.jedec.org/document_search/ field_doc_type/148/field_committees/23 (дата обращения: 08.04.2020).

8. JEDEC JESD24-12 standard. Thermal impedance measurement for insulated gate bipolar transistors – (Delta $V_{CE(on)}$ method).

9. Evaluation of thermal resistance constitution for packaged AlGaN/GaN high electron mobility transistors by structure function method / ***Zhang Guang-Chen, Feng Shi-Wei, Zhou Zhou et al.*** // Chin. Phys. B. 2011. Vol. 20. No.2. P. 027202. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/20/2/027202/pdf (дата обращения: 08.04.2020).

10. ***Farkas G., Sarkany Z., Rencz M.*** Issues in testing advanced power semiconductor devices // Proc. the 32 Semi-Therm Symposium (San Jose, CA, 2016). 2016. P. 143–150.

11. Test methods for semiconductor devices. MIL–STD–750–3. Department of Defense. URL: https://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-750F.pdf (дата обращения: 08.04.2020).

12. JEDEC JESD51-14 standard. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance Junction to Case of semiconductor devices with heat flow through a single path. URL: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD51 (дата обращения: 08.04.2020).

13. ***Székely V., Tran Van Bien.*** Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics. 1988. Vol. 31. P. 1363–1368.

14. T3Ster - thermal transient tester - technical information // Mentor Graphics. URL: https://www.mentor.-com/products/mechanical/micred/t3ster/ (дата обращения: 08.04.2020).

15. ***Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А.*** Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 10. С. 58–63.

16. ***Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М.*** Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация // Автоматизация процессов управления. 2017. № 2. С. 98–105.

17. ***Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А.*** Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления солнечных батарей // Автоматизация процессов управления. 2018. № 4. С. 118–126.

18. Temperature-dependent characterization of AlGaN/GaN HEMTs: thermal and source/drain resistances / ***R. Menozzi, G.A. Umana-Membreno, B.D. Nener et al.*** // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2008. Vol. 8. No 2. P. 255–264.

19. ***Тарасюк Н.П., Ворсин Н.Н., Луценко Е.В., Гладыщук А.А***. Влияние контактных сопротивлений на вольт-амперные характеристики HEMT-транзисторов на основе GaN // Вестник Брестского государственного технического университета. 2018. №5. С. 62–67.

20. ***Сергеев В.А.*** Влияние сопротивления металлизации на распределение тока в полевых транзисторах в режиме насыщения // Микроэлектроника. 2008. №5. С. 357–365.

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.; после доработки 23.12.2019 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Смирнов Виталий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и технологии электронных средств Ульяновского государственного технического университета (Россия, 4320227, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), ufire@mv.ru

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского го-

сударственного технического университета (Россия, 4320227, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), sva@ulstu.ru

Гавриков Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), ufire@mv.ru

Куликов Александр Александрович – кандидат технических наук, ведущий инженер Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2), доцент кафедры радиотехники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 4320227, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32), kulikovaa36@yandex.ru

References

1. Verhulevsky K. New capabilities with transistors based on the GaN of Microsemi. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*, 2012, no. 9, pp.161–164. (in Russian).

2. Sun H., Pomeroy J.W, Simon R.B. et al. Temperature-dependent thermal resistance of GaN-on-diamond HEMT wafers.*IEEE Electron Device Letters*, 2016, vol. 37, no 5, pp. 621–624.

3. Zemlyanskiy A.I., Bormontov A.E., Tarasov S.V. et al. Solder of GaN -crystals of high-power microwave transistors for L- and S-frequency bands. *Vestnik VGU. Seriya: fizika, matematika = VSU bulletin. Series: physics, mathematics,* 2017, no. 3, pp. 14–20. (in Russian).

4. Kuliev M.V. Overview of modern GaN transistors and direction of development. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic technology. Series 2. Semiconductor devices*, 2017, no. 2, pp. 18–28. (in Russian).

5. Qingzhi Wu, Yuehang Xu, Jianjun Zhou et al.Performance comparison of GaN HEMTs on diamond and SiC substrates based on surface potential model. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, vol. 6, no. 12, pp. 171–178.

6. Industry Standard 11 0944-96. *Integrated chips and semiconductor devices. Methods of calculation, measurement and control of thermal resistance*. Moscow, Pulsar NPP Publ., 1997. 110 p. (in Russian).

7. JEDEC JESD24-3 standard. *Thermal impedance measurements for vertical power MOSFETs (Delta source-drain voltage method)*. Available at: https://www.jedec.org/document_search/ field_doc_type/148/field_committees/23 (accessed 08.04.2020).

8. JEDECJESD24-12 standard. *Thermal impedance measurement for insulated gate bipolar transistors (Delta $V_{CE(on)}$ method)*. Available at: https://www.jedec.org/document_search/ field_doc_type/148/field_committees/23?page=1(accessed 08.04.2020).

9. Zhang Guang-Chen, Feng Shi-Wei, Zhou Zhou, Li Jing-Wan, Guo Chun-Sheng. Evaluation of thermal resistance constitution for packaged AlGaN/GaN high electron mobility transistors by structure function method. *Chin. Phys. B*, 2011, vol. 20, no. 2, p. 027202. Available at: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/20/2/027202/pdf (accessed 08.04.2020). DOI: https://doi.org/10.1088/1674-1056/20/2/027202

10. Farkas G., Sarkany Z., Rencz M. Issues in testing advanced power semiconductor devices. *Proc. the 32 Semi-Therm Symposium*. San Jose, CA, 2016, pp. 143–150.

11. *Test methods for semiconductor devices*. MIL–STD–750–3. Department of Defense. Available at: https://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-750F.pdf (accessed 08.04.2020).

12. JEDECJESD51-14 standard. *Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction to case of semiconductor devices with heat flow through a single path.* Available at: https://www.jedec.org/document_search?search_api_views_fulltext=JESD51 (accessed 08.04.2020).

13. Székely V., Tran Van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, 1988, vol. 31,pp. 1363–1368.

14. *T3Ster - Thermal Transient Tester - Technical information*. Mentor Graphics. Available at: https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/ (accessed 08.04.2020).

15. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Spectral and temporal methods of measuring thermal resistance of semiconductor devices. *Promyshlennyye ASU i kontrollery= Industrial ASU and controllers*,2014, no. 10, pp. 58–63. (in Russian)

16. *Smirnov V.I., Gavrikov A.A., Shorin A.M.* Method of measuring components of thermal resistance of semiconductor devices and its practical implementation. *Avtomatizatsiya Protsessov Upravleniya = Automation of Control Processes*, 2017, no. 2, pp. 98–105. (in Russian).

17. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Hardware and software complex for measurement of thermal resistance of solar panels. *Avtomatizatsiya Protsessov Upravleniya = Automation of Control Processes*, 2018, no. 4, pp. 118–126. (in Russian).

18. Menozzi R., Umana-Membreno G.A., Nener B.D. et al. Temperature-dependent characterization of AlGaN/GaN HEMTs: Thermal and source/drain resistances. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability,* 2008, vol. 8, no. 2, pp. 255–264.

19. Tarasyuk N.P., Vorsin N.N., Lutsenko E.V., Gladyshuk A.A. Effect of contact resistances on the current-voltage characteristics of GaN-based HEMT transistors. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of the Brest State Technical University,* 2018, no. 5, pp. 62–67. (in Russian).

20. Sergeev V.A. Effect of metallization resistance on current distribution in field effect transistors operated in saturation mode. *Mikroelektronika = Microelectronics*, 2008, no. 5, pp. 357–365. (in Russian).

Received 23.12.2019; Revised 23.12.2019; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Vitaliy I. Smirnov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Technology and Design Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), Senior Scientific Researcher of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), smirnov-vi@mail.ru

Vyacheslav A. Sergeev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanolectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), sva@ulstu.ru

Andrey A. Gavrikov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), a.gavrikoff@gmail.com

Alexander A. Kulikov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov st., 48/2), Assoc. Prof. of the Radio Engineering Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz st., 32), kulikovaa36@yandex.ru

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

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

http://ivuz-e.ru

УДК 621.311.6:621.382.3 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-234-243

Цифровая схема коммутации силовых ключей источников питания в квазирезонансном режиме

Е.А. Иванов, А.Н. Якунин

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

jonny-evildream@yandex.ru

При разработке вторичных источников питания наиболее важными составляющими являются повышенный КПД и сниженные массогабаритные параметры. В работе предложены алгоритмы коммутации транзисторов силовой цепи, предназначенные для использования в источниках питания, оборудованных цифровой системой управления. Работа алгоритмов построена на определении моментов времени в процессе преобразования энергии, когда коммутация транзистора происходит с минимальной потерей энергии. В отличие от существующих в рассматриваемых алгоритмах определено несколько таких моментов, и дальнейшая их работа заключается в формировании последовательности управляющих импульсов. Показано, что данная последовательность позволяет коммутировать транзистор в определяемые моменты с разными интервалами времени и носит квазирезонансный характер. Представленные алгоритмы осуществляют коррекцию выходных параметров источника питания за счет использования частотно-импульсной модуляции и коррекции генерируемой последовательности управляющих импульсов. Применение предложенных алгоритмов позволяет снизить уровень загруженности контроллера операциями общения с аналого-цифровым преобразователем до 40 % и уровень электромагнитных помех не менее чем в 2 раза по сравнению с существующими алгоритмами. Наиболее важное их преимущество – модернизированный квазирезонансный подход в определении моментов коммутации силовых ключей, позволяющий поддерживать минимальный уровень теряемой на переключение энергии, увеличить КПД источника питания и уменьшить размер системы отвода тепла.

Ключевые слова: вторичные источники питания; коммутация транзисторов; квазирезонансный режим; частотно-импульсная модуляция; потери энергии; электромагнитные помехи

© Е.А. Иванов, А.Н. Якунин, 2020

***Для цитирования*:** Иванов Е.А., Якунин А.Н. Цифровая схема коммутации силовых ключей источников питания в квазирезонансном режиме// Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 234–243. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-234-243

Digital Switching Circuit of Power Transistors of Power Supplies in Quasi-Resonant Mode

E.A. Ivanov, A.N. Yakunin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

jonny-evildream@yandex.ru

Abstract: During development of the secondary power supplies the most important components are increased efficiency and reduced weight and size parameters. In the paper the power transistor switching algorithms intended for use in the power supplies, equipped with a digital control system, has been proposed. The work of the algorithms is based on the determination of time points in the process of energy conversion, at which the transistor occurs with the minimal energy loss. Unlike the existing algorithms, being considered, several such algorithms have been determined, and further work of the proposed algorithms consists in forming a sequence of control pulses. It has been shown that this sequence permits to switch the transistor at defined moments with different time intervals, is quasi-resonant in nature. The presented algorithms carry out the correction of the output parameters of the power source through the use of PFM and correction of the generated sequence of control pulses. The application of the presented algorithms permits to reduce the controller load level by the operations of communication with the analog-to-digital converter up to 40% and not less than 2 times to reduce the level of electromagnetic interferences compared to the existing algorithms. Their most important advantage is modernized quasi-resonance approach in determining the switching moments of the power switches, which allows maintaining the minimal level of energy lost on switching, increasing the efficiency of the power source and reducing the size of the heat removal system.

Keywords: secondary power supplies; transistor switching; quasi-resonant mode; pulse frequency modulation; energy loss; electromagnetic interference

***For citation*:** Ivanov E.A., Yakunin A.N. Digital switching circuit of power transistors of power supplies in quasi-resonant mode. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 234–243. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-234-243

Введение. Важнейшими параметрами при разработке конкурентоспособных вторичных источников питания (ИП) являются их габариты и КПД. Такие ИП имеют высокую удельную мощность, которая зависит от указанных параметров в соответствии с формулой

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{вых}}}{V},$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность ИП, кВт/дм^3; $P_{вых}$ – выходная мощность источника питания, кВт; V– объем ИП, дм^3.

Помимо типа электрической схемы и компонентов, на которых построен разрабатываемый ИП, на КПД и габариты влияет метод коммутации транзистора силовой цепи (силовой транзистор). Такая коммутация может производиться с разным количеством рассеиваемой в тепло энергии. Так, коммутация силового транзистора с постоянным временным интервалом без регулирования этого момента для снижения энергетических потерь называется «жесткой» коммутацией [1]. В случае корректировки момента переключения транзистора в зависимости от величины коммутируемого напряжения коммутация будет называться «мягкой» [2, 3]. Мягкая коммутация силовых транзисторов позволяет снизить энергетические потери и, как следствие, габариты системы отвода тепла.

Существуют различные зарубежные и отечественные методики мягкой коммутации, построенные на аналоговых и цифровых решениях. Среди зарубежных решений наиболее распространенными являются методики нулевого тока и нулевого напряжения, применения снабберов [4–6]. Отечественные решения представлены вариантами применения специализированных микросхем [7, 8], использования колебательных контуров [9], внедрения цифровой системы квазирезонансного управления [10]. Внедрение цифровой системы управления, предлагаемое в некоторых методиках, позволяет реализовать дополнительные возможности защиты или функционирования ИП и более гибкого управления в процессе его работы. В связи с этим такая методика является перспективным решением.

В работе предложены отличающиеся от известных алгоритмы коммутации для методик разработки ИП на основе цифровой системы управления. Алгоритмы позволяют высвободить временны́е ресурсы микроконтроллера и обеспечить квазирезонансное управление силовым транзистором с корректировкой в режиме реального времени.

Принцип работы алгоритма. Алгоритм работы ИП с мягкой коммутацией силового транзистора основан на изменении времени коммутации. Алгоритм определяет моменты времени, когда напряжение на стоке транзистора минимальное, что позволяет снизить потери энергии при переключении. Описываемые моменты времени представлены на рис.1,*а* и обозначены термином «ложбины» (обозначены кружочком).

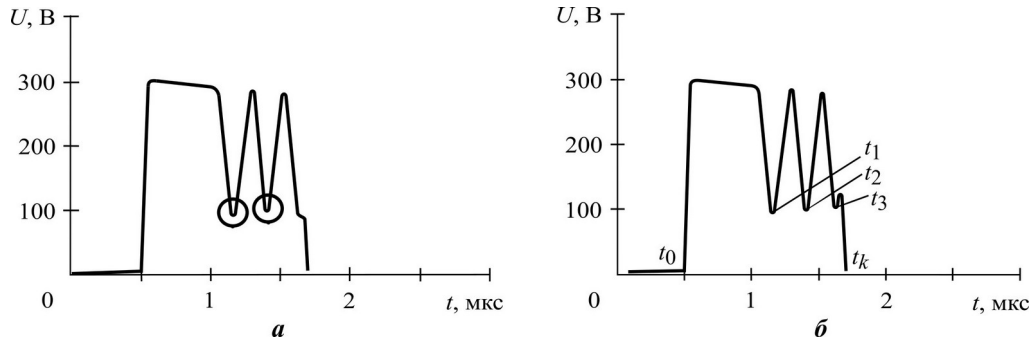


Рис.1. Формы коммутируемого напряжения силовой цепи (*а*) и оцифровываемого напряжения (*б*)
Fig.1. Power circuit switched form (*a*) and digitized voltage form (*b*)

Для обеспечения описанного переключения в структуре алгоритма можно выделить основные шаги: 1) считывание и фиксация оцифрованных значений коммутируемого силовым ключом напряжения; 2) обработка оцифрованных значений; 3) выработка управляющего воздействия.

На первом шаге происходит оцифровка формы напряжения силовой цепи с заданной частотой дискретизации с помощью внутреннего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Считываемые значения фиксируются для дальнейших операций.

Количество обращений к АЦП непосредственно влияет на использование ресурсов микроконтроллера. Если обозначить полную загруженность микроконтроллера вычислительными операциям T, то опрос АЦП в каждый промежуток времени с t_0 по t_k (рис.1,*б*), когда транзистор выключен, с типовой скважностью $S = 2$ составит $T^* = 0{,}5\,T$, где T^* – загруженность микроконтроллера операциями чтения данных с АЦП. Соответственно, при обращении к АЦП для считывания оцифрованных значений формы напряжения в силовой цепи только во время с t_0 по t_k для каждой десятой или сотой коммутации транзистора загруженность микроконтроллера операциями общения с АЦП составит:

$$T^*_{10} = 0{,}5\,\frac{T}{10} = T\,\frac{1}{20}; \quad T^*_{100} = 0{,}5\,\frac{T}{100} = T\,\frac{1}{200}.$$

Таким образом, чем реже микроконтроллер опрашивает АЦП, тем больше у него остается ресурсов на другие задачи и больше времени система будет реагировать на изменения в форме напряжения силовой цепи.

Последовательный и предсказывающий алгоритмы. Количество обращений к АЦП зависит от способа обработки полученных данных для фиксации положений ложбин t_1, t_2 и t_k. На данном этапе предложенные алгоритмы разделяются на последовательный, осуществляющий обработку всего массива значений с t_0 по t_k, и предсказывающий [11], выполняющий меньшее количество обращений к АЦП. Последовательный алгоритм имеет сходство с алгоритмом работы методики нулевого тока. Его существенное отличие от аналога заключается в фиксации не только первой, но и всех ложбин, которые укладываются в форме напряжения силовой цепи для дальнейшего формирования последовательности управляющих импульсов. Предсказывающий алгоритм определяет меньшее число экстремумов по форме напряжения силовой цепи, представленной на рис.2.

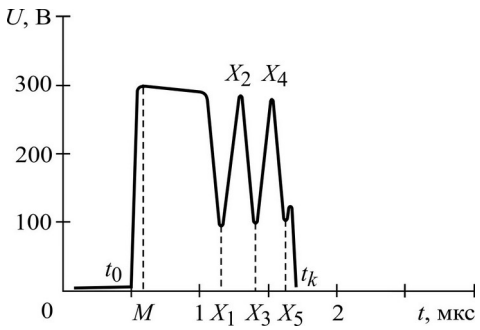


Рис.2. Определение экстремумов в форме напряжения силовой цепи

Fig.2. Determination of extrema in the form of power circuit voltage

Определение локальных минимумов X_1–X_5 на отрезке $[t_0, t_k]$ – цель обработки считываемых значений алгоритмом. В первую очередь предсказывающий алгоритм перебором значений определяет первый максимум, соответствующий точке M. Следующими определяются минимум X_1 и последующий максимум X_2. Определение экстремумов M, X_1 и X_2 достаточно для вычисления положения последующих локальных минимумов. После определения экстремума X_2 завершается процесс работы с АЦП. Последующие минимумы устанавливаются исходя из периода затухающих колебаний, равного удвоенному времени между экстремумами X_1 и X_2:

$$T = \left(t_{X_2} - t_{X_1}\right)2.$$

Поскольку момент начала импульса t_0, формируемый системой управления, известен, определение времени экстремумов происходит исходя из количества выданных

АЦП значений при известной частоте дискретизации. Положение во времени ложбин относительно момента t_0 определяется формулами: $t_{Л_1}=t_{X_1}$; $t_{Л_2}=t_{X_1}+T$; $t_{Л_3}=t_{X_1}+2T$.

На следующем шаге предсказывающий и последовательный алгоритмы используют одинаковый вариант формирования управляющего сигнала. Управляющий сигнал представляет собой чередующуюся последовательность импульсов с разной длиной. Предлагаемая квазирезонансная составляющая определяется на данном шаге работы алгоритмов и заключается не в корректировке момента коммутации силового ключа по положению первой ложбины, в которой происходит каждое переключение, как в существующих аналогах [12–15], а в чередовании импульсов управления с разными длинами, соответствующими положениям разных ложбин (рис.3).

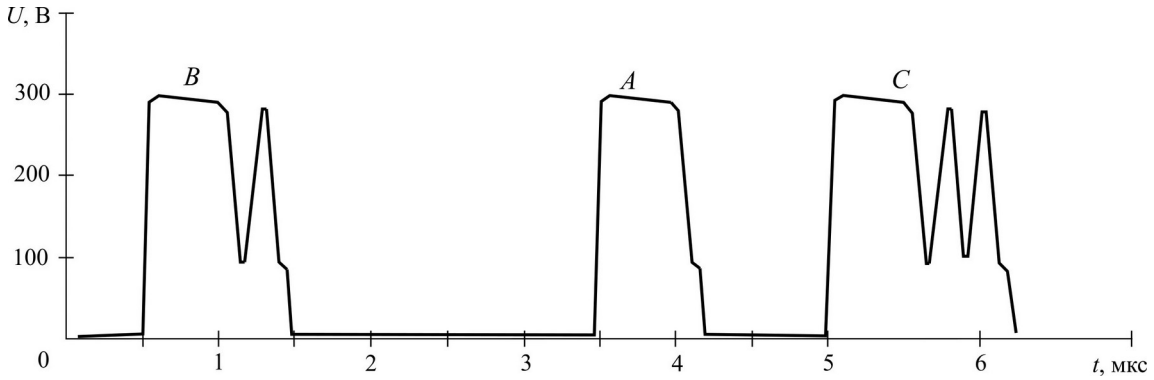


Рис.3. Форма коммутируемого напряжения силовой цепи под воздействием последовательности управляющих импульсов

Fig.3. The form of the switched voltage of the power circuit under the influence of a sequence of control pulses

Импульсам *A*, *B* и *C* соответствуют сигналы управления длительностью $t_{Л_1}$, $t_{Л_2}$ и $t_{Л_3}$ соответственно. На рисунке отмечены различные по времени промежутки между импульсами. Это вызвано необходимостью регулирования уровня энергии, передаваемой во вторичную обмотку (прямоходовой источник питания) или накапливаемой в трансформаторе (обратноходовой ИП). Например, для обратноходового ИП уровень запасаемой энергии должен оставаться неизменным и соответствовать формуле

$$W=\frac{LI^2}{2},$$

где *L* – индуктивность трансформатора, Гн; *I* – ток, протекающий в первичной обмотке трансформатора, А.

Рекомендованная последовательность импульсов для работы алгоритмов имеет вид *A*, *B*, *C*, *B*, *A*, *B*, *C*, *B*,... Такая последовательность получена экспериментальным путем и обеспечивает гибкую возможность коррекции алгоритмом процесса коммутации. Коррекция заключается в периодической проверке импульса *B* на положение первой ложбины и последующей корректировке рабочих точек всей последовательности при необходимости.

Типовая рекомендуемая последовательность *A*, *B*, *C*, *B*, *A*, *B*, *C*, *B*,... может быть изменена микроконтроллером для увеличения выходной мощности источника питания в ущерб уменьшения времени реакции системы на отклонение рабочей точки или времени опроса АЦП. Для этого может быть использовано два способа:

- увеличение количества длительных импульсов в последовательности. Например, рекомендуемая последовательность может принять следующий вид: *A*,*B*,*C*,*B*,*A*,*B*,*C*,*B*,...→*A*,*B*,*C*,*A*,*B*,*C*,*A*,*B*,*C*,…→*A*,*C*,*B*,*C*,*A*,*C*,*B*,*C*,… В данном случае, чем больше длительных импульсов находится между короткими контрольными импульсами *B*, по которым алгоритм производит коррекцию времени коммутации, тем реже происходит эта коррекция и уменьшается время реакции системы на смещение рабочей точки;

- переход алгоритма к последовательности импульсов с дополнительной ложбиной. В данном случае выполняется переопределение средних импульсов *B* в короткие импульсы *A*, длинных *C* в средние *B* и происходит увеличение длинных импульсов *C* до *C*+. Импульсы *C*+ удлиняются на один период колебаний до следующей ложбины.

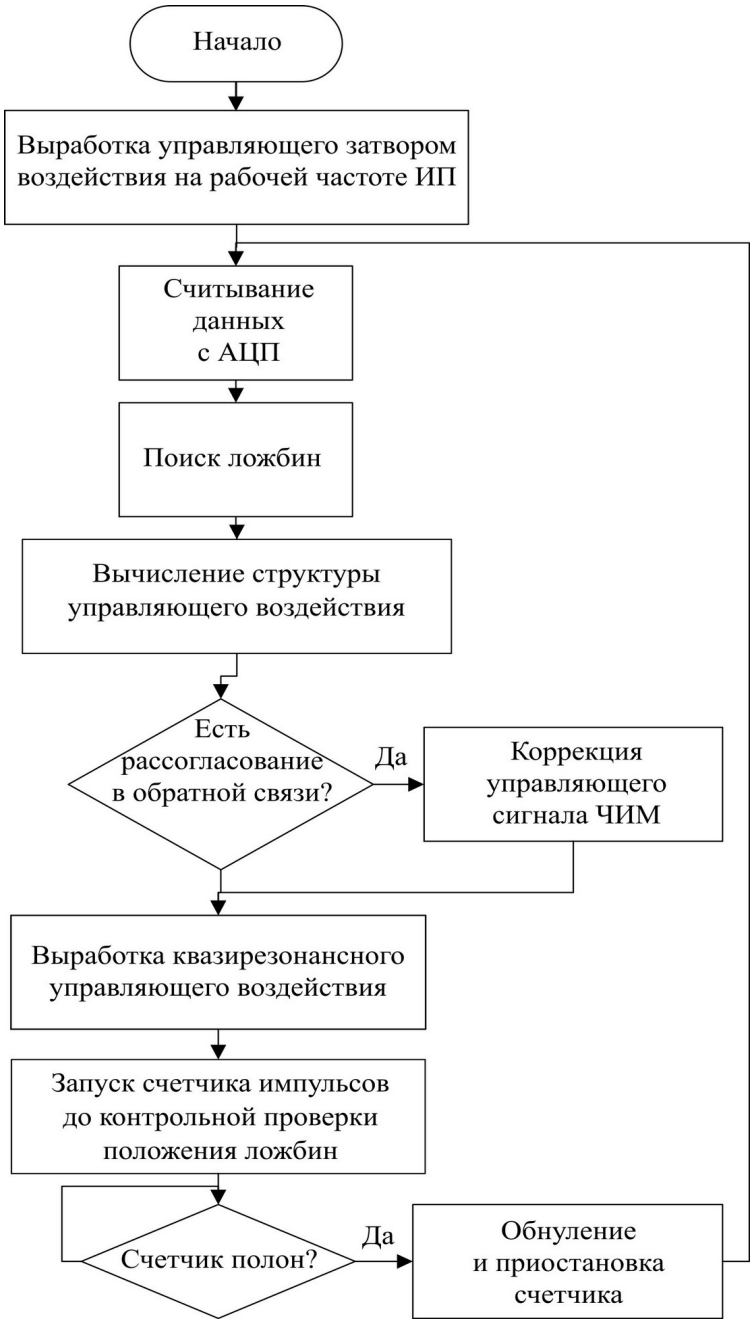


Рис.4. Структура последовательного алгоритма
Fig.4. Sequential algorithm structure

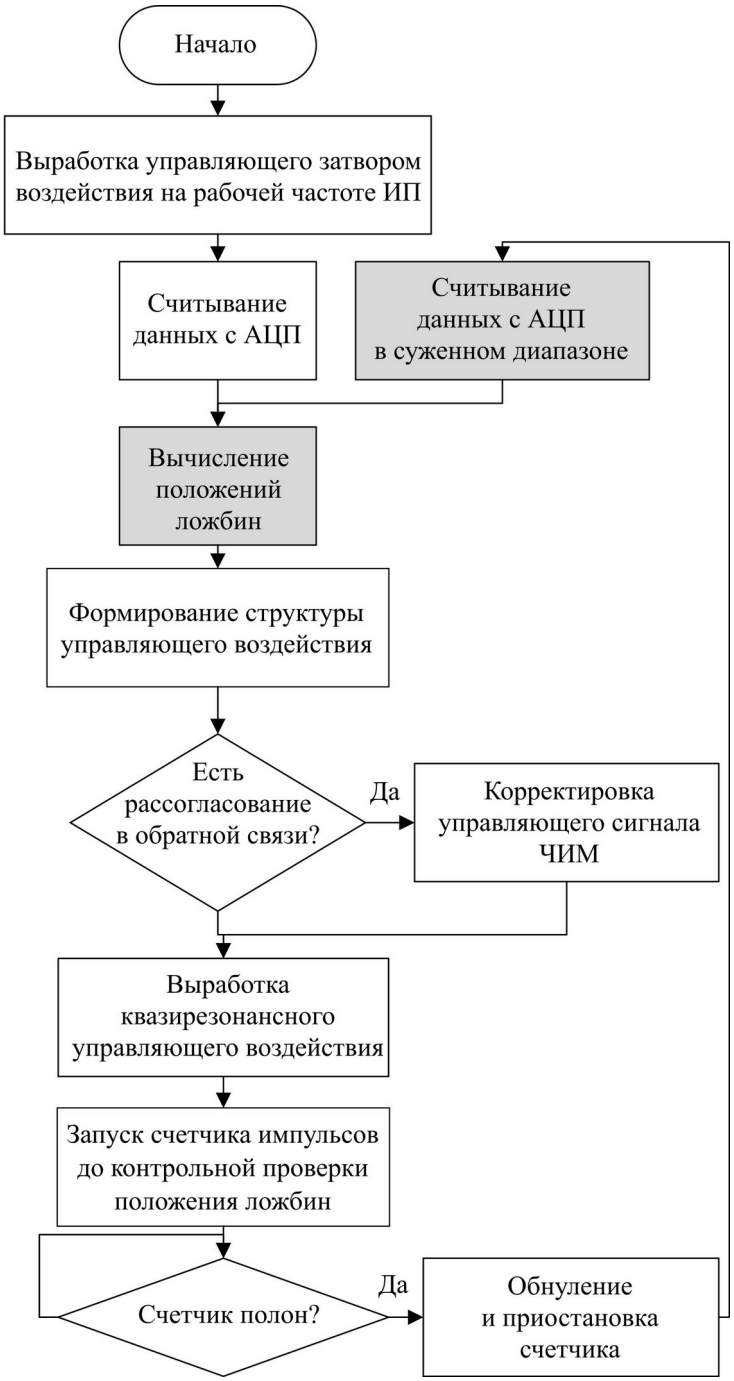


Рис.5. Структура предсказывающего алгоритма
Fig.5. Predictive algorithm structure

Помимо мягкой коммутации по представленной последовательности алгоритмы должны осуществлять коррекцию последовательности для стабилизации уровня выходного напряжения подконтрольного ИП. Поскольку широтно-импульсная модуляция в данном случае затруднена ввиду наличия квазирезонансной составляющей, рекомендуется использовать частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ).

На рис.4 и 5 приведены структуры последовательного и предсказывающего алгоритмов. Счетчик отсчитывает количество коммутаций силового ключа до проверки

формы напряжения силовой цепи и последующей коррекции управляющей последовательности сигналов, вырабатываемых микроконтроллером. Предсказывающий алгоритм содержит операции (выделены серым цветом на рис.5), которые отличают его от последовательного алгоритма.

Заключение. Предсказывающий алгоритм позволяет снизить загруженность контроллера операциями общения с АЦП до 40 % по сравнению с алгоритмами последовательного считывания полного сигнала. Это достигается за счет применения расчетного подхода для определения времени между ложбинами.

Применение квазирезонансного подхода в предложенных алгоритмах снижает уровень электромагнитных помех [16] на рабочей частоте подконтрольного источника питания не менее чем в 2 раза, так как распределение управляющих импульсов происходит в расширенном спектре частот.

Постоянный контроль рабочей точки за счет рефлексии алгоритма позволяет упростить и уменьшить систему отвода тепла контролируемого ИП или совсем отказаться от нее, увеличив удельную мощность последнего. При условии использования интегрированного планарного трансформатора [17] снижение высоты ИП может варьироваться в пределах 2–15 мм в зависимости от конструкции.

Литература

1. ***Мелешин В.И.*** Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.

2. ***Kosenko R., Vinnikov D.*** Soft-switching current-fed flyback converter with natural clamping for low voltage battery energy storage applications // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2017. No. 499. P. 429–436.

3. ***Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruiev V., Stysko B.*** Full soft switching dual DC/DC converter with quadrant switch for systems with battery energy storage system // IEEE 3RD International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. 2018. С. 155–160.

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

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

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

7. ***Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А., Ермилов Ю.В.*** Способ импульсного преобразования напряжения и устройство для его осуществления // Патент России №2510871 РФ. 2014. Бюл. № 10.

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

9. ***Кабелев Б.В.*** Способ обратноходового импульсного преобразования постоянного напряжения // Патент России №2125334. 1996. Бюл. № 29.

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

11. ***Иванов Е.А., Якунин А.Н.*** Алгоритм коммутации силовых ключей обратноходовых источников питания в квазирезонансном режиме с низкими энергетическими потерями // Материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатизации в науке и образовании – 2018». 2018. С.48–54.

12. ***Силкин Е.,*** Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. 2005. №5. С. 84–87.

13. ***Ниткин Д.А., Петрашевская А.А.*** Анализ рабочих процессов в двунаправленном конвертере напряжения с коммутацией при нулевом токе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. №2. с. 165–174.

14. ***Горяшин Н.Н., Лукьяненко М.В., Соломатова А.А., Хорошко А.Ю.*** Моделирование режимов параллельной работы квазирезонансных преобразователей напряжения с коммутацией ключевых элемен-

тов при нулевых значениях тока // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. №4. С. 53–58.

15. ***Горяшин Н.Н., Зорин А.Н.*** Исследование повышающего преобразователя напряжения с режимом коммутации ключевого элемента при нулевых значениях тока // Решетневские чтения. 2011. Т. 1. № 15. С. 166–167.

16. ***Мирошниченко Е.Л., Ивановский О.Я.*** Способы борьбы с электромагнитными помехами источников питания // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. №2. С.42–45.

17. ***Любимов А.В., Иванов Е.А., Коровин Г.В.*** Планарный трансформатор // Патент России №176671. 2018. Бюл. № 3.

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.; после доработки 20.12.2019 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

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

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

References

1. Meleshin V.I. *Transistor Converter Technology*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p. (in Russian).

2. Kosenko R., Vinnikov D. Soft-switching current-fed flyback converter with natural clamping for low voltage battery energy storage applications. *IFIP Advances in information and communication technology,* 2017, no. 499, pp. 429–436.

3. Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruiev V., Stysko B.Full soft switching dual DC/DC converter with quadrant switch for systems with battery energy storage system. *IEEE 3RD International conference on intelligent energy and power systems,*2018, pp.155–160.

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

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

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

7. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Harchenko I.A., Ermilov Y.U.*Method for pulse voltage conversion and device for its implementation.* Patent №2510871 RF. 2014. (in Russian).

8. Antonov A.A., Karpovich M.S., Pichugin I.V., Vasil'ev V. Development and verification of an integrated driver microcircuit for soft switching power keys for powerful power sources. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano and microsystem technology,* 2015, no. 9, pp. 57–64. (in Russian).

9. Kabelev B.V. *Method of flyback pulsed DC voltage conversion*. Patent №2125334.1996. (in Russian).

10. Ivanov E.A. Methods of reducing the value of the switched voltage in the power switches of flyback power supplies. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano and microsystem technology,* 2017, vol 19, no. 11. pp. 694–698. (in Russian)

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

12. Silkin E. The use of zero current inverters with quasi-resonant switching. *Silovaya ehlektronika = Power Electronics,* 2005, no. 5. pp. 84–87 (in Russian).

13. Nitkin D.A., Petrashevskaya A.A. Analysis of working processes in a bidirectional voltage converter with switching at zero current. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering,* 2012, no. 2. pp. 165–174. (in Russian).

14. Goryashin N.N., Luk'yanenko M.V., Solomatova A.A., Horoshko A.Yu. Modeling of parallel operation modes of quasi-resonant voltage converters with switching of key elements at zero current values. *Vestnik*

Sibirskogo Gosudarstvennogo Aehrokosmicheskogo Universiteta IM. akademika M.F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University. Academician M.F. Reshetneva, 2009, no. 4, pp. 53–58. (in Russian).

15. Goryashin N.N., Zorin A.N. Study of a step-up voltage converter with switching mode of a key element at zero current values.*Reshetnevskie chteniya = Reshetnev readings,* 2011, vol. 1, no. 15, pp. 166–167. (in Russian).

16. Miroshnichenko E.L., Ivanovskij O.Ya. Methods of dealing with electromagnetic interference of power sources. *Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologij = Modern trends in the development of science and technology*, 2017. no. 2, pp. 42–45. (in Russian).

17. Lyubimov A.V., Ivanov E.A., Korovin G.V. *Planar transformer.* Patent №176671 RF. 2018. (in Russian).

Received 20.12.2019; Revised 20.12.2019; Accepted 17.03.2020.

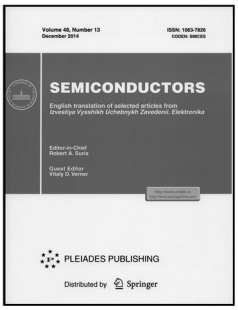
Information about the authors:

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

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

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



SEMICONDUCTORS

Vol. 53, *No.* 15, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7826,
ISSN ONLINE: 1090-6479,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

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

УКД 681.5.017 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-244-254

Сравнительный анализ аналитических и эмпирических методик оценки текущих параметров надежности радиолокационных комплексов мониторинга

А.В. Тимошенко[1,2], Д.В. Калеев[1], А.Ю. Перлов[1,2], В.М. Антошина[2,3], Д.В. Рябченко[2,4]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «РТИ», г. Москва, Россия
[3]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия
[4]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

atimoshenko@rti-mints.ru

Достигнутый в настоящее время высокий уровень цифровизации современных радиолокационных комплексов мониторинга (РКМ) и наличие системы встроенного контроля, регистрирующей данные о техническом состоянии компонентов, позволяют перейти к высокоточной оценке характеристик надежности по реальным данным работы РКМ. Реализация такого метода уточнения характеристик надежности по текущим значениям параметров технического состояния компонентов РКМ фактически в режиме реального времени может быть обеспечена при условии разработки универсального алгоритма уточнения параметров распределения с использованием эмпирической функции распределения. В работе проанализированы данные об отказах РКМ. Рассмотрены два варианта описания этих данных для оценки надежностных характеристик: аппроксимация аналитическим распределением и прямое использование эмпирического распределения. Использованы такие методы эмпирического исследования, как сравнение функции плотности распределения отказов, интенсивности отказов и γ-процентные ресурсы. Установлено, что описание через аналитическое распределение неадекватно. На это указывает малый *p*-уровень значимости при аппроксимации методом максимального правдоподобия, значительно отличающиеся интенсивности отказов и γ-ресурсы и, как следствие, неточный прогноз по вероятности отказа.

Ключевые слова: радиолокационные комплексы; параметры надежности; эмпирическое распределение; прогнозирование отказов

***Для цитирования*:** Сравнительный анализ аналитических и эмпирических методик оценки текущих параметров надежности радиолокационных комплексов мониторинга / А.В.Тимошенко, Д.В. Калеев, А.Ю. Перлов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 244–254. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-244-254

© А.В. Тимошенко, Д.В. Калеев, А.Ю. Перлов, В.М. Антошина, Д.В. Рябченко, 2020

Comparative Analysis of Analytical and Empirical Methods of Assessment of Radar Monitoring Systems Current Reliability Parameters

A.V. Timoshenko[1,2], D.V. Kaleev[1], A.Yu. Perlov[1,2], V.M. Antoshina[2,3], D.V. Ryabchenko[2,4]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]JSC RTI, Moscow, Russia
[3]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnay, Russia
[4]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

atimoshenko@rti-mints.ru

Abstract: The currently achieved high level of digitizing the up-to-date monitoring of radiolocation complexes (RCM) and availability of the built-in control system, registering the data on the technical state of the components, permits one to switch to forehanded and highly accurate estimation of reliability characteristics using the real radar monitoring systems data. The implementation of such a method for real-time estimation of reliability characteristics based on the parameters of the technical state of the radar monitoring systems components is possible, if a special algorithm for refining the distribution parameters is developed using the empirical distribution function. In the paper, the RCM failures data has been analyzed, and two methods of description of such data have been considered: an approximation by the analytical distribution and an empirical distribution. To compare these two methods, the failure distribution density, the failure rate and γ –percent resources have been computed. It has been determined that the description through the analytical distribution is inadequate. A small p-level of significance during approximation by the maximum likelihood method, significantly different failure rates and γ –resources have indicated that the description through the analytical distribution, and, as a result, the forecast of the failure probability is inadequate.

Keywords: radar systems; reliability parameters; empirical distribution; failure forecasting

For citation: Timoshenko A.V., Kaleev D.V., Perlov A.Yu., Antoshina V.M., Ryabchenko D.V. Comparative analysis of analytical and empirical methods of assessment of radar monitoring systems current reliability parameters. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 244–254. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-244-254

Введение. Для высоконадежных изделий, к которым относятся радиолокационные комплексы мониторинга (РКМ), отказы являются достаточно редким явлением, однако могут привести к критическому снижению функциональных характеристик и значительным затратам на их устранение. РКМ – технические системы конкретного назначения с возможностью восстановления работоспособного состояния после отказа в про-

цессе эксплуатации. Традиционно анализ надежности технических систем осуществляется в два этапа – априорный (на стадии проектирования) и апостериорный (на стадиях их отработки, испытаний и эксплуатации) [1].

Первый этап априори предполагает количественные характеристики надежности всех входящих в систему компонентов. При этом для новых компонентов, по которым еще не набрано достаточного объема статистики для определения количественных характеристик надежности, время безотказной работы задают в соответствии с характеристиками их аналогов, что приблизительно отражает действительные процессы в аппаратуре изделия.

Второй этап основан на анализе статистики экспериментальных данных о работоспособности и восстанавливаемости компонентов системы с целью получения оценок показателей надежности. Эти оценки получают методами математической статистики по результатам ограниченного числа наблюдений. При этом чаще всего предполагают, что результаты наблюдений являются случайными величинами, которые подчиняются определенному закону распределения с неизвестными параметрами [2].

Построение эмпирического распределения отказов. В качестве исходных параметров для оценки надежности по экспериментальным данным традиционно используется интенсивность отказов компонентов изделия и экспоненциальное распределение вероятности их безотказной работы**.** Для экспоненциального распределения интенсивность отказов – величина постоянная и совпадает с параметром распределения. Этот параметр является показателем отказоустойчивости, или λ-характеристикой [3–5].

Достигнутый в настоящее время высокий уровень цифровизации современных РКМ и наличие системы встроенного контроля, регистрирующей данные о техническом состоянии компонентов, позволяют перейти к высокоточной оценке характеристик надежности по реальным данным работы РКМ. Реализация такого метода уточнения характеристик надежности по текущим значениям параметров технического состояния компонентов РКМ фактически в режиме реального времени может быть обеспечена при условии разработки алгоритма уточнения параметров распределения с использованием так называемой эмпирической функции распределения [6]. Данную функцию, согласно теореме Гливенко – Кантелли о равномерной сходимости эмпирической функции распределения к истинной с ростом объема выборки, можно применять как оценку теоретической функции распределения $F(x)$ [7].

В настоящей работе проведено сравнение функций плотности распределения отказов, интенсивностей отказов и γ-процентных ресурсов, построенных на основе эмпирического распределения и аппроксимирующего его распределения Вейбулла. В качестве переменной времени использован отсчет – дискретная переменная, которая соответствует темпу записи данных об отказах, регистрируемых системой встроенного контроля РКМ.

Отметим, что, хотя РКМ являются высоконадежными изделиями, их компоненты имеют восстанавливаемые отказы. Это может быть обусловлено различными неисправностями аппаратуры. Отказоустойчивость комплекса достигается за счет многократного резервирования его компонентов, от надежности которых зависит общая надежность РКМ.

Рассмотрим основные операции построения эмпирического распределения отказов по данным встроенного контроля для цифровых РКМ.

Сбор данных и аппроксимация. В процессе поступления данных об отказах компонентов изделия формируется массив данных, в котором каждый элемент – это пара (L_k, N_k), где L_k – дискретное время непрерывной работы до отказа в интервалах снятия данных, а N_k – количество случаев, когда такое время работы до отказа встречалось [8].

Однако на начальном этапе набора статистки, когда данных мало, проверяется гипотеза H_0 о том, что распределение Вейбулла или экспоненциальное распределение $F(x, \theta)$ описывает эмпирическое распределение. Для этого можно воспользоваться критерием Колмогорова [6] с последующим отранжированием по возрастанию и вычислением вероятности попадания в интервал для теоретического распределения:

$$P_i(\theta) = F(x_{(i)}, \theta) - F(x_{(i-1)}, \theta).$$

Причем $n = \sum_{i=1}^{k} n_i$ и $\sum_{i=1}^{k} P_i(\theta) = 1$.

По полученной выборке определяются параметры распределения $F(x,q)$ и значение статистики S^* критерия Колмогорова:

$$F_n(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_{X_i, x}, \quad I_{X_i \leqslant x} = \begin{cases} 1, X_i \leqslant x, \\ 0, X_i > x. \end{cases}$$

Тогда $D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|$.

В соответствии с выбранным критерием проверки и теоретическим распределением $F(x, q)$ можно определить распределение статистики критерия $G(S|H_0)$ при справедливости гипотезы H_0. На основании выбранного распределения $G(S|H_0)$ имеем

$$P(S > S^*) = \int_{S^*}^{\infty} g(s|H_0)\, ds = 1 - G(S^*|H_0).$$

Если $P\{S > S^*\} > a$, где a – задаваемый уровень значимости, то нет оснований для отклонения проверяемой гипотезы. В противном случае проверяемая гипотеза H_0 отвергается.

Вычисление характеристик в начале набора статистики. В начале работы РКМ, когда данных об отказах недостаточно, погрешность эмпирического распределения будет велика, поэтому логично его аппроксимировать известным законом аналитического распределения. В рассматриваемом случае это распределение Вейбулла как самое универсальное. С накоплением данных следует уменьшать интервал дискретизации и в конечном счете перейти на эмпирическое распределение. При этом под эмпирической функцией распределения подразумевается некоторая дискретная функция распределения, которая построена по собранной статистике и является огрублением реальной функции распределения компонента, под интервалом дискретизации – шаг изменения аргумента для эмпирической функции распределения. На каждом из этих интервалов эмпирическая функция распределения принимает значение, полученное путем учета всех событий, произошедших на данном интервале, как один элементарный исход. Таким образом, полученная статистика усредняется на последовательных интервалах, чтобы нивелировать недостаток статистики и получить сглаженную функцию распределения.

Критерий перехода на эмпирическое распределение. При решении задачи расчета параметров надежности критерием перехода на эмпирическое распределение будет требуемая точность оценки характеристик надежности [9]. Использование эмпирического распределения эффективно, когда среднее значение на интервале дискретизации «установится». Другими словами, оно не должно испытывать больших изменений при добавлении новых данных (даже если они значительно отклоняются от среднего). Средняя длина цепи в интервале дискретизации выражается как

$$\bar{l} = \sum_{i=N_a}^{N_{a+1}} n_i l_i \Big/ \sum_{i=N_a}^{N_{a+1}} n_i.$$

Малое изменение этого среднего имеет вид

$$\frac{\bar{l}-\bar{l}'}{\bar{l}}=C\ll 1,$$

где $\bar{l}$ – среднее с учетом нового значения.

Если интервал дискретизации небольшой, то все собранные цепочки n_i длиной l_i из интервала дискретизации, а также длины l_i должны быть близки. Тогда величина C будет вести себя как $1/N$ при больших N, где N – число событий, т.е. число отказов РКМ, попадающих в интервал дискретизации. При этом C – оценка погрешности эмпирического распределения, что может служить критерием перехода на него: следует набрать столько статистики, чтобы в каждом интервале дискретизации C было мало (значение C выбирается в соответствии с требуемой точностью). При N = 10, что соответствует среднему числу наблюдений в каждом интервале, C будет не более 10 %. Это уже дает превышение по сравнению с точностью аналитического распределения.

Расчет характеристик по эмпирическому распределению. Схема алгоритма перехода на эмпирическое распределение и расчета характеристик на его основе представлена на рис.1.

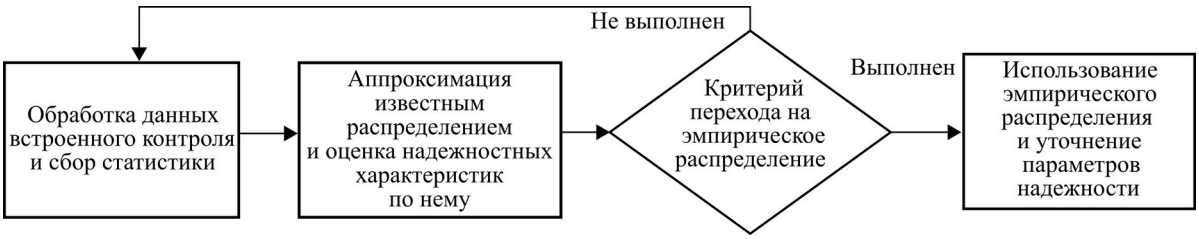


Рис.1. Схема алгоритма перехода на эмпирическое распределение
Fig.1. The scheme of the algorithm of the transition to the empirical distribution function

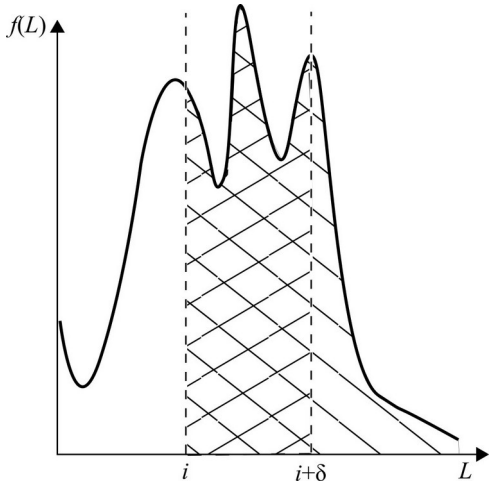


Рис.2. Плотность вероятности отказа на интервале δ при отсутствии отказов до момента i на основе эмпирического распределения
Fig.2. The failure probability density based on the empirical distribution for the interval δ, provided that that there are no failures up to time i

По мере поступления данных о новых отказах в РКМ с помощью алгоритма проводится уточнение шага дискретизации эмпирического распределения с целью получения более точных параметров надежности.

Рис.2 качественно поясняет формулу для оценки вероятности безотказной работы на интервале (заштрихованная область) при отсутствии отказа на протяжении i отсчетов по результатам построенного эмпирического распределения:

$$P\{\zeta>L_{i+\delta}|\zeta>L_i\}=$$

$$=\frac{P\{\zeta>L_{i+\delta},\zeta>L_i\}}{P\{\zeta>L_i\}}=\frac{\sum_{k=i}^{i+\delta}f(L_k)\Delta L}{\sum_{k=0}^{N}f(L_k)\Delta L},$$

где $f(L_i)$ – дискретная функция плотности вероятности «обнаружения» цепи длиной L_i; ΔL – интервал считывания данных в РКМ.

Модельный эксперимент. Для проведения эксперимента данные взяты с блоков 1 и 2 в РКМ (порядка 25 тысяч отсчетов двух состояний: «работоспособен», «неработоспособен», новый отсчет приходит каждую минуту). На этом интервале наблюдения зафиксировано порядка 400 отказов для каждого блока. Построено эмпирическое распределение отказов для блоков 1 и 2. На основе отказов получены функции их плотности распределения, интенсивности и γ-процентные ресурсы (рис.3).

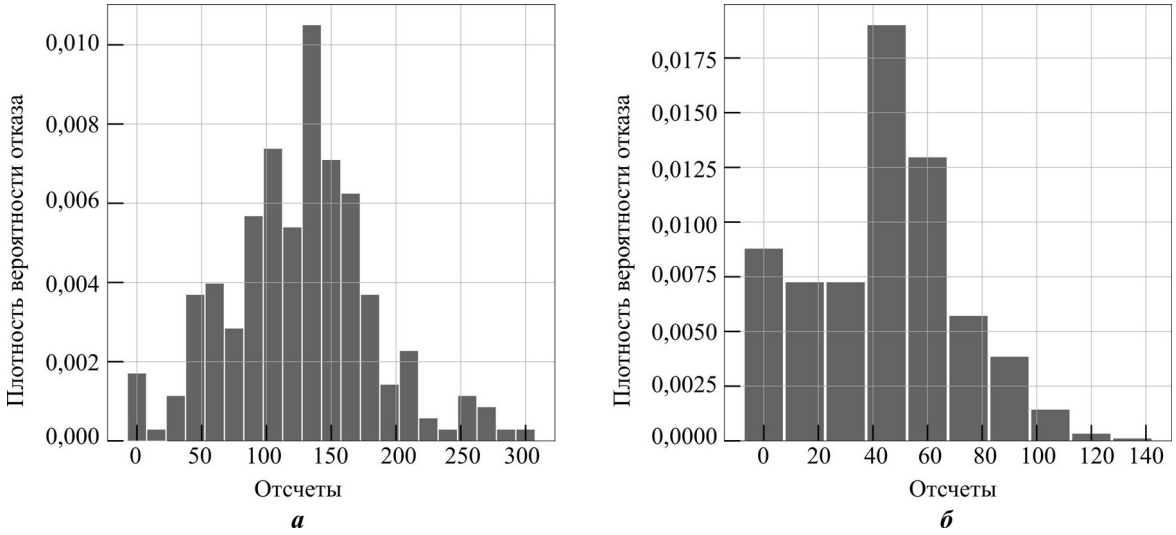


Рис.3. Плотности вероятностей отказов для эмпирических распределений: *а* – блок 1; *б* – блок 2
Fig.3. Failure probability densities for empirical distributions: *a* – block 1; *b* – block 2

Проведенные модельные эксперименты обработки отказов РКМ показали, что расчет характеристик надежности зависит от типа отказов. Так, например, время возникновения отказов на участке начала эксплуатации может подчиняться закону Вейбулла, при преобладании внезапных отказов – экспоненциальному закону, на участке с постепенными отказами – нормальному закону [10].

На рис.4 показаны примеры эмпирических распределений и аппроксимирующие их распределения Вейбулла.

Видно, что для обоих распределений подобранная методом максимального правдоподобия аппроксимация плохо описывает реальность. Это подтверждается количественными характеристиками. Значения статистики для критерия Колмогорова – Смирнова равны 0,067 и 0,12, *p*-уровень значимости составляет 0,24 и $7{,}3 \cdot 10^{-8}$ для блоков 1 и 2 соответственно. Таким образом, если взять достаточно низкий граничный *p*-уровень значимости в районе 0,5, то обе аппроксимации должны быть отброшены и предложено какое-либо другое распределение, отличное от распределения Вейбулла. Использование более специализированных распределений для оценки надежностных характеристик, таких как, например, диффузные двухпараметрические DN-распределения [11], также приведет к расхождению статистических данных с теоретическим распределением в связи с небольшой выборкой. Отличие в данном случае заключается в том, что уровень значимости критерия Колмогорова – Смирнова при проверке DN-распределения выше уровня значимости для распределений Вейбулла. Однако сравнительный анализ с DN-распределением не проводился.

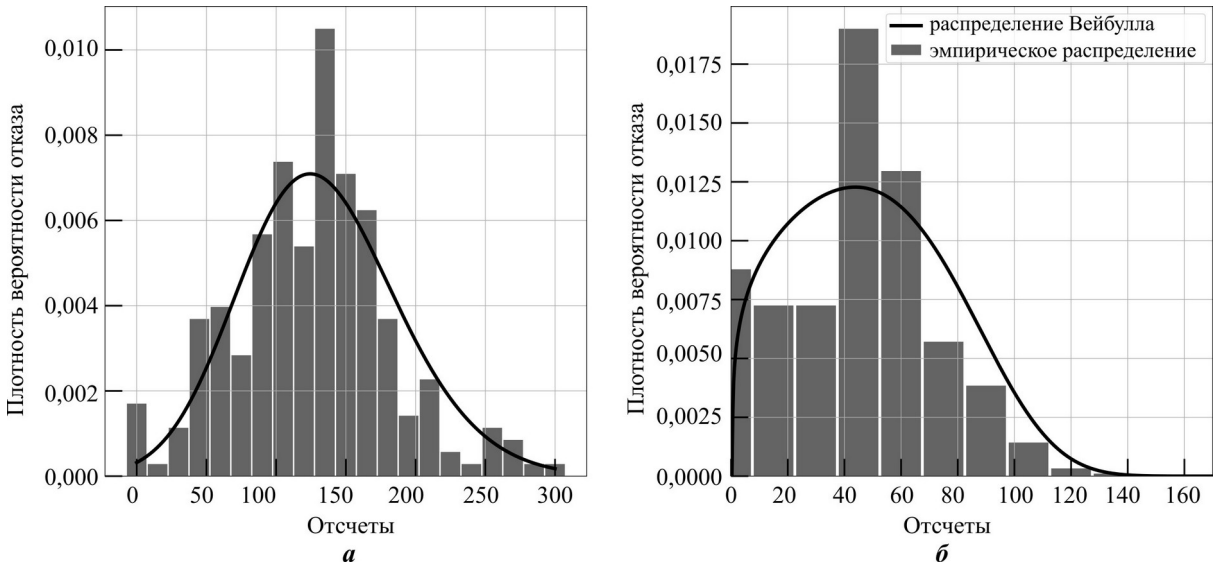


Рис.4. Эмпирические плотности вероятностей отказов и их аппроксимации распределением Вейбулла: *а* – блок 1; *б* – блок 2

Fig.4. Empirical densities of failure probabilities and their approximations by the Weibull distribution: *a* – block 1; *b* – block 2

Использование аппроксимированной функции распределений, полученной на небольшой выборке, приводит к некорректным значениям характеристик надежности. Это можно увидеть на примере графиков интенсивностей отказов обоих распределений. Величину $\lambda(t)$ можно найти из выражения

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)},$$

где $f(t)$ – плотность вероятности отказа; $F(t)$ – вероятность отказа; $F(t) = 1 - F(t)$ – функция надежности.

На рис.5 для обоих блоков наблюдается значительное отклонение интенсивностей отказов для эмпирического и аналитического распределений. При этом, так как статистика конечна, значения эмпирической плотности вероятности отказа при больших временах имеют сильную погрешность в силу малого количества таких исходов, что ведет к неадекватному поведению интенсивности отказов, и эти области обрезаны.

При сравнении γ-ресурсов также обнаружены различия. Значение этого параметра можно определить по формуле

$$\frac{\gamma}{100}=\int_{T_\gamma}^{\infty} f(L)\,dL,$$

где T_γ – γ-процентный ресурс; $f(L)$ – плотность вероятности отказа.

Для эмпирического распределения, которое в рассматриваемом случае дискретно, следует заменить интеграл на соответствующую сумму:

$$\frac{\gamma}{100}=\sum_{i\in\{T_\gamma\le L_i\le L_{\max}\}} f(L_i)\,\Delta L.$$

Далее необходимо подобрать значение T_γ перебором всевозможных L_i и максимальной длины цепи $L_{\max}$ такое, чтобы сумма была наиболее близка к значению γ/100.

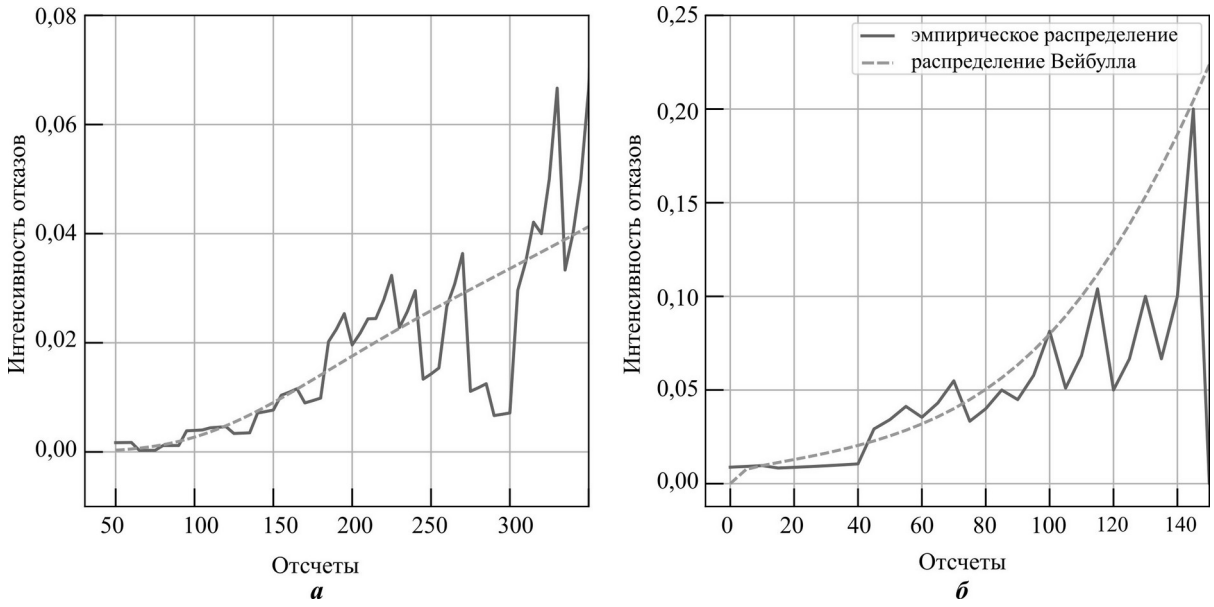


Рис.5. Графики интенсивностей отказов для блоков 1 (*а*) и 2 (*б*)
Fig.5. Graphs of failure rates for blocks 1 (*a*) and 2 (*b*)

Отличие эмпирического распределения от распределения Вейбулла составляет ~ 5–20 % (таблица). В больших масштабах это может дать значительную разницу в затратах на техническое обслуживание.

γ-ресурсы для эмпирического и аналитического распределений
γ-resources for empirical and analytical distributions

Распределение	Блок 1		Блок 2	
	γ = 50	γ = 90	γ = 50	γ = 90
Эмпирическое	136	59	52	11
Вейбулла	130	62	48	13

На рис.6 показана динамика прогноза вероятности отказа на 20 отсчетов для блоков 1 и 2. Видно, что для обоих блоков прогнозы по эмпирическому распределению и по его аппроксимации распределением Вейбулла отличаются. Например, для блока 2 по сравнению с прогнозом по эмпирическому распределению прогноз по аппроксимации эмпирического распределения дает ощутимую переоценку вероятности отказа на начальных этапах и занижение этой вероятности на более поздних.

Таким образом, очевидно, что распределения, аналогичные приведенным на рис.3, не могут быть точно описаны ни распределением Вейбулла, ни экспоненциальным распределением. Применение эмпирического распределения позволяет адекватно оценивать параметры надежности за счет учета особенностей поведения компонентов РКМ в условиях ограниченной информации об отказах изделия. Это, в свою очередь, обосновывает применение алгоритма перехода на эмпирическое распределение, что позволяет:

- более рационально подойти к вопросу технического обслуживания сложных РКМ, а именно продлить гарантийный срок службы менее нагруженных элементов. Под менее нагруженными понимаются элементы, для которых по эмпирическому распределению отказов имеем большую среднюю наработку до отказа и, соответственно, большую вероятность безотказной работы [12];

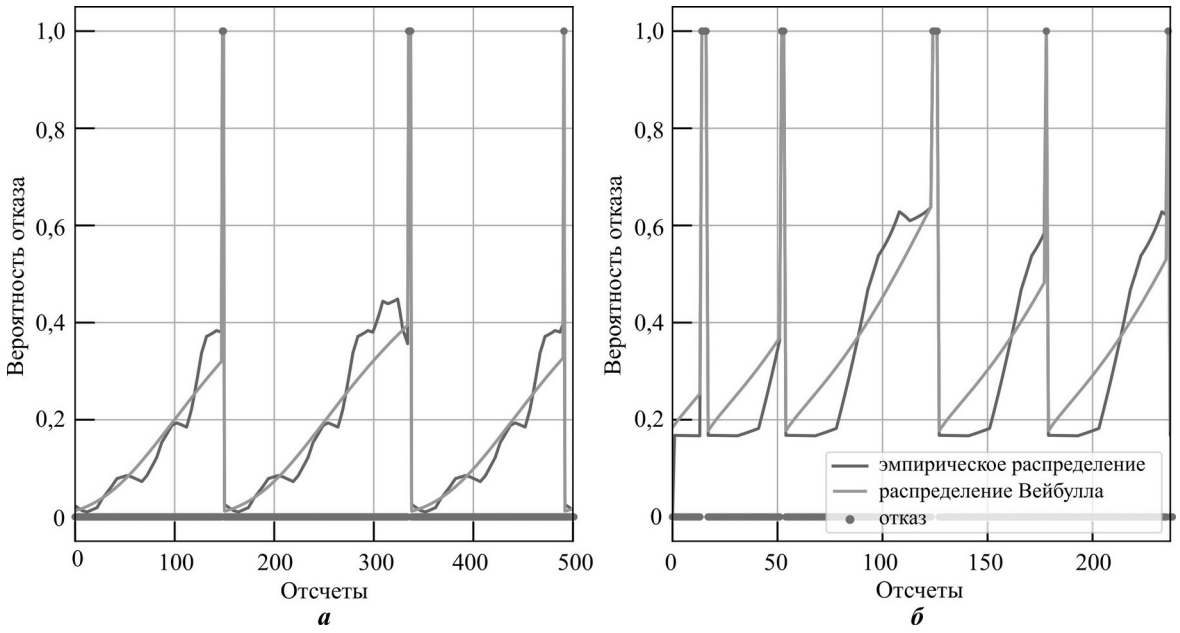


Рис.6. Прогноз для вероятностей отказов на 20 отсчетов для блоков 1 (*а*) и 2 (*б*)
Fig.6. Forecast for the probabilities of failures for 20 counts for blocks 1 (*a*) and 2 (*b*)

- повысить надежность работы РКМ в целом, так как при должном техническом обслуживании будет происходить меньше непредвиденных отказов.

Заключение. Применение предложенного алгоритма перехода на эмпирическое распределение позволяет в режиме реального времени уточнять эмпирическое распределения отказов, что может использоваться при планировании мероприятий технической эксплуатации РКМ. По сравнению с традиционным способом расчета характеристик надежности на этапе проектирования рассмотренные характеристики более точные, так как соответствуют реальным условиям эксплуатации.

Литература

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 12 с.

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

3. ***Антонов А.В., Маловик К.Н., Чумаков И.А.*** Интервальная оценка характеристик надежности уникального оборудования // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-1. С. 71–76.

4. ***Жаднов В.В.*** Модель отказов электронных компонентов для расчета надежности // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 4. С. 353–361.

5. ***Hashemian H.M., Bean Wendell C.*** State-of-the-art predictive maintenance techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 60. No. 1. P. 226–236.

6. ***Губарев В.В.*** Идентификация эмпирических распределений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2014. №.6(30). С. 205–215.

7. ***Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.*** Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

8. ***Hoffmann G.A., Salfner F., Malek M.*** Advanced failure prediction in complex software systems. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Institut für Informatik, 2011. Vol. 1. No. 1. P. 1–19.

9. Failure prediction based on log files using random indexing and support vector machines / ***I. Fronza, A.Sillitti, G. Succi et al.*** // Journal of Systems and Software. 2013. Vol. 86. No. 1. P. 2–11.

10. ***Жаднов В.В.*** Расчет надежности электронных модулей. М.: Солон-Пресс, 2016. 232 с.

11. ***Белозеров В.В., Любавский А.Ю., Олейников С.Н.*** Модели диагностики надежности и безопасности СВТ и АСУ объектов техносферы. М.: Издательский дом Академии естествознания, 2015. 110 с.

12. ***Садыхов Г.С., Савченко В.П., Сидняев Н.И.*** Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 382 с.

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.; после доработки 22.01.2020 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Тимошенко Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, начальник комплексного отдела, заместитель генерального конструктора АО «РТИ» (Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 марта, 10/1), начальник лаборатории систем технического обслуживания и диагностики сложных радиоинформационных комплексов Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), atimoshenko@rti-mints.ru

Калеев Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, заместитель директора по образовательной деятельности Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aod.dania@gmail.com

Перлов Анатолий Юрьевич – кандидат технических наук, начальник сектора АО «РТИ» (Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 марта, 10/1), инженер Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), laperlov@yandex.ru

Антошина Виктория Михайловна – инженер-программист АО «РТИ» (Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 марта, 10/1), студентка Высшей школы системного инжиниринга Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) (Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9), nikky095@yandex.ru

Рябченко Дмитрий Вадимович – инженер АО «РТИ» (Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 марта, 10/1), студент физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы,1), dimr74rus@gmail.com

References

1. GOST 27.301-95. *Reliability in technology. Reliability calculation. Fundamentals.* Moscow, IPK Izdatel'stvo Standartov Publ., 2002. 12 p. (in Russian).

2. Matveevskij V.R. *Reliability of technical systems. Textbook*. Moscow, 2002. 113 p. (in Russian).

3. Antonov A.V., Malovik K.N., Chumakov I.A. Interval estimation of reliability characteristics of unique equipment. *Fundamental research = Фундаментальные исследования,* 2011, no. 12-1, pp. 71–76. (in Russian).

4. Zhadnov V.V. The model of failure of the electronic components to calculate the reliability. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of universities*. *Electronics,* 2018, vol. 23, no. 4, pp. 353–361. (in Russian).

5. Hashemian H.M., Bean Wendell C. State-of-the-art predictive maintenance techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, vol. 60, no. 1, pp. 226–236.

6. Gubarev V.V. Identification of empirical distributions. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie =Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering,* 2014, no. 6(30), pp. 205–215. (in Russian).

7. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Quantitative Hydroecology: methods of system identification.* Tol'yatti, IEVB RAN, 2003. 463 p. (in Russian).

8. Hoffmann G.A., Salfner F., Malek M. *Advanced failure prediction in complex software systems.* Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Institut für Informatik, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 1–19.

9. Fronza I., Sillitti A., Succi G., Terho M., Vlasenko J. Failure prediction based on log files using random indexing and support vector machines. *Journal of Systems and Software,* 2013, vol. 86, no. 1, pp. 2–11.

10. Zhadnov V.V. *Calculating the reliability of electronic modules*. Moscow, Solon-Press, 2016. 232 p. (in Russian).

11. Belozerov V.V., Lyubavskij A.Yu., Olejnikov S.N. *Models for diagnostics of reliability and safety of SVT and automated control systems of technosphere objects.* Moscow, Izdatel'skij dom Akademii Estestvoznaniya Publ., 2015. 110 p. (in Russian).

12. Sadyhov G.S., Savchenko V.P., Sidnyaev N.I. *Models and methods for estimating the residual life of radio electronics products.* Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2015. 382 p. (in Russian).

Received 12.12.2019; Revised 22.01.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Alexandr V. Timoshenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department, Deputy General Designer of JSC RTI (Russia, 127083, Moscow, 8 March st., 10/1), Head of the Laboratory of Intelligent Systems for Maintenance and Diagnostics of Complex Radio Information Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), atimoshenko@rti-mints.ru

Dmitry V. Kaleev – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Educational Activities of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aod.dania@gmail.com

Anatoly Y. Perlov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of JSC RTI (Russia, 127083, Moscow, 8 March st., 10/1), Engineer of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), laperlov@yandex.ru

Victoria M. Antoshina – Software Engineer JSC RTI (Russia, 127083, Moscow, 8 March st., 10/1), Student of the Higher School of Systems Engineering, Moscow Institute of Physics and Technology (Russia, 141701, Dolgoprudnay, Institutskiy per., 9), nikky095@yandex.ru

Dmitry V. Ryabchenko – Engineer of JSC RTI (Russia, 127083, Moscow, 8 March st., 10/1), Student of Faculty of Physics Department, Lomonosov Moscow State University (Russia, 119991, Moscow, Leninskiye Gory, 1), dimr74rus@gmail.com

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

УДК 615.47 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-255-264

Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови

Н.А. Базаев

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

bazaev-na@ya.ru

Разработка технических средств для создания биотехнических систем искусственного очищения крови – перспективное направление биомедицинской инженерии искусственных органов. Для построения таких систем применяются методы системного анализа. Одной из актуальных задач биомедицинской электроники в области диализа является создание автономной носимой аппаратуры для искусственного очищения крови. В работе исследованы методы регенерации диализата и многокритериальный выбор состава блока регенерации. Рассмотрены особенности построения и основные направления совершенствования изготовленного и апробированного опытного образца автономного носимого аппарата искусственного очищения крови. Разработанный аппарат по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам (скорость удаления мочевины 0,8 г/ч при массе аппарата 3,5 кг) и является перспективным для отечественного производства аппаратуры для заместительной почечной терапии.

Ключевые слова: хроническая почечная недостаточность; носимый аппарат «искусственная почка»; диализ; искусственное очищение крови

Для цитирования: Базаев Н.А. Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 255–264. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-255-264

© Н.А. Базаев, 2020

Key Aspects of Autonomous Wearable Artificial Blood Purification Apparatus Development

N.A. Bazaev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

bazaev-na@ya.ru

Abstract: Development of technical systems for artificial blood purification is one of the promising areas of biomedical engineering. System analysis approach is used to create wearable artificial kidney. Investigation of dialysate regeneration methods and multicriteria selection of regeneration unit structure have been carried out. As a result, a prototype of wearable artificial kidney has been manufactured and tested; both the features of its construction and the main ways of its improvement have been highlighted. The developed apparatus is equal or better in its characteristics than foreign analogues (0.8 g/h urea removal rate, 3.5 kg device mass) and is the immediate prospect for the domestic production of equipment for renal replacement therapy

Keywords: chronic renal failure; wearable artificial kidney; dialysis; artificial blood purification

***For citation*:** Bazaev N.A. Key aspects of autonomous warerable artificial blood purification apparatus development. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 255–264. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-255-264

Введение. Применение аппаратуры искусственного очищения крови – единственная возможность жизнеобеспечения пациентов с хронической почечной недостаточностью ввиду того, что количество донорских почек составляет 10–15 % от числа нуждающихся в них [1]. Актуальная задача в области биомедицинской инженерии искусственных органов – разработка автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови. При этом ключевыми моментами являются совершенствование методов регенерации отработанного диализирующего раствора и миниатюризация электронных компонентов аппарата. Аппаратура для заместительной терапии представляет собой сложные технические системы, включающие в себя набор датчиков, модулей для приготовления растворов, осуществляющих очищение крови, контроль и управление исполнительными элементами аппарата и т.д. При подключении пациента к аппарату искусственного очищения крови образуется биотехническая система с большим количеством взаимных связей. В таких объектах протекает много процессов различной природы, управление которыми, равно как и поиск оптимальных условий для их осуществления, требует применения методов системного анализа.

Используемая в настоящее время в клинической практике аппаратура для искусственного очищения крови имеет существенные недостатки, которые не позволяют сделать процедуру лечения пациентов с хронической почечной недостаточностью доступной для большинства пациентов (только 20 % людей с хронической почечной недостаточностью получают лечение [1]). Это зависимость от системы водоподготовки (в течение процедуры расходуется до 150 л диализирующих растворов), высокое энергопотребление (зависимость от сети электропитания), высокая стоимость процедуры, низкая мобильность пациентов во время лечения. В связи с этим одной из актуальных задач биомедицинской электроники в области диализа является создание автономной носимой аппаратуры для искусственного очищения крови, которая позволит преодолеть указанные недостатки [2–4].

Цель настоящей работы – построение автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови.

Биотехническая система искусственного очищения крови. В общем случае биотехническая система искусственного очищения крови включает в себя пациента, аппарат «искусственная почка», лечащего врача и совокупность взаимосвязей между ними (рис.1).

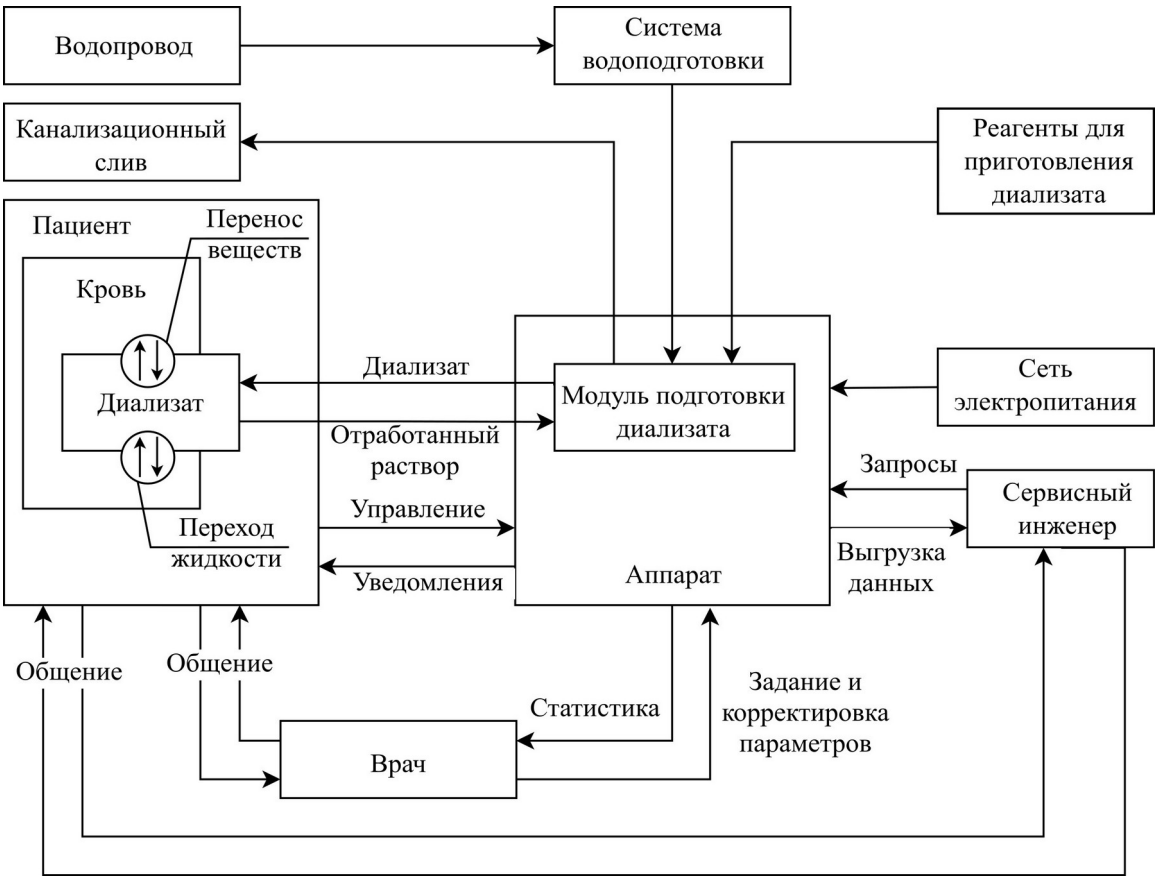


Рис.1. Общий случай системных связей в биотехнической системе искусственного очищения крови
Fig.1. General case of systemic connections in biotechnical system for artificial blood purification

Аппаратура искусственного очищения крови зависит от систем подачи и подготовки воды, из которой автоматизированно приготавливается диализирующий раствор, а также от системы слива отработанного раствора. Кроме того, для работы аппарата требуется подключение к сети электропитания. Все это вместе со значительными массогабаритными характеристиками аппаратуры искусственного очищения крови (от 75 кг, 40 × 50 × 150 см) приводит к значительному ограничению мобильности пациента во время лечения.

Для повышения автономности аппаратуры искусственного очищения крови ключевой задачей является создание способа регенерации диализата, который позволит многократно использовать один и тот же объем диализирующего раствора и, соответственно, сделать аппарат независимым от воды, концентратов и модуля приготовления диализата [5]. Современные технологии позволяют миниатюризировать большинство элементов аппарата и снизить их энергопотребление. Это, в свою очередь, позволяет снизить массогабаритные характеристики аппарата и упростить биотехническую систему искусственного очищения крови (рис.2).

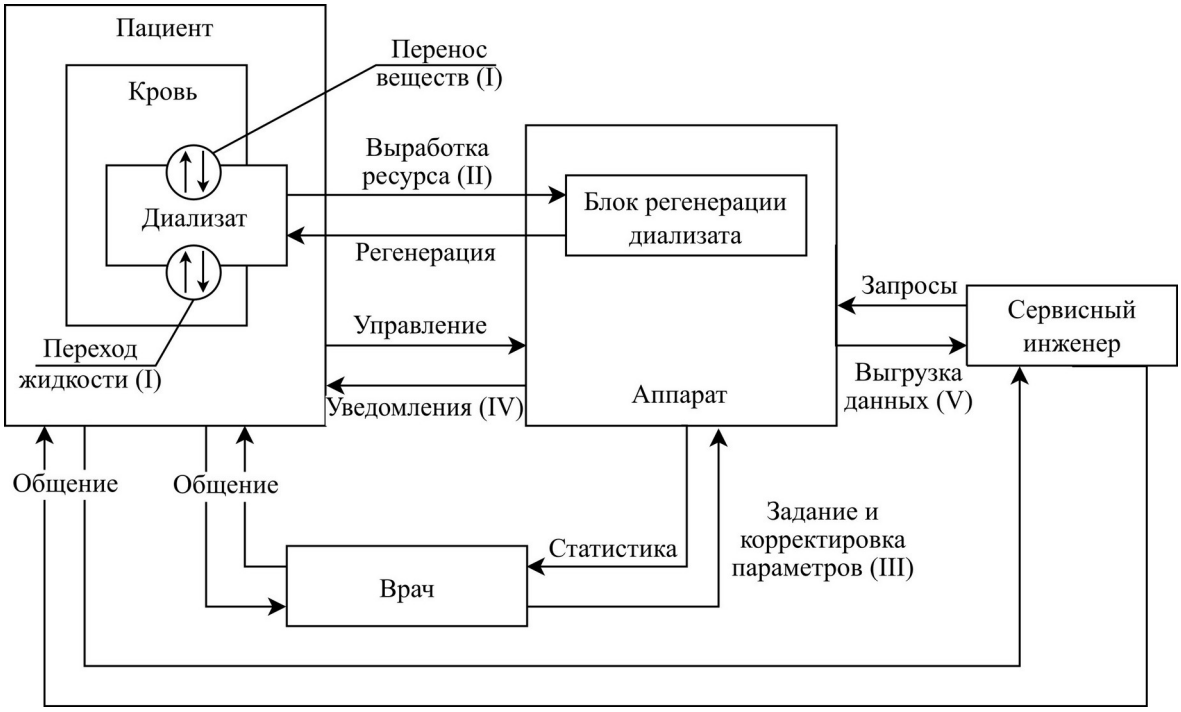


Рис.2. Взаимосвязи в биотехнической системе с автономным носимым аппаратом искусственного очищения крови
Fig.2. Interconnections in biotechnical system with wearable artificial kidney

Блок регенерации диализата позволяет устранить ряд элементов биотехнической системы. Он представляет собой основную составляющую аппарата искусственного очищения крови, однако при этом усиливается взаимосвязь между аппаратом и пациентом. Блок регенерации диализата – это технические средства, восстанавливающие исходный химический состав диализирующего раствора (системная связь II). Для этого необходимо удалять продукты метаболизма, переходящие в него из крови (системная связь I). В табл.1 представлены методы регенерации диализата, их преимущества и недостатки, известные из литературы и подтвержденные в ходе исследований и разработок автономного носимого аппарата искусственного очищения крови.

Таблица 1

Методы регенерации диализата

Table 1

Dialysate regeneration methods

Метод регенерации	Преимущества	Недостатки
Сорбция с применением активированного угля [6, 7]	Хорошая сорбционная емкость по креатинину и мочевой кислоте Пассивность процесса регенерации	Низкая сорбционная емкость по мочевине Изменение pH диализата и его ионного состава
Электролиз [8– 10]	Высокая скорость удаления мочевины Удаление мочевины на протяжении 24 ч и более	Использование платины Изменение pH диализата и его ионного состава Затраты электроэнергии
Применение уреазы [11, 12]	Удаление мочевины Пассивность процесса	Дороговизна Изменение pH диализата и его ионного состава Время работы сорбента 6–8 ч
Термолиз [13]	Высокая скорость удаления мочевины	Значительные массогабаритные характеристики Значительные затраты электроэнергии

Из табл.1 видно, что для удаления мочевины наилучшим образом подходит электролиз. Он позволяет в течение длительного времени разлагать мочевину с постоянной массовой скоростью. В то же время другие низкомолекулярные соединения хорошо удаляются активированным углем. Применение термолиза невозможно ввиду значительных затрат электроэнергии, а применение уреазы – ввиду дорогостоящего производства и ограничения по времени его действия. В связи с этим оптимизация системной связи II направлена на исследование способов снижения негативных свойств электролиза и сорбции. В табл.2 представлены результаты исследования материалов для изготовления электродов электролизера; в табл.3 – результаты обработки активированного угля для нивелирования негативного влияния на pH и ионный состав диализирующего раствора. В качестве методов использованы обработка раствором 0,3 М соляной или 0,3 М лимонной кислоты для удаления продуктов активации угля и электролиз активированного угля в дистиллированной воде (напряжение на электродах 30 В).

Таблица 2

Удельная скорость удаления мочевины методом электролиза на электродах из различных материалов

Table 2

Specific urea mass removal rate for different electrode materials

Материал электрода	Удельная скорость удаления мочевины, мг/см^2/ч
$C_{графит}$	1,47 ± 0,09
C-SiC_{Mo}	1,20 ± 0,11
Ti-$Pt_{вп}$	0,97 ± 0,08
Ti-$SiC_{алм}$	0,16 ± 0,05
Ti-$Rh_{эо}$	0,16 ± 0,05

Примечание: $C_{графит}$ – чистый графит; C-SiC_{Mo} – карбид кремния, допированный молибденом; Ti-$Pt_{вп}$ – титан, покрытый платиной методом взрыв-прокатки; Ti-$SiC_{алм}$ – алмазоподобный карбид кремния; Ti-$Rh_{эо}$ – титан, покрытый родием методом электроосаждения.

Таблица 3

Влияние обработки активированного угля Каусорб-212 на его сорбционные свойства за 6 ч сорбции

Table 3

Effect of different processing methods on Kausorb-212 activated carbon sorption properties (6 h long experiment)

Метод обработки	ΔpH	ΔCa^{2+}, ммоль/л	ΔNa^{+}, ммоль/л	ΔCl^{-}, ммоль/л	$\Delta q_{креат}$, г/кг
Выдержка в соляной кислоте	1,28↑	0,169↓	6,8↓	2,3↑	87,5
Выдержка в лимонной кислоте	1,80↓	0,505↓	1,0↓	0,0	85,3
Электролиз	2,39↑	0,152↓	5,3↓	2,5↓	86,6

*Сорбционная емкость активированного угля по креатинину (т.е. сколько граммов креатинина связывает 1 кг угля)

Как видно из результатов исследований, в качестве материала электродов можно использовать графит, который по своим электрокаталитическим свойствам превосходит платину, при этом более дешев и доступен. В качестве метода обработки активированного угля в равной степени эффективно можно применять метод выдержки в соляной кислоте и электролиз. На основе проведенных исследований осуществлен многокритериальный выбор метода регенерации диализата (табл.4) и разработан способ регенерации диализирующего раствора с помощью автономного носимого аппарата искусствен-

ного очищения крови (рис.3). При многокритериальном выборе применяется следующая формула: F (итоговая оценка) = M_1 (вес 1-го критерия) · f_1 (оценка 1-го критерия) + + $M_2 \cdot f_2 + ... + M_i \cdot f_i$. «Побеждает» тот метод, итоговая оценка которого выше. Значение оценки критерия для каждого метода выбирается в зависимости от его характеристик. Например, если масса блока регенерации мала (<3 кг), то его оценка высокая ($f_1 = 1$), если блок тяжелый (>5 кг), то его оценка низкая ($f_1 = 0$).

Таблица 4

Результаты многокритериального выбора метода регенерации диализата

Table 4

Results of multicriteria approach for choosing a regeneration methods

Критерий	Электро-лиз	Сорбция	Термолиз	Уреаза	Вес критерия	Значение оценки критерия
Масса блока регенерации (+аккумулятор)	3,5 кг	2 кг	>10 кг	2 кг	1,5	$f1 = 1$, M < 3 кг $f1 = 0,5$, 3 ≤ M ≤ 5 кг $f1 = 0$, M > 5 кг
Время работы расходных материалов	>24 ч	<12 ч	>24 ч	6–8 ч	1	$f2 = 1$, t > 12 ч $f2 = 0,5$, 6 ≤ t ≤ 12 ч $f2 = 0$, t < 6 ч
Сложность использования	8	1–2	8	1–2	1	$f3 = 1$, n < 4 $f3 = 0,5$, 4 ≤ n ≤ 8 $f3 = 0$, n > 8
Стоимость процедуры	4000 руб.	1000 руб.	4000 руб.	6000 руб.	1	$f4 = 1$, s < 4000 руб. $f4 = 0,5$, 4000 ≤ s ≤ 4500 руб. $f4 = 0$, s > 4500 руб.
Масса удаленной мочевины	>24 г	0,3 г	>24 г	6 г	3	$f5 = 1$, m > 1 г/ч $f5 = 0,5$, 0,5 ≤ m ≤1 г/ч $f5 = 0$, m < 0,5 г/ч
Изменения ионного состава	±7 %	±7 %	±20 %	±20 %	2,5	$f6 = 1$, d < 10 % $f6 = 0,5$, 10 ≤ d ≤ 15 % $f6 = 0$, d > 15 %
F	8,25	6,5	4,5	6	–	–



Рис.3. Разработанный способ регенерации отработанного диализирующего раствора
Fig.3. Developed method for spent dialysis solution regeneration

Разработанный способ регенерации диализата заключается в отделении низкомолекулярных соединений для удаления в контуре сорбционно-электрохимической регенерации. Средне- и высокомолекулярные соединения удаляются из диализата в контуре рециркуляции в сорбционной колонке с обработанным активированным углем Каусорб-212. На входе в контур рециркуляции проводится фильтрация фибринов, а на выходе – углеродных частичек от активированного угля и электродов.

Особенности построения автономной носимой аппаратуры искусственного очищения крови. В ходе проведенных опытно-конструкторских работ создан опытный образец автономного носимого аппарата искусственного очищения крови. Блок-схема, отражающая его функционал и принцип работы, представлена на рис.4.



Рис.4. Блок-схема автономного носимого аппарата искусственного очищения крови
Fig.4. Wearable artificial kidney diagram

Диализирующий раствор забирается роликовым насосом в экстракорпоральный контур, который разделяется диализатором на контур рециркуляции и контур регенерации. Диализатор обеспечивает разделение веществ: низкомолекулярные вещества (мочевина, креатинин, мочевая кислота и др.) за счет диффузии переходят в контур регенерации и там удаляются из диализата; средне- и высокомолекулярные вещества удаляются в контуре рециркуляции сорбционной колонкой. Такое разделение необходимо для повышения эффективности электролиза. Поскольку в диализаторе под действием конвекции возможен массоперенос среднемолекулярных соединений, предусмотрена система контроля и поддержания нулевого трансмембранного давления. Она заключается в использовании дифференциального датчика давления и регулировании на основе его показаний гидравлического сопротивления магистрали на выходе диализатора с помощью управляемого клапана. Ультрафильтрация осуществляется за счет использования двухходового клапана, который перенаправляет поток диализата из контура рециркуляции в дренажный мешок. Перемещение диализата в контуре регенерации происходит с помощью роликового насоса. Удаление креатинина и мочевой кислоты осуществляется входной сорбционной колонкой, удаление мочевины – электролизером, а удаление продуктов электролиза – выходной сорбционной колонкой и дегазатором. Разработанная концепция построения позволяет отказаться от насоса для введения буферного раствора, поскольку pH диализата стабилизируется примерно при значении 7,4 за счет использования графитовых электродов и предварительной обработки сорбентов.

Таблица 5

Особенности построения элементов автономного носимого аппарата искусственного очищения крови

Table 5

Special aspects of wearable artificial kidney components development

Элемент аппарата	Проблемы	Решение	Примечания
Модуль управления	Разработка алгоритма автоматизированного управления аппаратом не описана в литературе и требует детальной проработки	Детальная проработка концепции построения аппарата и его компонентов	Наличие различных датчиков (давления, температуры и др.) не должно усложнять подключение комплекта магистралей и приводить к удорожанию
Насосный модуль (перистальтические насосы)	Большая масса двигателей и насосных головок	Миниатюризация насосов: использование бесколлекторных двигателей, заказных насосных головок	Насос должен быть пригоден для непрерывной работы
	Неудобство замены насосных сегментов	Насосные сегменты должны быть частью магистрали	Система удобной замены магистрали не должна увеличивать габариты насосного модуля
	Высокий уровень шума	Подбор тихих двигателей и режимов работы Использование звукоизолирующего корпуса	Шум насосов не должен превышать 35 дБ (уровень приглушенного разговора)
Шприцевой насос	Несовершенство методов регенерации вынуждает корректировать pH и ионный состав диализата	Исследование и разработка новых методов регенерации отработанного диализата	Отказ от шприцевого насоса упростит и облегчит аппарат
Аккумуляторная батарея	Большая масса источников тока	Отказ от необязательных активных элементов аппарата позволит уменьшить массу аккумуляторной батареи	Время работы аппарата от аккумулятора должно быть не менее 8 ч
Расходные материалы	Комплект магистралей и элементы регенерации являются отдельными элементами	Сделать комплект магистралей и элементы регенерации единым элементом	Общее количество разъемов комплекта магистралей не должно превышать 4
	Время работы элементов регенерации 4–8 ч.	Необходимо улучшать методы регенерации отработанного раствора для перитонеального диализа	Комплект расходных материалов должен быть рассчитан на работу 24 ч и более
Фильтрующие элементы	Попадание фибриновых нитей из брюшной полости в аппарат Пыление активированного угля Деградация электродов при электролизе	Использование системы фильтров разной степени очистки	Время работы системы фильтров должно быть 24 ч и более
Дисплейный модуль	Управление аппаратом не должно быть связано с манипуляциями с рюкзаком или элементами аппарата	Управление аппаратом должно осуществляться через приложение на смартфоне	Использование смартфона расширяет возможности управления аппаратом

Апробация аппарата позволила выделить особенности (табл.5), которые необходимо учитывать при дальнейшем совершенствовании автономного носимого аппарата искусственного очищения крови.

Все элементы аппарата требуют дальнейшего совершенствования и проработки, однако опытный образец аппарата уже позволил оценить эффективность регенерации отработанного диализирующего раствора как в лабораторных условиях, так и на этапе доклинических исследований.

Заключение. В настоящее время существуют три прототипа автономного носимого аппарата искусственного очищения крови: AWAK (США), WAK (США), WEAKID (Нидерланды). Данные прототипы находятся на стадии клинических испытаний и включены в приоритетные направления развития науки и техники США. Отечественная разработка Renart-PD не уступает по своим характеристикам зарубежным аналогам и является перспективной аппаратурой для заместительной почечной терапии.

Литература

1. ***Tomilina N.A.*** Renal replacement therapy for End Stage Renal Disease in Russian Federation, 2010-2015. Russian National Renal Replacement Therapy Registry Report of Russian Public Organization of Nephrologists «Russian Dialysis Society». Part 1 // Nephrol. Dial. 2018. Vol. 19. No. 4 supplement. P. 1–95.

2. ***Gura V.*** A wearable artificial kidney for patients with end-stage renal disease // JCI Insight. 2016. Vol. 1. No. 8. P. e86397.

3. Wearable artificial kidney and wearable ultrafiltration device vascular access—future directions / ***A.C. Castro, M. Neri, A. Nayak Karopadi et al.*** // Clinical Kidney Journal. 2019. Vol. 12. No. 2. P. 300-307.

4. ***Salani M., Roy S., Fissell IV W.H.*** Innovations in wearable and implantable artificial kidneys // American Journal of Kidney Diseases. 2018. Vol. 72. No. 5. P. 745–751.

5. ***Ronco C., Davenport A., Gura V.*** The future of the artificial kidney: moving towards wearable and miniaturized devices // Nefrologia. 2011. Vol. 31. No. 1. P. 9–16.

6. ***Chang T.M.*** Clinical evaluation of chronic, intermittent, and short term hemoperfusions in patients with chronic renal failure using semipermeable microcapsules (artificial cells) formed from membrane-coated activated charcoal // Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs. 1971. Vol. 17. P. 246–252.

7. ***Yatzidis H.*** Research on extrarenal purification with the aid of activated charcoal // Nephron. 1964. Vol. 1. P. 310–312.

8. ***Wester M.*** Removal of urea in a wearable dialysis device: A reappraisal of electro-oxidation // Artif. Organs. 2014. Vol. 38. No. 12. P. 998-1006.

9. ***Urbańczyk E., Sowa M., Simka W.*** Urea removal from aqueous solutions – a review // Journal of Applied Electrochemistry. 2016. Vol. 46. No. 10. P. 1011–1029.

10. ***Hernández M.C., Russo N., Panizza M., Spinelli P., Fino D.*** Electrochemical oxidation of urea in aqueous solutions using a boron-doped thin-film diamond electrode // Diamond and Related Materials. 2014. Vol. 44. P. 109–116.

11. Urea removal strategies for dialysate regeneration in a wearable artificial kidney / ***M.K. van Gelder, J.A. Jong, L. Folkertsma et al.*** // Biomaterials. 2020. Vol. 234. P. 119735.

12. Recirculating peritoneal dialysis system using urease-fixed silk fibroin membrane filter with spherical carbonaceous adsorbent / ***M.T. Sultan, B.M. Moon, J.W. Yang et al.*** // Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 97. P. 55-66.

13. Способ очистки диализирующего раствора в аппарате «искусственная почка» / М.В. Гринвальд, Г.А. Залко, Ю.Н. Михайлов и др. // Патент РФ № 2008927 С1, 1994 // Открытия, изобретения. 1994. № 5.

Поступила 03.02.2020 г.; после доработки 03.02.2020 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Базаев Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), bazaev-na@ya.ru

References

1. Tomilina N.A. Renal replacement therapy for End Stage Renal Disease in Russian Federation, 2010-2015. Russian National Renal Replacement Therapy Registry Report of Russian Public Organization of Nephrologists «Russian Dialysis Society». Part 1. *Nephrol. Dial.,* 2018, vol. 19, no. 4 supplement, pp. 1–95.

2. Gura V. A wearable artificial kidney for patients with end-stage renal disease. *JCI Insight.,* 2016, vol. 1, no. 8, p. e86397.

3. Castro A.C., Neri M., Nayak Karopadi A., Lorenzin A., Marchionna N., Ronco C. Wearable artificial kidney and wearable ultrafiltration device vascular access—future directions. *Clinical Kidney Journal,* 2019, vol. 12, no. 2, pp. 300–307.

4. Salani M., Roy S., Fissell IV W.H. Innovations in wearable and implantable artificial kidneys. *American Journal of Kidney Diseases,* 2018, vol. 72, no. 5, pp. 745–751.

5. Ronco C., Davenport A., Gura V. The future of the artificial kidney: moving towards wearable and miniaturized devices. *Nefrologia*, 2011, vol. 31, no. 1, pp. 9–16.

6. Chang T.M. Clinical evaluation of chronic, intermittent, and short term hemoperfusions in patients with chronic renal failure using semipermeable microcapsules (artificial cells) formed from membrane-coated activated charcoal. *Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs.*, 1971, vol. 17, pp. 246–252.

7. Yatzidis H. Research on extrarenal purification with the aid of activated charcoal. *Nephron*, 1964, vol. 1, pp. 310–312.

8. Wester M. Removal of urea in a wearable dialysis device: A reappraisal of electro-oxidation. *Artif. Organs,* 2014, vol. 38, no. 12, pp. 998-1006.

9. Urbańczyk E., Sowa M., Simka W. Urea removal from aqueous solutions–a review. *Journal of Applied Electrochemistry,* 2016, vol. 46, no. 10 pp. 1011–1029.

10. Hernández M. C., Russo N., Panizza M., Spinelli P., Fino D. Electrochemical oxidation of urea in aqueous solutions using a boron-doped thin-film diamond electrode. *Diamond and Related Materials,* 2014, vol. 44, pp. 109–116.

11. van Gelder M. K., Jong J. A., Folkertsma L., Guo Y., Blüchel C., Verhaar M. C., Gerritsen K. G. Urea removal strategies for dialysate regeneration in a wearable artificial kidney. *Biomaterials*, 2020 vol. 234, p. 119735.

12. Sultan M.T., Moon B.M., Yang J.W., Lee O.J., Kim S.H., Lee J.S., Park C.H. Recirculating peritoneal dialysis system using urease-fixed silk fibroin membrane filter with spherical carbonaceous adsorbent. *Materials Science and Engineering,* 2019., vol. 97, pp. 55–66.

13. Grinval'd V.M., Zalko G.A., Mihajlov Ju.N., Podgaeckij V.M., Svidchenko V.F., Strelkin A.G., Semin V.N., Sjulaev A.S. Method of purifying dialyzing solution in apparatus «artificial kidney». Patent RU 2 008 927 C1, 1994. *Otkrytija, izobretenija* = Opening, inventions,1994, no. 5 (in Russian).

Received 03.02.2020; Revised 03.02.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the author:

Nikolai A. Bazaev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bazaev-na@ya.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.932.2+519.688 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-265-276**

Метод трехмерной реконструкции сцены в относительных координатах по двум изображениям с неоткалиброванных видеокамер

К.М. Шепилова[1,2], А.В. Сотников[1,2], А.В. Шипатов[1,2], Ю.В. Савченко[1,2]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр», г. Москва, Россия

kris.shepilova@gmail.com

Известные методы решения задачи стереозрения – трехмерной реконструкции сцены – предполагают трудоемкий процесс предварительной калибровки камер. В работе представлен подход к решению поставленной задачи, не требующий калибровки. Проанализированы методы расчета фундаментальной матрицы. Рассмотрен алгоритм триангуляции, позволяющий оценить трехмерную относительную позицию точки на основе обработки стереопары. Предложен метод оценки трехмерных координат. Вычисление фундаментальной матрицы проведено на основе сопоставления особых точек. Для их определения использован алгоритм SIFT, позволяющий зафиксировать достаточное количество достоверных особых точек на паре изображений. Для нахождения трехмерных координат выполнена программная реализация полиномиального алгоритма триангуляции, который гарантированно дает решение задачи поиска глобального минимума расстояния между исходными и аппроксимированными точками. Так как он не является итеративным, то при выполнении характеризуется достаточно большим быстродействием. Координаты точек имеют абстрактные величины, и оценивается только их относительное расположение, что исключает необходимость калибровки камер. Математический подход, используемый в алгоритме, позволяет построить корректную трехмерную структуру объекта.

Ключевые слова: трехмерная реконструкция; неоткалиброванные камеры; особые точки; триангуляция

© К.М. Шепилова, А.В. Сотников, А.В. Шипатов, Ю.В. Савченко, 2020

Для цитирования: Шепилова К.М., Сотников А.В., Шипатов А.В., Савченко Ю.В. Метод трехмерной реконструкции сцены в относительных координатах по двум изображениям с неоткалиброванных видеокамер // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 265–276. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-265-276

3D Scene Reconstruction Method in Relative Coordinates with Two Images from Non-Calibrated Video Cameras

K.M. Shepilova[1,2], A.V. Sotnikov[1,2], A.V. Shipatov[1,2], Yu.V. Savchenko[1,2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]JSC «Zelenograd Innovation and Technology Center», Moscow, Russia

kris.shepilova@gmail.com

Abstract: The well-known methods of solving the problem of stereovision called three-dimensional scene reconstruction assume a time-consuming process of preliminary calibration of cameras. In the paper, an approach to solving the formulated problem, not requiring calibration, has been presented. The methods of calculating the fundamental matrix have been analyzed. The triangulation algorithm, which permits to evaluate the three-dimensional relative position of the point, based on processing of a stereo pair, has been considered. A method for estimating three-dimensional coordinates has been proposed. The calculation of a fundamental matrix has been performed based on a comparison of keypoints. To determine them, the SIFT algorithm, which permits us to fix a sufficient number of reliable special points on a pair of images, has been used. For calculation of the three-dimensional coordinates a software implementation of the polynomial triangulation algorithm has been performed. This guarantees that the solution of the problem of searching the global minimum of the distance between the source and approximated points will be found. Since it is not iterative, then during realization it is characterized by a relatively high performance. The coordinates of the points have abstract values, and only their relative location is estimated, which excludes the necessity of cameras calibration. The mathematical approach used in the algorithm makes it possible to reconstruct the correct three-dimensional structure of an object.

Keywords: 3D-reconstruction; non-calibrated cameras; singular points; triangulation

For citation: Shepilova K.M., Sotnikov A.V., Shipatov A.V., Savchenko Yu.V. 3D scene reconstruction method in relative coordinates with two images from non-calibrated video cameras. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 265–276. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3- 265-276

Введение. В настоящее время в области компьютерного зрения возникла необходимость решения задачи трехмерной реконструкции наблюдаемой сцены по ее изображениям. Трехмерная реконструкция может применяться в робототехнике, так как позволяет роботу ориентироваться в пространстве, обходить препятствия и понимать, как далеко находится цель; для построения карт местности в картографии; для определения особенностей поверхностей в медицине и в других областях, где требуется информация

о трехмерной структуре объектов. Существует несколько подходов к решению данной задачи: освещение объектов с разных углов и анализ отражения света [1, 2]; анализ серии снимков объекта, полученных с разных фокусных расстояний [3, 4]; активное сканирование с помощью лазера (лидара) или проецируемой сетки [5]; стереосопоставление, т.е. сравнение между собой пар снимков объекта (полученных с помощью нескольких камер или нескольких точек наблюдения [6]).

Метод сопоставления является наиболее распространенным. Он уже достиг максимально возможной точности и продолжает развиваться в плане увеличения скорости работы, но все еще имеет определенные ограничения. Одно из них – необходимость предварительной калибровки камер, требующей дополнительных затрат времени и вычислительных ресурсов. Кроме того, большинство алгоритмов анализируют стереопары по всей области изображения и в результате дают полную карту глубины, что также требует большой вычислительной нагрузки.

В настоящей работе предлагается метод оценки трехмерных координат с помощью обработки стереоизображений с неоткалиброванных видеокамер. Данный подход не требует трудоемкого анализа стереопар по всем пикселям и основан на полиномиальном методе триангуляции.

Использование стереоизображений для получения трехмерных координат. Под стереоизображениями (стереопарами) понимаются пары изображений, снятых с ракурсов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

На рис.1 изображена одна и та же сцена, но границы объектов и их точки смещены. Такой эффект называется «параллакс» (от греч. *parallaxis* – уклонение) – кажущееся перспективное смещение рассматриваемого объекта, вызванное изменением точки наблюдения. Если посмотреть на окружающие предметы сначала одним глазом, потом другим, то можно увидеть, что одни и те же объекты немного смещаются друг относительно друга (рис.2). Параллакс дает возможность получить представление о взаимном расположении объектов, которое и используется в стереозрении.

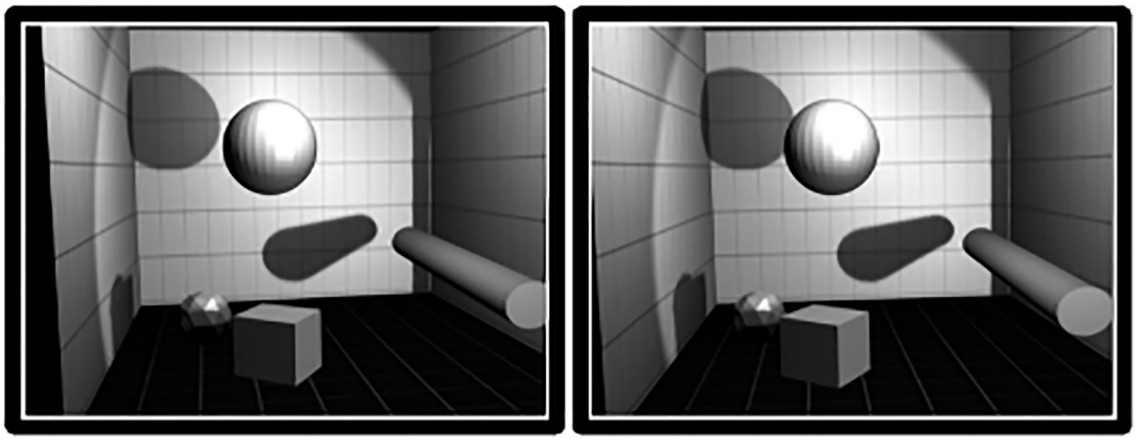


Рис.1. Пример стереопары
Fig.1. An example of a stereo pair

Для получения информации о расположении объекта в трехмерном пространстве, представленного набором точек на изображении, выполняется анализ стереопары: определяются параметры взаимного расположения камер и их внутренние характеристики; устраняются искажения, вносимые камерами; выравниваются изображения между собой по оси y и определяется разница между x-координатами. Данный подход позволяет

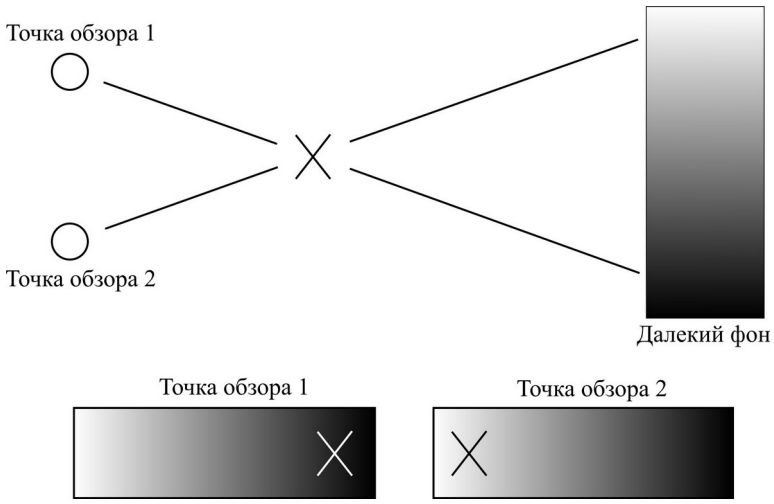


Рис.2. Эффект параллакса
Fig.2. The parallax effect

вычислить карту глубин сцены с точностью до вычислительных погрешностей алгоритма. Но при этом необходимо проведение трудоемкого процесса калибровки камер, что требует дополнительных инструментов и временны́х затрат. Рассмотрим трехмерную реконструкцию сцены без калибровки камер, т. е. когда отсутствует информация об их метрических характеристиках, таких как фокусное расстояние, смещение оптического центра, взаимное расположение камер и т.д. Поэтому результаты будут получены в относительных координатах. Алгоритм восстановления трехмерной сцены по стереоизображениям следующий: 1) формирование стереопары; 2) поиск фундаментальной матрицы, связывающей точки двух изображений стереопары; 3) определение векторов смещения точек изображения; 4) преобразование двумерных точек изображения в трехмерные относительные координаты – триангуляция с применением полиномиального алгоритма.

Этап формирования стереопары опустим, так как изображения фиксируются достаточно просто через две близко расположенные камеры, оптические оси которых примерно параллельны.

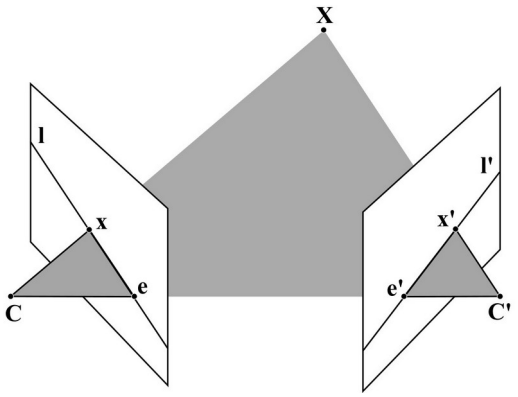


Рис.3. Основные объекты эпиполярной геометрии
Fig.3. The main objects of epipolar geometry (points **x** and **x'** – projections of **X** in two views. The line connecting the centers **C** and **C'** of two cameras intersects the image planes at two points called epipolar points (epipoles) **e** and **e'**. Lines **l** and **l'** are called epipolar lines)

Поиск фундаментальной матрицы. Фундаментальная матрица – основное понятие, используемое при вычислении трехмерных координат в эпиполярной геометрии, которая появилась как результат применения проективной геометрии к задаче стереозрения. На рис.3 показаны основные объекты эпиполярной геометрии. Точки **x** и **x'** – проекции **X** в двух видах. Линия, соединяющая центры двух камер **C** и **C'**, пересекает плоскости изображений в двух точках **e** и **e'**, называемых эпиполярными точками (эпиполюсами). Прямые **l** и **l'** называются эпиполярными прямыми.

Исходя из определения существует такая матрица **F** (фундаментальная матрица)

размера 3×3, что пара двумерных точек **x**, **x'**, заданных в однородных координатах, является стереопарой тогда и только тогда, когда выполняется равенство

$$\mathbf{x'}^T\mathbf{F}\mathbf{x} = 0. \quad (1)$$

Трехмерная точка **X**, принадлежащая некоторому объекту, и два центра проецирования **C**, **C'** (точки, в которых расположены видеокамеры) задают эпиполярную плоскость. Пересечение этой плоскости с плоскостями изображений – эпиполярные линии **l**, **l'**. Причем для каждой пары точек изображений **x**, **x'** существует соответствующая пара линий **l'**, **l**, которые вычисляются по формулам:

$$\mathbf{F}\mathbf{x} = \mathbf{l'}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}^T\mathbf{x'} = \mathbf{l}. \quad (3)$$

Эпиполюсы удовлетворяют уравнениям

$$\mathbf{F}\mathbf{e} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{e'}^T\mathbf{F} = 0. \quad (5)$$

Существует алгоритм, позволяющий оценить фундаментальную матрицу по набору пар соответствующих точек изображений. Для вычисления фундаментальной матрицы использована реализация данного алгоритма из библиотеки OpenCV [7].

В качестве точек интереса, как правило, используются особые точки, т.е. наиболее различимые участки изображения, которые имеют в своей окрестности наибольшую разницу значений интенсивности или цвета между центральным пикселем и соседними пикселями (рис.4).

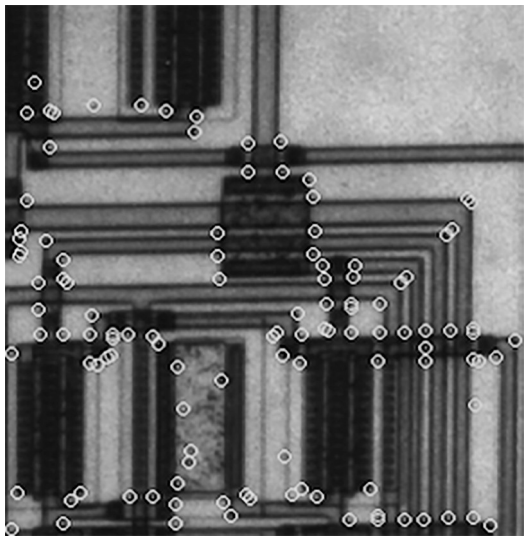


Рис.4. Пример определения особых точек
Fig.4. Definition of keypoints example

Наиболее распространенными алгоритмами поиска и описания особых точек являются SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [8] и SURF (Speeded up Robust Features) [9]. Для нахождения соответствия между найденными особыми точками используется дескриптор, содержащий информацию о градиентах пикселей в окрестности особой точки изображения, но для каждого алгоритма формирующийся по-своему.

На точность работы алгоритма оценки трехмерных координат значительно влияют погрешности вычисления фундаментальной матрицы, которые находятся в обратной зависимости от количества достоверно найденных особых точек. Алгоритм SURF имеет бóльшую скорость работы, чем SIFT. Однако результаты работы последнего содержат больше найденных особых точек за счет более сложной вычислительной процедуры. Поэтому выбор сделан в пользу алгоритма SIFT. На рис.5 показано, что алгоритм находит как правильные соответствия точек, так и ошибочные. Поэтому после нахождения соответствий в дальнейшем точки проходят дополнительный отбор.

Когда есть набор пар точек и фундаментальная матрица, можно применять алгоритм триангуляции.

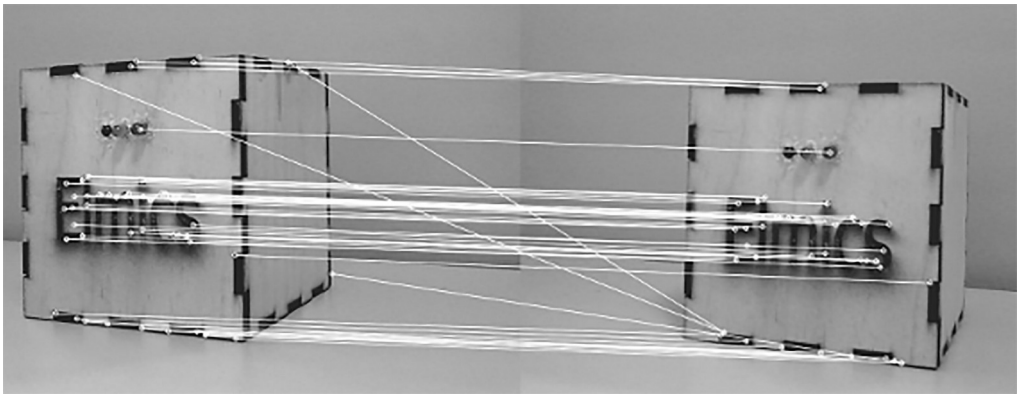


Рис.5. Пример сопоставления особых точек, найденных методом SIFT
Fig.5. An example of matching local features found by the SIFT method

Полиномиальный алгоритм триангуляции. В работе [10] полиномиальный алгоритм представлен как оптимальный метод оценки трехмерных координат. Его суть состоит в поиске глобального минимума целевой функции, характеризующей расстояния между проекциями на плоскости изображений исходной точки $\mathbf{X}$ и приближенной алгоритмом трехмерной точки $\hat{\mathbf{X}}$.

Допустим, необходимо определить дальность до трехмерной точки $\mathbf{X}$, которая имеет на изображениях стереопары проекции $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$. Из-за погрешностей полиномиального метода можно найти лишь приближенное значение координат $\mathbf{X}$. Обозначим приближенную точку $\hat{\mathbf{X}}$. Чтобы убедиться, что это действительно корректно найденная точка, следует выполнить обратную процедуру и спроецировать $\hat{\mathbf{X}}$ на исходную стереопару. Приближенные двумерные точки назовем $\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{x}}'$. Расстояния между точками $\mathbf{x}$ и $\hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{x}'$ и $\hat{\mathbf{x}}'$ обозначим d и d' соответственно. Они будут показывать, насколько точно оценены значения координат точки $\mathbf{X}$. Очевидно, что чем меньше расстояния между исходными и приближенными двумерными парами точек, тем точнее результат приближения – трехмерная точка $\hat{\mathbf{X}}$ (рис.6).

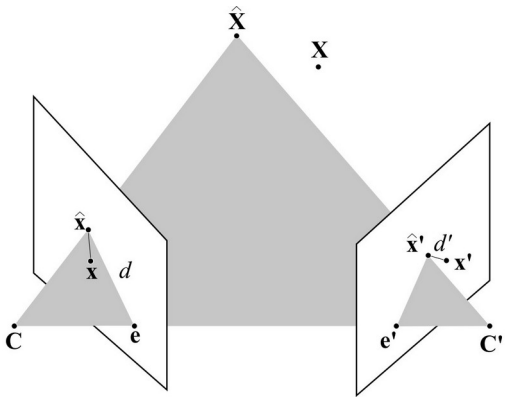


Рис.6. Проекции аппроксимированной трехмерной точки $\hat{\mathbf{X}}$ на плоскости изображений [10]
Fig.6. Projections of an approximated three-dimensional point $\hat{\mathbf{X}}$ onto the image planes [10]

Полиномиальный алгоритм предлагает метод оценки трехмерной точки $\hat{\mathbf{X}}$ путем минимизации отклонений d и d', полученных как евклидовы расстояния между приближенными двумерными точками $\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{x}}'$ и соответствующими исходными точками на изображениях $\mathbf{x}$, $\mathbf{x}'$:

$$C(\hat{\mathbf{x}},\hat{\mathbf{x}}')=d(\mathbf{x},\hat{\mathbf{x}})^2+d(\mathbf{x}',\hat{\mathbf{x}}')^2\rightarrow\min, \qquad (6)$$

где $C(\hat{\mathbf{x}},\hat{\mathbf{x}}')$ – целевая функция, характеризующая степень близости исходных точек стереопары и точек, аппроксимированных алгоритмом.

Точки $\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{x}}'$, найденные из выражения (6), должны удовлетворять равенству

$$\hat{\mathbf{x}}'^{T}\mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}=0. \qquad (7)$$

Любая пара точек, удовлетворяющих выражению (7), должна лежать на соответствующих эпиполярных линиях: $\hat{\mathbf{x}}$ – на $\mathbf{l}$, $\hat{\mathbf{x}}'$ – на $\mathbf{l}'$. При этом любая пара точек, лежащих на линиях $\mathbf{l}$ и $\mathbf{l}'$, удовлетворяет равенству (7). В частности, это справедливо для точки $\mathbf{x}_\perp$, лежащей на $\mathbf{l}$ ближе всего к точке $\mathbf{x}$, и $\mathbf{x}'_\perp$, лежащей на $\mathbf{l}'$ ближе всего к $\mathbf{x}'$. Такими ближайшими точками, лежащими на прямых $\mathbf{l}$ и $\mathbf{l}'$, являются основания перпендикуляров, опущенных из точек $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$ на прямые $\mathbf{l}$ и $\mathbf{l}'$ соответственно. Следовательно, можно определить $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_\perp$, $\hat{\mathbf{x}}' = \mathbf{x}'_\perp$ (рис.7).

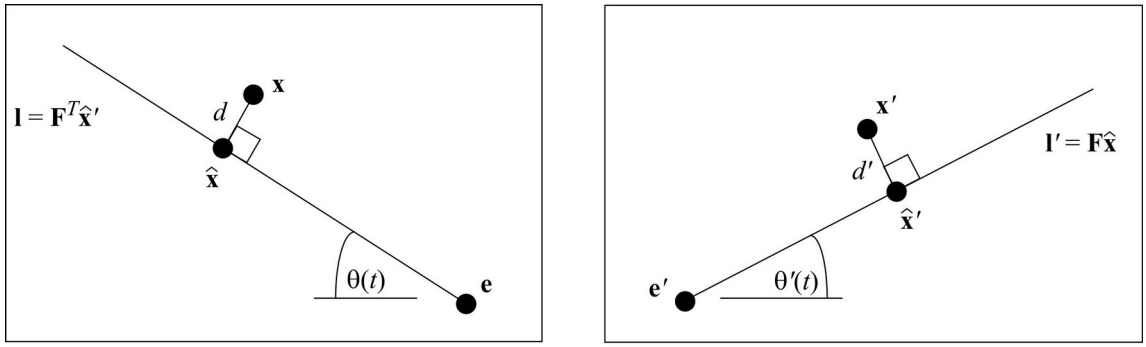


Рис.7. Определение минимального расстояния между $\mathbf{x}$ и $\mathbf{l}$ (*а*), $\mathbf{x}'$ и $\mathbf{l}'$ (*б*) [10]
Fig.7. Estimation of the minimum distance between $\mathbf{x}$ and $\mathbf{l}$ (*a*), $\mathbf{x}'$ and $\mathbf{l}'$ (*b*) [10]

Запишем $d(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = d(\mathbf{x}, \mathbf{l})$, где $d(\mathbf{x}, \mathbf{l})$ – расстояние от точки $\mathbf{x}$ до прямой $\mathbf{l}$. Аналогично $d(\mathbf{x}', \hat{\mathbf{x}}') = d(\mathbf{x}', \mathbf{l}')$, где $d(\mathbf{x}', \mathbf{l}')$ – расстояние от точки $\mathbf{x}'$ до прямой $\mathbf{l}'$. Тогда выражение (6) будет иметь вид

$$C(\mathbf{l}, \mathbf{l}') = d(\mathbf{x}, \mathbf{l})^2 + d(\mathbf{x}', \mathbf{l}')^2. \tag{8}$$

Для использования (8) в качестве целевой функции введем переменную t как параметр для $\mathbf{l}$, $\mathbf{l}'$. Параметризованная эпиполярная прямая $\mathbf{l}(t)$ проходит через точку с координатами, зависящими от t. Прямую $\mathbf{l}'(t)$, соответствующую данной точке, вычислим по формуле (2) . Таким образом,

$$\min_{\mathbf{x}} C = d(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})^2 + d(\mathbf{x}', \hat{\mathbf{x}}')^2 = \min_{t} C = d(\mathbf{x}, \mathbf{l}(t))^2 + d(\mathbf{x}', \mathbf{l}'(t))^2. \tag{9}$$

Основываясь на приведенных рассуждениях, выделим основные шаги предложенного алгоритма:

1. Параметризация эпиполярной линии первого изображения переменной t – $\mathbf{l}(t)$.
2. Вычисление эпиполярной линии второго изображения $\mathbf{l}'(t)$ с помощью фундаментальной матрицы $\mathbf{F}$.
3. Оценка близости исходных и аппроксимированных точек как функции от t (9).
4. Поиск глобального минимума заданной функции по переменной t.

Полагая, что эпиполюсы $\mathbf{e} = (1,0,f)^T$ и $\mathbf{e}' = (1,0,f')^T$, и подставляя эти значения в выражения (4) и (5), решим полученную систему уравнений. В результате приходим к следующему виду матрицы $\mathbf{F}$:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} ff'd & -f'c & -f'd \\ -fb & a & b \\ -fd & c & d \end{pmatrix}, \tag{10}$$

где a, b, c, d, f, f' – численные параметры.

Рассмотрим эпиполярную линию **l**, проходящую через точку $(0, t, 1)^T$ и эпиполюс $(1, 0, f)^T$:

$$\mathbf{l}(t) = (0, t, 1) \times (1, 0, f) = (tf, 1, -t), \tag{11}$$

$$\mathbf{l}'(t) = \mathbf{F}\,(0, t, 1)^T = (-f'(ct+d), at+b, ct+d)^T. \tag{12}$$

Следовательно, функция оценки расстояния имеет вид

$$s(t) = d(\mathbf{x}, \mathbf{l}) + d(\mathbf{x}', \mathbf{l}') = \frac{t^2}{1+f^2t^2} + \frac{(ct+d)^2}{(at+b)^2 + f'^2(ct+d)^2}. \tag{13}$$

Для нахождения минимума $s(t)$ необходимо приравнять производную этой функции к нулю. После преобразований числитель производной примет вид полинома, который можно записать как функцию $g(t)$:

$$g(t) = t((at+b)^2 + f'^2(ct+d)^2)^2 - (ad-bc)\,(1+f^2t^2)^2\,(at+b)\,(ct+d). \tag{14}$$

Данный полином шестой степени, поэтому корней будет шесть. Подстановка найденного значения параметра t в (11) и (12) позволяет найти эпиполярные линии, которым принадлежат искомые оценки точек.

Приведем подробный алгоритм аппроксимации трехмерной точки $\hat{\mathbf{X}}$.

Шаг 1. Определить матрицы преобразований:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x \\ 0 & 1 & -y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \mathbf{T}' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x' \\ 0 & 1 & -y' \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Это матрицы параллельных переносов, которые перемещают $\mathbf{x} = (x, y, 1)^T$ и $\mathbf{x}' = (x', y', 1)^T$ в начало соответствующих систем координат.

Шаг 2. Заменить предварительно оцененную **F** на произведение $\mathbf{T}'^{-T}\,\mathbf{F}\mathbf{T}^{-1}$. Новая фундаментальная матрица соответствует смещенным системам координат.

Шаг 3. Вычислить правый $\mathbf{e} = (e_1, e_2, e_3)^T$ и левый $\mathbf{e}' = (e'_1, e'_2, e'_3)^T$ эпиполюсы, которые удовлетворяют (4) и (5). Нормализовать **e** посредством масштабирования так, чтобы $e_1^2 + e_2^2 = 1$, и сделать то же самое для **e'**.

Шаг 4. Сформировать матрицы поворота:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} e_1 & e_2 & 0 \\ -e_2 & e_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \mathbf{R}' = \begin{pmatrix} e'_1 & e'_2 & 0 \\ -e'_2 & e'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Заметим, что $\mathbf{Re} = (1, 0, e_3)^T$ и $\mathbf{R'e'} = (1, 0, e'_3)^T$.

Шаг 5. Заменить **F** произведением $\mathbf{R'FR}^T$.

Шаг 6. После произведенных преобразований матрица **F** будет иметь форму (10). Примем $f = e_3$, $f' = e'_3$, $a = F_{22}$, $b = F_{23}$, $c = F_{32}$ и $d = F_{33}$.

Шаг 7. Сформировать полином (14) с учетом параметров, найденных на шаге 6, и вычислить его корни.

Шаг 8. Подставить действительные значения корней полинома $g(t)$ в (13). Найти асимптотическое значение для (13) при $t = \infty$:

$$s(\infty) = \frac{1}{f^2} + \frac{c^2}{a^2 + f'^2c^2}. \tag{17}$$

Принять за $t_{\min}$ такое действительное значение t из шести возможных и рассчитанного по (17), при котором значение функции оценки $s(t)$ минимально.

Шаг 9. Подставить найденный $t_{\min}$ в векторы (11) и (12), соответствующие эпиполярным линиям $\mathbf{l}(t)$ и $\mathbf{l}'(t)$, и таким образом найти $\hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{x}}'$ как ближайшие к этим линиям точки. Для прямой общего вида, заданной вектором в однородных координатах (λ, μ, ν), ближайшую к ней точку можно представить как $(-\lambda\nu, -\mu\nu, \lambda^2 + \mu^2)$.

Шаг 10. Сделать обратное преобразование полученных точек $\hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{x}}'$ к исходным координатам посредством вычисления произведений $\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}^T\hat{\mathbf{x}}$ и $\mathbf{T}'^{-1}\mathbf{R}'^T\hat{\mathbf{x}}'$ соответственно.

Шаг 11. Выполнить оценку трехмерной точки, решив систему линейных уравнений $\mathbf{AX} = 0$. Матрица $\mathbf{A}$ формируется на основе проективных матриц $\mathbf{P}$, $\mathbf{P}'$, которые определяются по формулам $\mathbf{x} = \mathbf{PX}$, $\mathbf{x}' = \mathbf{P}'\mathbf{X}$ соответственно:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1\mathbf{p}^{3T} - \mathbf{p}^{1T} \\ x_2\mathbf{p}^{3T} - \mathbf{p}^{2T} \\ x'_1\mathbf{p}'^{3T} - \mathbf{p}'^{1T} \\ x'_2\mathbf{p}'^{3T} - \mathbf{p}'^{2T} \end{pmatrix}, \tag{18}$$

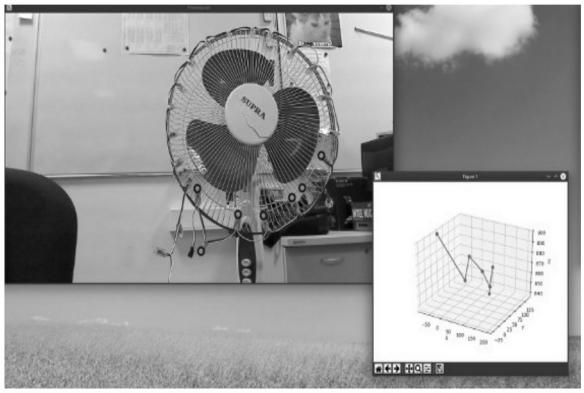
где $\mathbf{p}^{1T}$, $\mathbf{p}^{2T}$, $\mathbf{p}^{3T}$ – строки $\mathbf{P}$; $\mathbf{p}'^{1T}$, $\mathbf{p}'^{2T}$, $\mathbf{p}'^{3T}$ – строки $\mathbf{P}'$; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, 1)$ и $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, 1)$.

Шаг 12. Перевести оценку трехмерной точки $\hat{\mathbf{X}}$ из однородных координат в декартовы: $(x, y, z, w) \rightarrow (x/w, y/w, z/w)$.

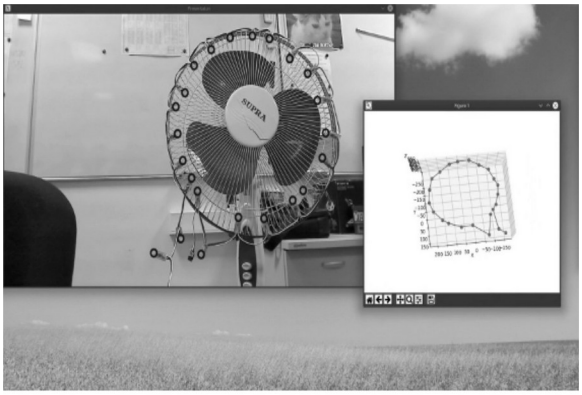
Точка $\hat{\mathbf{X}}$, найденная в результате выполнения данного алгоритма, является искомым приближением реальной точки $\mathbf{X}$.



а



б



в

Рис.8. Работа алгоритма трехмерной реконструкции объекта: *а* – начало работы; *б* – построение первых точек на пространственном графике; *в* – результат работы алгоритма – полученная трехмерная структура объекта

Fig.8. Operation of the three-dimensional object reconstruction algorithm: *a* – the initial state; *b* – the formation of the first points on the spatial graph; *c* – the result of the algorithm – three-dimensional structure of the object

В качестве примера восстановим трехмерную сцену, содержащую некоторый объект с расположенными на его поверхности светодиодами. Каждый светодиод включается по очереди. При его включении алгоритм фиксирует координаты центров его изображений на стереопаре. Найденные координаты являются входными данными рассмотренного алгоритма. Результатом его работы являются оцененные трехмерные точки, образующие ломаную линию, повторяющую форму предмета. На рис.8 показан результат работы алгоритма.

При сравнении реальной формы предмета с представленной на графике ломаной линией можно сделать вывод о том, что алгоритм правильно восстановил объемную структуру объекта в относительных координатах.

Заключение. Решена задача трехмерной реконструкции сцены в относительных координатах по двум изображениям. Реконструкция осуществлена посредством выбора соответствующих точек стереопары и вычисления на их основе трехмерных координат с помощью одного из алгоритмов триангуляции. Метод не предполагает трудоемкого процесса предварительной калибровки камер. Структура объекта в относительных координатах построена корректно.

Алгоритм может использоваться как для выполнения трехмерной реконструкции сцены, так и для построения 3*D*-моделей объектов реального мира, а также при решении задачи автономной навигации роботов в пространстве в реальном времени.

В дальнейшем предполагается повышение точности алгоритма посредством выбора другого метода нахождения особых точек, дающего еще больше корректных соответствий, а также расширение его возможностей за счет упрощенной калибровки для получения трехмерной модели объекта не в относительных, а в абсолютных координатах.

Литература

1. ***Morel O., Stolz C., M´eriaudeau F., Gorria P.*** Active lighting applied, to 3D reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging // Journal of Optics, a Pure and Applied Optics. 2006. No. 45 (17). P. 4062–4068.

2. ***d'Angelo P., Wohler C.*** 3D surface reconstruction based on combined analysis of reflectance and polarisation properties // Proc. SPIE 5856 «Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV» (13 June 2005). 2005. DOI: 10.1117/12.612545

3. 3D Reconstruction based on light field information / ***Yan Zhou, Huiwen Guo, Ruiqing Fu et al.*** // 2015 IEEE International Conference on Information and Automation. 2015. P. 976–981. DOI: 10.1109/ICInfA.2015.7279428

4. ***Hasinoff S.W.*** 3D reconstruction from finite-aperture lenses // PhD. Depth Oral Report, Hasinoffcs.Toronto.edu, 2006.

5. Efficient pedestrian scanning by active scan LIDAR / ***Taiki Yamamoto, Yasutomo Kawanishi, Ichiro Ide et al.*** // International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT). Nagoya University Graduate School of Informatics Aichi, Japan. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/IWAIT.2018.8369664.

6. ***Jingchao Li, Zhenjiang Miao, Xiangqian Liu, Yanli Wan.*** 3D reconstruction based on stereovision and texture mapping // Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China, 2010. P. 1–6.

7. ***Bradski G., Kaehler A.*** Learning OpenCV. O'Reilly Media, Inc., Sebostopol, CA, 2008. 571 p.

8. ***Lowe D.G.*** Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60. No. 2. P. 91–110.

9. ***Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L.*** SURF: Speeded Up Robust Features // ECCV (1). 2006. P. 404–417.

10. ***Hartley R., Zisserman A.*** Multiple view geometry in computer vision // Cambridge University Press. 2003. 673 p.

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.; после доработки 24.12.2019 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Шепилова Кристина Максимовна – студентка Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8), kris.shepilova@gmail.com

Сотников Александр Васильевич – инженер НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8), 100av@olvs.miee.ru

Шипатов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина, начальник отдела НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), начальник отдела АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8), avsh@mail.ru

Савченко Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина, заместитель главного конструктора НИИ вычислительных средств и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), заместитель генерального директора, начальник отделения по разработке изделий специального назначения АО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8), sas@olvs.miee.ru

References

1. Morel O., Stolz C., M´eriaudeau F., Gorria P. Active lighting applied, to 3D reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging. *Journal of Optics, A Pure and Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 17, p. 4062–4068.

2. d'Angelo P., Wohler C. 3D surface reconstruction based on combined analysis of reflectance and polarisation properties. *Proc. SPIE 5856, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV.* 2005. DOI: 10.1117/12.612545

3. Yan Zhou, Huiwen Guo, Ruiqing Fu, Guoyuan Liang, Can Wang, Xinyu Wu. 3D reconstruction based on light field information. *Conference: 2015 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. 2015, pp. 976–981. DOI: 10.1109/ICInfA.2015.7279428

4. Samuel W. Hasinoff. *3D reconstruction from finite-aperture lenses*. Ph.D. Depth Oral Report, hasinoffcs.toronto.edu, 2006.

5. Taiki Yamamoto, Yasutomo Kawanishi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Fumito Shinmura, Daisuke Deguchi. Efficient pedestrian scanning by active scan LIDAR. *International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Nagoya University Graduate School of Informatics Aichi, Japan. 2018. pp. 1–4. DOI: 10.1109/IWAIT.2018.8369664

6. Jingchao Li, Zhenjiang Miao, Xiangqian Liu, Yanli Wan. 3D reconstruction based on stereovision and texture mapping. *Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University*, 100044, Beijing, China, 2010. pp. 1–6.

7. Gary Bradski, Adrian Kaehler. *Learning OpenCV*, O'Reilly Media, Inc., Sebostopol, CA, 2008. 571 p.

8. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 60, no. 2. pp. 91–110.

9. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features. *ECCV* (1), 2006, pp. 404–417.

10. Hartley R., Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision.* Cambridge University Press, 2003, 673 p.

Received 24.12.2019; Revised 24.12.2019; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Kristina M. Shepilova – Student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the JSC «Zelenograd Innovation and Technology Center» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya ave., 8), kris.shepilova@gmail.com

Alexander V. Sotnikov – Engineer of the Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), engineer of the JSC «Zelenograd Innovation and Technology Center» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya ave., 8), 100av@olvs.miee.ru

Andrey V. Shipatov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, Head of the Department of Research Institute of Computing and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Department of the JSC «Zelenograd Innovation and Technology Center» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya ave., 8), avsh@mail.ru

Yuri V. Savchenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, Deputy Chief Designer of the Research Institute of Computing Tools and Control Systems (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Deputy General Director, Head of the Special Product Development Department of the JSC «Zelenograd Innovation and Technology Center» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya ave., 8), sas@olvs.miee.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 48, *No.* 7, 2019. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 621.793.3 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-277-281

Влияние технологических параметров процесса атомно-слоевой эпитаксии на однородность толщины зародышевых слоев GaN

М.О. Никифоров[1,2], А.А. Дедкова[1], Б.Н. Рыгалин[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]АО «Элма-Малахит», г. Москва, Россия

Nikiforovmo@yandex.ru

Один из способов получения совершенных нитридных структур для микроэлектроники – использование метода атомно-слоевой эпитаксии. В работе рассмотрено влияние технологических параметров процесса атомно-слоевой эпитаксии на динамику роста и равномерность распределения осажденного слоя нитрида галлия (GaN). Эксперименты проведены в реакторе оригинальной конструкции с горизонтальной подачей газа к поверхности подложек при изменении температуры роста в диапазоне 450–540 °С, давления от $4 \cdot 10^4$ Па (400 мбар) до $5 \cdot 10^3$ Па (50 мбар) и варьировании расхода триметилгаллия от 3 до 120 мл/мин. Толщина слоев определена на спектральном эллипсометре. Полученные образцы исследованы методом атомно-силовой микроскопии. Разработанные режимы обеспечивают получение равномерных по толщине зародышевых слоев GaN на сапфировых подложках.

Ключевые слова: нитрид галлия; атомно-слоевая эпитаксия; спектральная эллипсометрия; равномерность осаждения слоя

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.

Для цитирования: Никифоров М.О., Дедкова А.А., Рыгалин Б.Н. Влияние технологических параметров процесса атомно-слоевой эпитаксии на однородность толщины зародышевых слоев GaN // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 277–281. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-277-281

© М.О. Никифоров, А.А. Дедкова, Б.Н. Рыгалин, 2020

Influence of Technological Parameters of the Atomic-Layer Epitaxy Process on the Uniformity of the Thickness of the Obtained Nucleation Layers GaN

M.O. Nikiforov[1,2], A.A. Dedkova[1], B.N. Rygalin[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]JSC «Elma-Malachit», Moscow, Russia

Nikiforovmo@yandex.ru

Abstract: One way to obtain perfect nitride structures for microelectronics is to use the atomic layer epitaxy growth method. The paper considers the influence on the growth dynamics and uniformity of the distribution of the deposited gallium nitride (GaN) layer of such process parameters as the pressure in the reactor, the flow rate of the trimethylgallium precursor and the substrate temperature in the deposition zone (growth temperature). The experiments were carried out in the original reactor in which the flow of gases to the surface of the substrates was carried out horizontally, the growth temperature in different experiments was in the range of 450–540 °C, pressure was varied from $4 \cdot 10^4$ Pa (400 mbar) up to $5 \cdot 10^3$ Pa (50 mbar), flow trimethylgallium ranged from 3 to 120 ml/min. The thickness of the layers is determined on a spectral ellipsometer. Obtained samples were studied by atomic-layer microscopy. Conditions of carrying the process for obtaining a uniform thickness of epitaxial layers of GaN on sapphire substrates have been researched.

Keywords: gallium nitride; atomic layer epitaxy; spectral ellipsometry; uniformity of layer deposition

Acknowledgements: the study has been carried out with equipment of the MIET Core facilities center «MEMS and electronic components».

For citation: Nikiforov M.O., Dedkova A.A., Rygalin B.N. Influence of technological parameters of the atomic-layer epitaxy process on the uniformity of the thickness of the obtained nucleation layers GaN. *Proc. Univ. Electronics,* 2020, vol. 25, no. 3, pp. 277–281. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-277-281

Традиционная схема организации процесса выращивания гетероэпитаксиальных структур нитридных соединений и соответствующая ей конструкция реакционных камер в современном оборудовании имеют ряд ограничений, что сдерживает развитие технологии получения совершенных нитридных слоев.

В первую очередь это относится к сложности управления ростом наноразмерных слоев и воспроизводимости процесса. Использование метода атомно-слоевой эпитаксии (АСЭ) позволяет обеспечить высокую однородность толщины гетероэпитаксиальных слоев по площади структуры, тонкие переходные слои и резкие гетерограницы. При этом решается проблема отсутствия недорогих согласованных по параметру решетки подложек [1]. Для формирования толстых слоев ввиду низких скоростей роста применение данного метода затруднено.

Начальные стадии образования пленки нитрида галлия (GaN) – зародышеобразование и последующая эволюция островков – играют основную роль при получении качественных эпитаксиальных слоев полупроводниковых кристаллов нитридов III группы. В настоящей работе рассматриваются зависимости распределения толщины зародышевого слоя от технологических параметров процесса АСЭ, а также определяются условия, при которых процесс проходит в режиме самоограничения роста [2].

Компания «ЭЛМА-Малахит» (г. Москва, г. Зеленоград) разработала реактор, позволяющий использовать поочередно методы АСЭ и МОС-гидридной эпитаксии в рамках одного техноло-

гического процесса. При этом реализованы преимущества обоих методов: высокая скорость роста (МОС-гидридная эпитаксия) и высокая однородность нанесения (АСЭ). Слои GaN получены методом МОС-гидридной эпитаксии в разделенных потоках [3]. Для создания структур используется реактор горизонтального типа с изменяемым распределением газовых потоков. В режиме МОС-гидридной эпитаксии подача прекурсоров III и V групп осуществляется по всему периметру реактора. В режиме АСЭ в определенные секторы реактора подается прекурсор только III или V группы, а секторы между ними продуваются технологическим газом, что обеспечивает локализацию газовых потоков и удаление непрореагировавших прекурсоров с поверхности подложки. Ключевое отличие предлагаемого метода от классической АСЭ заключается в том, что в реактор одновременно подаются прекурсоры и III и V группы. Схема распределения секторов подачи реагентов внутри реактора показана на рис.1.



Рис.1. Схема распределения газовых потоков внутри реактора (вид сверху)
Fig.1. Diagram of the distribution of gas flows inside the reactor (top view)

В экспериментах в качестве прекурсоров применяются аммиак и триметилгаллий (ТМГ), подложки представляют собой трехдюймовые пластины сапфира с ориентацией (0001). Водород используется как газ-носитель и газ для продувки реактора. Прекурсоры подаются от боковых стенок реактора, непрореагировавшие реагенты выводятся в центре реактора. Длительность цикла нанесения составляет 6 с, средняя толщина выращенного слоя для каждого образца равна 50 нм. Газовый поток в реактор состоит из аммиака и водорода, скорость которого равна $25 \cdot 10^3$ см^3/мин. Количество вводимого ТМГ меняется от $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ до $8{,}4 \cdot 10^{-4}$ моль/мин. Перед началом нанесения слоев GaN для термической очистки поверхности сапфировые подложки отжигались в течение 10 мин при температуре 1000 °С в атмосфере водорода. Толщина слоев GaN определялась на спектральном эллипсометре Horiba Auto SE в 25 точках. Во время проведения процесса контроль за ростом структуры проводился с помощью рефлектометрической системы Epitune II при длине волны сканирующего луча 950 нм. Полученные образцы исследовались методом атомно-силовой микроскопии.

На рис.2 приведена зависимость скорости роста слоев GaN от расхода ТМГ. Эксперименты проводились при температуре 500 °С. Из графиков видно, что со снижением давления при высоких расходах ТМГ влияние изменения его расхода на скорость роста пленки GaN уменьшается (см. рис.2, кривая *3*). Покрытие в один монослой GaN за цикл достигается при скорости роста 0,26 нм/цикл [4, 5], что примерно соответствует половине длины кристаллической решетки GaN в *c*-плоскости [6]. Режимы, близкие к режиму самоограничения, зафиксированы в реакторе при скорости роста слоев GaN ~3 Å/цикл, давлении 50 мбар и расходе ТМГ 120 мл/мин. В проведенных экспериментах иногда самоограничение роста наблюдается частично. Это в совокупности с более высокой скоростью роста относительно расчетной может свидетельствовать о том, что при осуществлении одного цикла происходит наращивание более одного слоя. Причиной многослойного роста за один цикл в данном случае может являться адсорбция избыточного количества прекурсора III группы на момент подачи на подложку прекурсора V группы. Наилучшее значение однородности распределения толщины слоя по подложке – отклонение от средней арифметической толщины – составляет 4,52 %. При изменении температуры от 450 до 540 °С для такого режима отклонение толщины слоя меняется от 7,08 до 1,62 % соответственно. При переходе в режим МОС-гидридной эпитаксии скорость роста в том же процессе составляет 15 нм/мин при разбросе значений толщины слоя 10 %.

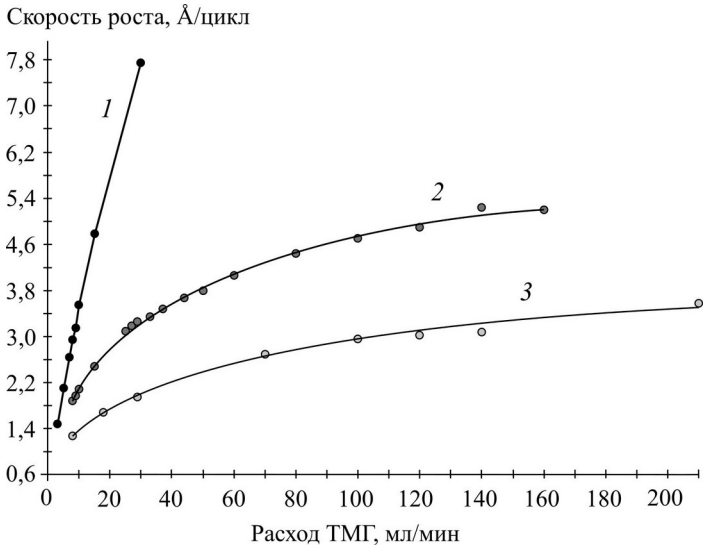


Рис.2. Изменение скорости роста слоев GaN в зависимости от расхода ТМГ при давлении в реакторе $4 \cdot 10^4$ Па (400 мбар), $1 \cdot 10^4$ Па (100 мбар), $5 \cdot 10^3$ Па (50 мбар) (кривые 1–3 соответственно)

Fig.2. The dependence of changes in the growth rate of GaN layers on the flow rate of TMG at a reactor pressure of $4 \cdot 10^4$ Pa (400 mbar), $1 \cdot 10^4$ Pa (100 mbar), $5 \cdot 10^3$ Pa (50 mbar) (curves 1–3 respectively)

Результаты исследования показывают, что конструкция реактора позволяет достичь высокой однородности толщины как тонкого, так и толстого слоев структуры, а также большей суммарной скорости роста слоев, чем при использовании классического метода атомно-слоевой эпитаксии. Разработанные и оптимизированные режимы АСЭ обеспечивают получение равномерных по толщине как тонкого, так и толстого слоев GaN на сапфировых подложках с использованием в качестве прекурсоров аммиака и ТМГ, а в качестве газа-носителя и продувочного газа – водорода.

Эксперимент показал, что понижение давления в реакторе с одновременным увеличением количества подаваемого в реактор ТМГ повышает равномерность покрытия подложек слоями GaN. Повышение температуры в процессе роста слоев GaN на сапфировых подложках приводит к резкому увеличению однородности получаемых слоев GaN по поверхности подложек и скорости их роста.

Литература

1. ***Parphenyuk P.V., Evtukh A.A.*** Lowering the density of dislocations in heteroepitaxial III-nitride layers: Effect of sapphire substrate treatment (review) // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2016. Vol. 19. No 1. P. 1–8.

2. Atomic layer epitaxy of gallium nitride using trimethylgallium and ammonia / ***Lu-Sheng Hong, Wei-Lin Chen, Shuo-Wei Chen et al.*** // Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers Congress Program and Abstracts. Session ID : 3D-09. 2004. P. 1–7.

3. ***Буробин В.А., Зверев А.В., Арендаренко А.А.*** Способ получения эпитаксиального слоя бинарного полупроводникового материала на монокристаллической подложке посредством металлоорганического химического осаждения из газовой фазы // Патент России № 2548578. 2015. Бюл. № 6.

4. Atomic layer epitaxy of AlGaN / ***Kentaro Nagamatsu, Daisuke Iida, Kenichiro Takeda*** // Phys. Status Solidi C 7. 2010. No. 10. P. 2368–2370.

5. ***Sumakeris J., Sitar Z., Ailey-Trent K.S.*** Layer-by-layer epitaxial growth of GaN at low temperatures // Thin Solid Films. 1993. Vol. 225. 244–249.

6. ***Harafuji T., Kawamura J.*** Molecular dynamics simulation for evaluating melting point of wurtzite-type GaN crystal // J. Appl. Phys. – 2004. – P. 2501–2512.

Поступило в редакцию 18.10.2019 г.; после доработки 16.03.2020 г.; принято к публикации 17.03.2020 г.

Никифоров Максим Олегович – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-технолог АО «Элма-Малахит» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5, стр. 2.), Nikiforovmo@yandex.ru

Дедкова Анна Александровна – ведущий инженер Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dedkova@ckp-miet.ru

Рыгалин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lv@miee.ru

References

1. Parphenyuk P.V., Evtukh A.A. Lowering the density of dislocations in heteroepitaxial III-nitride layers: Effect of sapphire substrate treatment (review). *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1. pp. 1–8.

2. Lu-Sheng Hong, Wei-Lin Chen, Shuo-Wei Chen, Yu-Jen Hsu, Jyh-Chiang Jiang. Atomic layer epitaxy of gallium nitride using trimethylgallium and ammonia. *Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers congress program and abstracts. Session ID : 3D-09.* 2004. pp. 1–7.

3.Burobin V.A., Zverev A.V., Arendarenko A.A. *Method of producing an epitaxial layer of binary semiconductor material on a single-crystal substrate by means of metalorganic vapour-phase deposition.* Russian Patent, no. 2548578, 2015. (in Russian).

4. Kentaro Nagamatsu, Daisuke Iida, Kenichiro Takeda, Kensuke Nagata, Toshiaki Asai, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki. Atomic layer epitaxy of AlGaN. *Phys. Status Solidi C 7,* 2010, no. 10, pp. 2368–2370.

5. Sumakeris J., Sitar Z., Ailey-Trent K.S. Layer-by-layer epitaxial growth of GaN at low temperatures. *Thin Solid Films*, 1993, vol. 225, pp. 244–249.

6. Harafuji T., Kawamura J. Molecular dynamics simulation for evaluating melting point of wurtzite-type GaN crystal. *J. Appl. Phys*, 2004, pp. 2501–2512.

Received 18.10.2019; Revised 16.03.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Maksim O. Nikiforov – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the JSC «Elma-malachit» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, St. George Ave., 5, build 2), Nikiforovmo@yandex.ru

Anna A. Dedkova – Lead Engineer of the Center for Collective Use «Microsystem Technology and Electronic Component base», National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dedkova@ckp-miet.ru

Boris N. Rygalin – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Research Institute of Electronic Technology, National Research University of Electronic Technology (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lv@miee.ru

Уважаемые авторы!

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

УДК 504.0604.4 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-282-286

Оценка эффективности мероприятий по снижению накопления полиэтиленовых отходов в окружающей среде на основе инфологической модели

А.А. Головлев[1], Н.В. Березина[1], О.В. Кондратьева[2], В.Б. Кольцов[1]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

nvberezina@yandex.ru

Одно из решений устранения проблемы накопления полиэтиленовых отходов на полигонах твердых бытовых отходов – использование модифицированного полиэтилена, способность которого к разложению в естественных условиях позволит снизить ущерб от загрязнения компонентов окружающей среды. В работе на основе анализа предотвращенного экологического ущерба и компьютерной программы Biodegradable предложен метод оперативной оценки эколого-экономической эффективности замены полиэтиленовой упаковки на оксоразлагаемую на выбранной территории. Исходными данными для оценки эффективности мероприятий по снижению накопления полиэтиленовых отходов являются площадь территории, численность населения и себестоимость модифицированного полиэтилена. Установлено, что при замене полиэтиленовой упаковки на оксоразлагаемые аналоги территория, которая занята ею на полигоне, освободится примерно через 1,5–2 года. Это позволит снизить расходы на восстановление земельных ресурсов и предотвратить потери земель в результате длительной деградации.

Ключевые слова: полиэтилен; экономическая эффективность; экологическая эффективность; модифицированный полиэтилен; компьютерная программа Biodegradable

Для цитирования: Головлев А.А., Березина Н.В., Кондратьева О.В., Кольцов В.Б. Оценка эффективности мероприятий по снижению накопления полиэтиленовых отходов в окружающей среде на основе инфологической модели // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 282–286. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-282-286

© А.А. Головлев, Н.В. Березина, О.В. Кондратьева, В.Б. Кольцов, 2020

Assessment of the Effectiveness of Measures to Reduce Accumulation of Polyethylene Waste in Environment Based on the Infological Model

A.A. Golovlev[1], N.V. Berezina[1], O.V. Kondratyeva[2], V.B. Koltsov[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

nvberezina@yandex.ru

Abstract: One of the solutions to the problem of accumulating of polyethylene packaging at solid waste landfills is usage of modified polyethylene. The decomposition of such polyethylene under natural conditions permits to reduce the damage from the environmental pollution. In this work, based on the methodology for assessing the prevented environmental damage and the Biodegradable program the method for rapid assessment of environmental and economic efficiency of replacing plastic packaging with oxo-degradable materials in a selected area has been proposed. The source data are the area, its population and the cost of modified polypropylene, it has been determined that when packaging is replaced with the oxo-degradable analogues, the place it occupies at the landfill will be set free after about 1.5 years, which will reduce the cost of restoring the land resources and will prevent the land loss as a result of the prolonged degradation.

Keywords: polyethylene; economic efficiency; environmental effectiveness; modified polyethylene; computer program Biodegradable

***For citation*:** Golovlev A.A., Berezina N.V., Kondratyeva O.V., Koltsov V.B. Assessment of the effectiveness of measures to reduce accumulation of polyethylene waste in environment based on the infological model. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 282–286. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-282-286

Урбанизация и рост доходов населения создали одну из главных проблем нашего времени – накопление отходов из пластика, бумаги, стекла, алюминия и разного рода упаковки. Согласно [1] объем накопленных твердых бытовых отходов (ТБО) к 2025 г. может достичь 2,2 млрд т. Такой простой в изготовлении, дешевый, прочный и водонепроницаемый материал, как полиэтилен, занимает вместе с другими видами пластика 4–6 % общего объема отходов на полигонах ТБО. По информации Центра новостей ООН [2], пластиковые отходы составляют 15–40 % всех муниципальных отходов. Полиэтиленовый пакет разлагается в течение многих десятилетий, а ежегодное производство полиэтилена составляет более 100 млн т [3].

Эффективное решение проблемы накопления полиэтиленовых отходов – использование модифицированного полиэтилена, разлагающегося в короткие сроки. По механизму разложения и исходному сырью его можно разделить на оксоразлагаемый и биоразлагаемый [4, 5]. Сырьем для производства биоразлагаемых пластиков, как правило, служат пищевые культуры: кукуруза, пшеница и др. [6]. Оксоразлагаемый полиэтилен содержит добавки солей переходных металлов, таких как кобальт, никель, железо. Под действием света и кислорода в естественных условиях изделие распадается на фрагменты, дальнейшее разложение которых зависит от pH среды, температуры и состава выделяющихся газов. Согласно исследованиям Департамента окружающей среды Великобритании, часть оксоразлагаемого полиэтилена разрушается в почве до диоксида углерода и воды [5]. Производство оксоразлагаемых пакетов увеличивает себестоимость продукции не более чем на 20 %, в то время как в розничной сети они продаются в полтора раза дороже. При замене полиэтиленовой упаковки на оксоразлагаемые аналоги занимаемая ими территория на полигоне освободится примерно через 1,5–2 года.

Экономический ущерб от загрязнения основных компонентов окружающей природной среды может быть оценен исходя из затрат на восстановление ресурса. Экологический ущерб от разрушения почв и земель под воздействием антропогенных нагрузок выражается в их деградации, загрязнении, увеличении площадей, отводимых под размещение отходов.

Рассчитать предотвращенный экологический ущерб для окружающей среды, связанный с применением полиэтилена, можно по формулам для земельных ресурсов [7]. В общем случае расчетная формула имеет вид

$$У^{п}_{пр} = У^{п}_{прд} + У^{п}_{прx} + У^{п}_{пр\,c} + У^{п}_{пр\,j},$$

где $У^{п}_{прд}$ – предотвращенный в результате природоохранной деятельности ущерб от деградации почв и земель на рассматриваемой территории за отчетный период времени; $У^{п}_{прx}$ – предотвращенный ущерб от загрязнения земель i-м загрязняющим веществом (i = 1, 2, 3, …, N) за отчетный период времени; $У^{п}_{пр\,c}$ – предотвращенный ущерб от захламления земель i-й категорией отходов за отчетный период времени; $У^{п}_{пр\,j}$ – любой другой j-й вид предотвращенного ущерба от ухудшения и разрушения почв в регионе [7].

Для расчета предотвращенного ущерба на территории административной единицы разработана программа Biodegradable [8]. На рис.1 представлена инфологическая модель для ввода расчетных данных. С учетом численности населения города или региона и начальных затрат на производство оксоразлагаемой упаковки программа позволяет принять экологически и экономически обоснованные решения о целесообразности проведения мероприятий по замене полиэтиленовой упаковки на оксоразлагаемую. Переменными величинами для интересующего объекта (города) являются его площадь, численность населения и природно-хозяйственная значимость почв и земель в данном регионе. На рис.2 приведены интерфейс программы Biodegradable и пример готовых расчетных данных. Предотвращенный эколого-экономический ущерб за 200 лет (приблизительный срок разложения полиэтилена) можно оценить на примере города высокоточного машиностроения с населением около 230 тыс. чел. (г. Зеленоград (г. Москва), данные за 2017 г.): $У^{п}_{пр\,c}$ = 1 975 075 000 руб.

Основываясь на приведенных данных, целевая аудитория пользователей программы – работники муниципалитета – сможет оценить, будут ли целесообразными мероприятия по распространению оксоразлагаемой упаковки в городе. Так как использованные расчетные методы подходят для оценки разных мероприятий по защите окружающей среды, например программы рециклинга и обновления оборудования, компьютерная программа Biodegradable может быть оперативно адаптирована для экономического анализа широкого спектра экологических мероприятий.

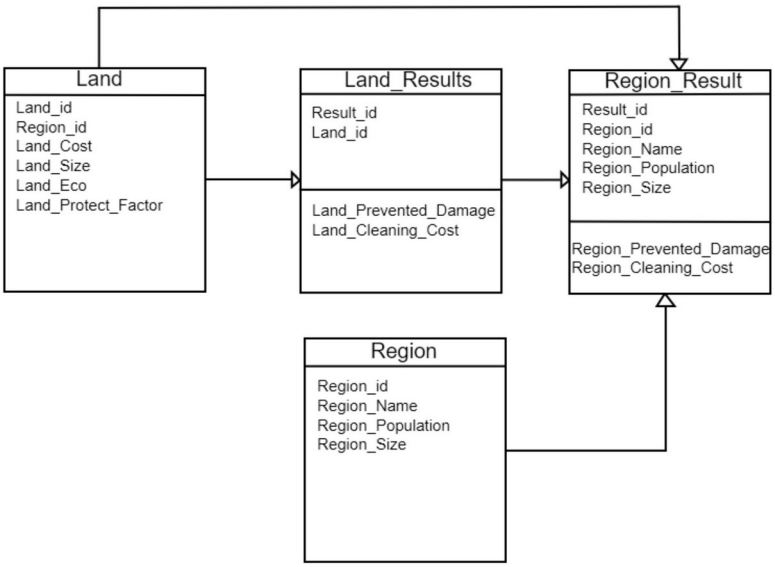


Рис.1. Инфологическая модель для расчета предотвращенного ущерба
Fig.1. Infological model for calculating prevented damage

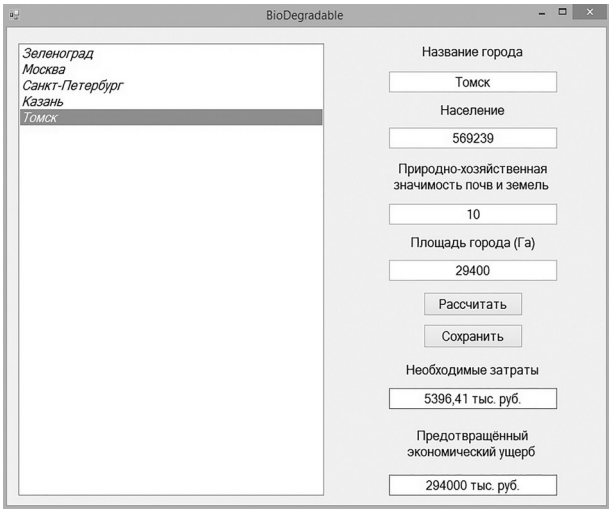


Рис.2. Интерфейс программы Biodegradable
Fig.2. Biodegradable program interface

Таким образом, актуальная проблема накопления полиэтиленовых отходов в окружающей среде может быть решена за счет использования оксоразлагаемой упаковки. Помимо оценки долгосрочной перспективы, расчет с помощью программы Biodegradable показал, что использование оксоразлагаемой упаковки позволит освободить территорию на полигонах ТБО от полиэтиленовых отходов уже через 1,5–2 года. Это даст возможность снизить расходы на восстановление земельных ресурсов и предотвратить потери земель в результате деградации.

Литература

1. ***Hester R.E., Harrison R.M.*** Marine pollution and human health // Royal Society of chemistry. 2011. P. 84–85.

2. Центр новостей ООН, июнь 2014. URL: https://news.un.org/ru/story/2014/06/1244841 (дата обращения: 24.01.2020).

3. Sciencepop.ru.: научно-популярный журнал, октябрь 2017. URL: https://sciencepop.ru/resajklingovyj-biznes-kakuyu-vygodu-mozhno-izvlech-iz-musora/ (дата обращения: 24.01.2020).

4. European Comission. Report from the Comission to the European Parlament and the Counsil on the impact of the use of oxo-degradable plastic, including oxo-degradable plasticcarrier bags, on the environment. Brussels, 16.01.2018. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0035 (дата обращения: 24.01.2020).

5. Plastic Pollution. Encyclopedia Britannica, August 2013. URL: https://www.britannica.com/science/plastic-pollution/Plastic-pollution-in-oceans-and-on-land (дата обращения: 24.01.2020).

6. ***Кольцов В.Б., Березина Н.В., Головлев А.А.*** Проблемы утилизации упаковочных полиэтиленовых материалов // Экология промышленного производства. 2019. №4. С. 19–24.

7. ***Данилов-Данильян В.И.*** Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. М., 1999. 64 с.

8. ***Кольцов В.Б., Севрюкова Е.А., Головлев А.А., Гущарин Д.А.*** Biodegradable (программа для ЭВМ) [Электронный ресурс] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616949. 27.06.2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Поступило в редакцию 05.02.2020 г.; после доработки 05.02.2020 г.; принято к публикации 17.03.2020 г.

Головлев Александр Александрович – соискатель Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), topecolog@gmail.com

Березина Наталия Вадимовна – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), nvberezina@yandex.ru

Кондратьева Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева (Россия, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), olgakoltsowa@mail.ru

Кольцов Владимир Борисович – доктор химических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), koltsov_v_b@mail.ru

References

1. Hester R.E., Harrison R.M. Marine pollution and human health. *Royal Society of Chemistry,* 2011. pp. 84–85.

2. *UN News Center. June 2014.* Available at: https://news.un.org/en/story/2014/06/1244841 (accessed 01.24.2020). (in Russian).

3. *Sciencepop.ru. Popular science magazine. October 2017.* Available at:https://sciencepop.ru/resajklingovyj-biznes-kakuyu-vygodu-mozhno-izvlech-iz-musora/ (accessed 01.24.2020). (in Russian).

4. *European Commission. Report from the Comission to the European Parlament and the Counsil on the impact of the use of oxo-degradable plastic, including oxo-degradable plasticcarrier bags, on the environment*. Brussels, 16.1.2018 COM (2018) 35 final. Available at:https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0035 (accessed 01.24.2020).

5. *Plastic Pollution. Encyclopedia Britannica. August 2013.* Available at:https://www.britannica.com/science/plastic-pollution/Plastic-pollution-in-oceans-and-on-land (accessed 01.24.2020).

6. Koltsov V.B., Berezina N.V., Golovlev A.A. Problems of disposal of packaging polyethylene materials. *Federal State Unitary Enterprise NTC Defense Complex Compass Magazine Ecology of Industrial Production,* 2019, no. 4, pp. 19–24. (in Russian).

7. Danilov-Danilyan V.I. *Temporary methodology for determining the prevented environmental damage.* Moscow, 1999. 64 p. (in Russian).

8. Koltsov V.B., Sevryukova E.A., Golovlev A.A., Gushcharin D.A. *Biodegradable (computer program), state registration certificate for computers No. 2017616949*, *06/27/2017*. 1 electron opt. disk (CD-ROM). (in Russian).

Received 05.02.2020; Revised 05.02.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Alexander A. Golovlev – Applicant of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), topecolog@gmail.com

Nataliya V. Berezina – 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), nvberezina@yandex.ru

Olga V. Kondratyeva – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russia, 127550, Moscow, Timiryazev st., 49), olgakoltsowa@mail.ru

Vladimir B. Koltsov – Dr. Sci. (Chem.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), koltsov_v_b@mail.ru

ЮБИЛЕИ

Сигову Александру Сергеевичу – 75 лет



31 мая 2020 г. исполнилось 75 лет Александру Сергеевичу Сигову, известному ученому в области элементной базы информационных систем, твердотельной электроники и физического материаловедения, академику Российской академии наук.

В 1968 г. А.С. Сигов с отличием окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, в 1971 г. – аспирантуру МГУ им. М. В. Ломоносова по кафедре квантовой теории. С 1972 г. Александр Сергеевич работает в Московском государственном техническом университете радиотехники, электроники и автоматики, ныне МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА). Вся научная, педагогическая и административная деятельность А.С. Сигова связана с этим Университетом.

В 1985 г. А.С. Сигов защитил докторскую диссертацию, в 1988 г. ему присвоено звание профессора, с 1989 г. - заведующий кафедрой физики конденсированного состояния МИРЭА. С 1985 по 1998 г. А.С. Сигов – декан факультета электроники и оптоэлектронной техники МИРЭА. В 1998 г. Александр Сергеевич был избран на должность ректора МИРЭА и проработал в этой должности 15 лет. С 2013 г. А.С. Сигов является президентом РТУ МИРЭА.

В 2006 г. А.С. Сигов избран членом-корреспондентом РАН по Отделению информационных технологий и вычислительных систем РАН по специальности «Информационные системы и элементная база», в 2011 г. – действительным членом РАН.

Основное направление научной деятельности А.С. Сигова – исследование физических свойств систем с пониженной размерностью и/или структурным беспорядком и создание на их основе функциональных устройств нано- и микроэлектроники. Александр Сергеевич – автор и соавтор более 300 научных трудов, 18 монографий и учебников, 34 изобретений. В 1997 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Под руководством А.С. Сигова защищено 25 кандидатских диссертаций, 17 его учеников стали докторами наук. Он является Почетным работником высшего профессионального образования РФ.

А.С. Сигов – член Научного совета при Совете Безопасности РФ, председатель секции физики сегнетоэлектриков и диэлектриков Научного совета РАН, член Европейского физического общества, IEEE, Института инженерии и технологий, член бюро Объединенного совета РАН по физике конденсированных сред.

А.С. Сигов удостоен звания лауреата Государственной премии РФ, премии Правительства РФ в области образования и двух премий Правительства РФ в области науки и техники, премии им. М.В. Ломоносова в области науки и образования, награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени, орденом Почета, медалями, а также медалью и дипломом ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

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

Редколлегия

Неволину Владимиру Николаевичу – 75 лет



20 июня 2020 г. исполнилось 75 лет доктору физико-математических наук, профессору, ученому в области физики твердого тела, лазерных технологий, физики тонких пленок и наносистем, заслуженному деятелю науки РФ Неволину Владимиру Николаевичу.

Владимир Николаевич родился в Москве в семье военнослужащего. Окончив среднюю школу в 1962 г., поступил в Московский инженерно-физический институт (МИФИ), в 1968 г. его окончил по специальности инженер-физик. С 1968 по 1997 г. работал в МИФИ, пройдя путь от стажера-исследователя до проректора по научной работе. В 1973 г. В.Н. Неволин защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в 1986 г. - на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. В 1976 году Владимиру Николаевичу присуждена премия Ленинского комсомола в области науки и техники. В 1990 г. Владимиру Николаевичу присвоено звание профессора.

Основное направление научной деятельности В.Н. Неволина – исследования в области физики взаимодействия высокоэнергетических пучков с твердым телом, физики тонких пленок и наносистем.

В 1997 г. В.Н. Неволин перешел на государственную службу в качестве директора Департамента аттестации научных и научно-педагогических работников, в 2001 г. назначен заместителем министра образования РФ и главным ученым секретарем Высшей аттестационной комиссии Министерства образования РФ. В том же году В.Н. Неволину присвоен квалификационный чин «Действительный государственный советник Российской Федерации 2 класса». В 2004 г. В.Н. Неволину присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники. В 2006 г. В.Н. Неволин перешел на работу в Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) в качестве заместителя директора института по научной работе. В настоящее время В.Н. Неволин – помощник директора по финансово-экономическим вопросам и инновационной деятельности ФИАН.

В.Н. Неволин - автор и соавтор около 250 научных публикаций, включая 4 монографии.

Владимир Николаевич Неволин – опытный педагог. Он ведет преподавательскую работу в МИФИ, в разные годы работал в качестве приглашенного профессора в университетах Дании, Германии и Южной Кореи. Под научным руководством Неволина В.Н. защищено 12 кандидатских и 2 докторские диссертации. Он является членом докторских диссертационных советов в ФИАН и МИФИ. В.Н. Неволин – член бюро Троицкого научного центра.

В течение многих лет профессор В.Н. Неволин работает в редколлегиях четырех научных журналов, включенных в перечень Web of Science.

Труд профессора Неволина В.Н. отмечен правительственными наградами: орденом Почета, медалями, ему присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Поздравляем Владимира Николаевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и успехов в научной и педагогической деятельности!

Редколлегия

КОНФЕРЕНЦИИ

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

Проведение Межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика – 2020» в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» перенесено на сентябрь – октябрь 2020 г.

Оргкомитет приглашает молодых исследователей принять участие в работе конференции.

Научные направления работы конференции (по секциям):

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микромеханика, сенсоры, робототехнические комплексы.
5. Математическое моделирование процессов и технологий.
6. Автоматизированные информационные системы и информационные технологии.
7. Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства.
8. Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций.
9. Информационная безопасность.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические проблемы электроники и окружающей среды.
12. Менеджмент, маркетинг в электронике и информатике.

Форма участия в работе конференции – выступление с докладом на секции, продолжительность выступления – 10 мин.

По итогам работы секций проводится конкурс работ студентов, авторами которых являются только студенты, и конкурс работ аспирантов, авторами которых являются только аспиранты. Лучшие работы будут отмечены дипломами лауреатов.

По материалам конференции предполагается издание сборника статей конференции с индексированием в РИНЦ. Отбор работ для опубликования в сборнике проводится Оргкомитетом конференции по результатам выступлений.

Тезисы докладов будут опубликованы в сборнике и представлены участникам к началу работы конференции.

Ознакомиться с требованиями к представлению и оформлению тезисов и докладов можно на сайте МИЭТ в разделе «Научные исследования», «Конференции и семинары»: http://miet.ru/content/s/812

Ответственный секретарь Оргкомитета – Харач Валентина Павловна.

Адрес Оргкомитета: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ОНТИ, на конференцию «МэИнфо-2020».

Тел.: (499) 720-85-30
E-mail: onti@miee.ru (для справок)

IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2020)

Очередная IX конференция МЭС-2020 будет проведена преимущественно в заочном формате. Конференция завершится проведением пленарного заседания в ноябре 2020 года в Центральном доме ученых по адресу: г. Москва, ул. Пречистенка, дом 16. Сессия «Презентации научно-технических достижений российских и зарубежных компаний и организаций, способствующих развитию микроэлектроники в России» и круглые столы будут проведены в ноябре 2020 года в КП «Корпорация развития Зеленограда» по адресу: г. Зеленоград, ул. Юности, дом 8.

Организатор конференции: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН).

Соорганизаторы конференции: Казенное предприятие г. Москвы «Корпорация развития Зеленограда» и Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова.

Учредители конференции: Российская академия наук, Министерство науки и высшего образования РФ, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), правительство Москвы, префектура Зеленоградского АО г. Москвы, МИРЭА – Российский технологический университет, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, ОАО «Концерн радиостроения ВЕГА», НИУ МИЭТ, Южный федеральный университет, ТУСУР.

Спонсоры конференции: АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», АО НПЦ «ЭЛВИС», компания «МЕГРАТЕК», АО «ПКК Миландр», ИНЭУМ.

Конференция МЭС-2020 посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования МЭС, систем на кристалле, IP-блоков и новой элементной базы микро- и наноэлектроники.

Основные обсуждаемые темы: теоретические аспекты проектирования микро- и наноэлектронных систем; методы и средства автоматизации проектирования микро- и наноэлектронных схем и систем (САПР СБИС); опыт разработки цифровых, аналоговых, цифроаналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС; особенности проектирования СБИС для нанометровых технологий; системы на кристалле перспективной РЭА.

Сборник трудов конференции МЭС-2020 включен в Перечень ВАК (список от 19.04.2019, поз. 1837) российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Более подробную информацию о конференции можно получить на веб-сайте: http://www.mes-conference.ru

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

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

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

Основные рубрики:

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

В редакцию представляются:

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

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать ***ключевые слова*** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

- печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только ***по умолчанию.*** Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт https://inkscape.org). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

- русскоязычные источники также должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

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

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

Плата за публикацию статей не взимается.

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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2020

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

Периодичность журнала - 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

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

Подписной индекс 47570

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

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

через редакцию - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru