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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 24
№ 2
март - апрель

Vol. 24
No. 2
March - April

2019

Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 24, № 2, 2019
март – апрель

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)

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Бархоткин Вячеслав Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия)
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия)
Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия)
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь)
Горбацевич Александр Алексеевич – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)
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)
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., Фонд «Сколково», 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)
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция)
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения)
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

© “Известия вузов. Электроника”, 2019
© МИЭТ, 2019

Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия)
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова)
Таиров Юрий Михайлович – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Усанов Дмитрий Александрович – д.физ.-мат.н., проф., Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия)
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания)

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 11.04.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 13,02 усл.печ.л., 11,504 уч.-изд.л. Тираж 180 экз. Заказ № 16. 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.

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

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

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге Агентства «Роспечать» – 47570

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Гаджиев Т.М., Алиев М.А., Асваров А.Ш., Гаджиева Р.М., Билалов Б.А., Исмаилов А.М., Шомахов З.В. Зависимость морфологии поверхности и структуры пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от температуры селенизации 107

Вигдорович Е.Н. Формирование низкоомных слоев *p*-типа в гетероструктурах $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$ .. 118

Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Костюк Д.В. Спектрофотометрический контроль хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя 129

Элементы интегральной электроники

Маковская Т.И., Данилюк А.Л., Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е. Зарядовые свойства транзисторной МОП-структуры с каналом из двумерного кристалла 137

Новиков С.Г., Беринцев А.В., Алексеев А.С., Сомов А.И., Светухин В.В. Исследование влияния температуры на выходные параметры радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиационного распада 151

Юсипова Ю.А. Прецессия намагниченности свободного слоя спинового вентиля и его переключение при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии 160

Петросянц К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур 174

Озеркин Д.В., Бабешко В.В. Синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров 185

Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан. Исследование и модификация многоразрядного параллельно-префиксного сумматора 197

Памяти Жореса Ивановича Алфёрова 208

Юбилеи

Лабунову Владимиру Архиповичу – 80 лет 210

Петросянцу Константину Орестовичу – 75 лет 212

Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 24, No. 2, 2019
March – April
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)

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia)
Vyacheslav A. Barhotkin – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia)
Dmitri V. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian)
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus)
Aleksandr A. Gorbatsevich – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia)
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)
Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMS «Optolink» (Moscow, Russia)
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)
Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., The Skolkovo Foundation, 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)
Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden)
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJS Company «Sinopsis, Armenia» (Yerevan, Armenia)
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia)
Konstantin O. Petrosyantz – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia)
Andrey Y. Sazonov - PhD, Prof., University of Waterloo (Canada)
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2019
© MIET, 2019

Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of the Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova)
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia)
Yury M. Tairov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI) (St. Petersburg, Russia)
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Dmitry A. Usanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Saratov State University (Saratov, Russia)
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain)

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 11.04.2019. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 13,02. Number of copies 180. Order no. 16. 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.

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

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

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

CONTENTS

Electronics materials

Gadzhiev T.M., Aliev M.A., Asvarov A.Sh., Gadgieva R.M., Bilalov B.A., Ismailov A.M., Shomakhov Z.V. The Dependence of Surface Morphology and Structure of $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ Films on Selenization Temperature 107

Vigdorovich E.N. The Formation of Low Resistivity Layers of *p*-type in Heterostructure $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$ 118

Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Kostuk D.V. Spectrophotometric Monitoring Chloride Electrolyte for Electrochemical Deposition of Permalloy 129

Integrated electronics elements

Makovskaya T.I., Danilyuk A.L., Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Charge Properties of a MOS Transistor Structure with a Channel Made of a Two-Dimensional Crystal 137

Novikov S.G., Berintsev A.V., Alekseev A.S., Somov A.I., Svetukhin V.V. Investigation of Influence of Temperature on Output Parameters of Nuclear Power Sources of Electric Supply Based on Double Step Conversion of Radioactive Decay Energy 151

Iusipova Iu.A. Precession of Spin-Valve Free Layer Magnetization and Its Switching Under Influence of a Magnetic Field Perpendicular to Axis of Anisotropy 160

Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Sambursky L.M. Highlights of JFET I-V Characteristics Simulation in Cryogenic Temperature Range 174

Ozerkin D.V., Babeshko V.V. Synthesis of 249KP4AT MOS-Relay SPICE-Model with the Temperature Dependence of Parameters 185

Yakunin A.N., Aung Myo San. Research and Modification of a Multi-Bit Parallel-Prefix Adder 197

In memory of Zhores Ivanovich Alfyorov 208

Anniversaries

Labunov Vladimir Arhipovich is 80 years old 210

Petrosyantz Konstantin Orestovich is 75 years old 212

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 539.216.2:620.187 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-107-117

Зависимость морфологии поверхности и структуры пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от температуры селенизации

Т.М. Гаджиев[1], М.А. Алиев[1], А.Ш. Асваров[1], Р.М. Гаджиева[1], Б.А. Билалов[2], А.М. Исмаилов[3], З.В. Шомахов[4,5]

[1]Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, г. Махачкала, Россия
[2]Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Россия
[3]Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия
[4]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия
[5]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, г. Нальчик, Россия

shozamir@yandex.ru

В зависимости от выбора технологии получения пленок $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ наблюдается разброс электрофизических и фотоэлектрических параметров фотопреобразователей, что связано в первую очередь с формируемой в пленках микроструктурой и их фазовым составом. Изучение процессов разделения фаз и формирования однофазной пленки $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ является ключевым моментом при изготовлении высококачественных поглощающих слоев. В работе тонкие пленки $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ получены методом двухэтапной селенизации в температурном интервале $350 \le T \le 550$ °C предварительно синтезированных медно-индий-галлиевых слоев различной толщины. Исследованы морфология поверхности, химический состав и структура синтезированных пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской порошковой дифракции, рентгеновской флуоресценции. Установлено, что синтезированные пленки являются поликристаллическими, имеют развитую поверхность и средний размер кристаллитов 50–140 нм. На основании проведенного статистического анализа данных электронной микроскопии определены минимальная температура начала процесса селенизации и минимально необходимая толщина металлического слоя для формирования сплошной тонкой пленки $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$. Полученные пленки могут использоваться в качестве активного фоточувствительного слоя высокоэффективных преобразователей солнечного излучения.

Ключевые слова: фотоэлементы; тонкие пленки; технологический процесс; селенизация; поверхность; распределение; структура пленок; CIGS

© Т.М. Гаджиев, М.А. Алиев, А.Ш. Асваров, Р.М. Гаджиева, Б.А. Билалов, А.М. Исмаилов, З.В. Шомахов, 2019

Для цитирования: Зависимость морфологии поверхности и структуры пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от температуры селенизации / Т.М. Гаджиев, М.А. Алиев, А.Ш. Асваров и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 107–117. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-107-117

The Dependence of Surface Morphology and Structure of $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ Films on Selenization Temperature

T.M. Gadzhiev[1], M.A. Aliev[1], A.Sh. Asvarov[1], R.M. Gadgieva[1], B.A. Bilalov[2], A.M. Ismailov[3], Z.V. Shomakhov[4,5]

[1]*Institute of Physics of Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Science, Makhachkala, Russia*
[2]*Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia*
[3]*Daghestan State University, Makhachkala, Russia*
[4]*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia*
[5]*Kabardino-Balkarian Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia*

shozamir@yandex.ru

Abstract: Depending on the choice of technology for manufacturing the $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ films the scattering of electrical-and photoelectrical of the photo converters parameters is observed, which in the first turn is related to the microstructure formed in the films and their phase composition. The study on the phase division processes and the formation of the one-phase film $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ is the key moment in manufacturing high quality absorbing layers. Thin films of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ have been prepared by the two-step selenization of the preliminary synthesized Cu-In-Ga- layers of different thickness in a temperature interval $350 \le T \le 550$ °C. The surface morphology, the chemical composition and the structure of the synthesized $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films have been studied using the electron microscopy, the X-ray powder diffraction and the X-ray fluorescence methods. It has been determined that the synthesized films are polycrystalline, have developed surface and the crystalline medium size of 50–140 nm. The minimum initial selenization temperature and the minimum thickness of the metal layer, required to prepare $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ thin film, have been defined from the statistical analysis of the electron microscopy data.

Keywords: solar cells; thin films; processing technology; selenization; surface; distribution; structure

For citation: Gadzhiev T.M., Aliev M.A., Asvarov A.Sh., Gadgieva R.M., Bilalov B.A., Ismailov A.M., Shomakhov Z.V. The dependence of surface morphology and structure of $CuIn_{0.95}Ga_{0.5}Se_2$ films on selenization temperature. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 107–117. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-107-117

Введение. Соединения $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ (CIGS) используются в качестве оптически-активного слоя в тонкопленочных солнечных элементах нового поколения [1]. Эффективность преобразования солнечной энергии структур на основе пленок CIGS составляет порядка 21,7–22,3 % [2, 3]. В зависимости от выбора технологии получения пленок CIGS наблюдается разброс электрофизических и фотоэлектрических параметров фотопреобразователей, что связано в первую очередь с формируемой в пленках микроструктурой и их фазовым составом.

Методы изготовления солнечных элементов на основе CIGS можно разделить на две основные группы: вакуумные и невакуумные [4]. Одними из перспективных являются различные многостадийные методы получения пленок CIGS, основанные на отжиге и селенизации интерметаллических прекурсоров [5]. Преимущество селенизации в атмосфере, содержащей селен, заключается в отсутствии необходимости точного контроля технологических параметров синтеза, поскольку металлические прекурсоры в виде тонких пленок поглощают необходимое для стехиометрии количество селена. Установлено, что в ряде случаев при селенизации интерметаллической пленки образуется смесь фаз бинарных селенидов, что усложняет исследование механизмов селенизации интерметаллической пленки. Наличие обогащенного галлием слоя вблизи нижнего контактного электрода – характерная особенность пленок, полученных методом селенизации. Обогащенный галлием слой, особенно при его больших концентрациях, препятствует переносу электронов на границе с задним контактом, что негативно влияет на параметры солнечных элементов [5]. Изучение процессов разделения фаз и формирования однофазной пленки CIGS является ключевым моментом при изготовлении высококачественных поглощающих слоев.

Цель настоящей работы – получение методом селенизации и комплексное исследование морфологии поверхности, химического состава и структуры пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ различной толщины. Для этого решались следующие задачи:

- разработка технологии получения пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ различной толщины управляемой селенизацией слоев Cu-In-Ga двухэтапным методом в двухзонной термодиффузионной установке с участием газа-носителя (N_2) реакционной компоненты (Se);
- исследование морфологии поверхности синтезированных пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ и проведение статистического анализа распределения поверхностной плотности микровключений;
- проведение химического анализа пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$;
- получение дифрактограмм пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ и обработка данных с использованием специализированного программного обеспечения High Score Plus.

Эксперимент. Осаждение предварительных интерметаллических медно-индий-галлиевых (CIG) пленок на стеклянных подложках проводилось на автоматизированном магнетронном комплексе «ВАТТ АМК-МИ» (ООО «ФерриВатт», Россия) распылением сплавной мишени CIG на постоянном токе. В установке использовались вакуумные насосы для получения «сухого» вакуума (спиральный форвакуумный насос Anest Iwata ISP-500 C, Япония; криогенный высоковакуумный насос Cryogenics CryoTorr 8, США). Перед каждым распылением вакуумная камера откачивалась до остаточного давления ~ $9 \cdot 10^{-5}$ Па. Давление рабочего газа (аргона) регулировалось с помощью РРГ-10 (ООО «Элточприбор», Россия) и измерялось широкодиапазонным вакуумметром TELEVAC CC-10 (США). Мишень устанавливалась на водоохлаждаемое основание магнетрона без пайки и прижима. В качестве подложки использовались прямоугольные пластинки стекла размером 15×15 мм. Нагрев подложки обеспечивался резистивным нагревателем, ее температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Типичные условия осаждения интерметаллических пленок CIG следующие: давление рабочего газа 0,1 Па; плотность тока разряда 10 мА/см^2; расстояние мишень – подложка 25 мм; скорость осаждения 1,0 нм/с; температура подложки 150 °C.

В качестве мишени использовался проводящий диск диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, изготовленный сплавлением исходных элементов Cu (99,99 %), In (99,999 %) и Ga (99,999 %), помещенных в квазигерметичный графитовый контейнер, в высоковакуумной печи СШВЭ-1.3-1/16. После предварительной откачки до остаточного давления

$0{,}5\cdot10^{-4}$ Па процесс синтеза мишени проводился при давлении 10 Па и температуре 1100 °С в течение 30 мин.

Тонкие пленки $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ получали управляемой селенизацией слоев CIG двухэтапным методом [6] в двухзонной термодиффузионной установке с участием газа-носителя (N_2) реакционной компоненты (Se) [7, 8]. Температуру селенизации в зоне реакции слоев CIG с Se варьировали в области $350 \le T_{sel} \le 550$ °С, давление парогазовой смеси Se + N_2 на этапе рекристаллизации увеличивали до 10^{-1} Па [9].

Морфология поверхности синтезированных пленок CIGS исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии на установке LEO-1450. Химический состав пленок изучался методами рентгенофлуоресцентного анализа и энергодисперсионного рентгеновского анализа с использованием аналитического рентгеновского коротковолнового спектрометра СПАРК-1-2М и EDX-анализатора Oxford Inca 200 соответственно.

Фазовый состав и структурные свойства выращенных пленок CIGS исследовались на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с длиной волны излучения (CuKα) λ = 0,15418 нм в диапазоне углов 2θ от 15 до 60° с шагом 0,02°. Идентификация фаз осуществлялась сравнением экспериментально установленных межплоскостных расстояний с данными ICDD (The International Centre for Diffraction Data).

Результаты и их обсуждение. ***Эффект температуры селенизации.*** Пленки, синтезированные методом двухстадийной селенизации интерметаллических слоев при температуре селенизации T_{sel} = 350...550 °С, характеризуются отсутствием микропроколов и хорошей адгезией к поверхности использованных стеклянных подложек. На рис.1 представлены микрофотографии пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Si_2$. Из рисунка видно, что в пленке, полученной при температуре T_{sel} = 350 °С, присутствуют малые очаговые микровключения, представляющие собой объемные области неправильной формы. Диаметр для большинства микровключений не превышает 0,3 мкм. С ростом T_{sel} до 500 °С на поверхности пленки наблюдается монотонное увеличение среднего размера микровключений до 0,7 мкм, часть из которых образует конгломераты.

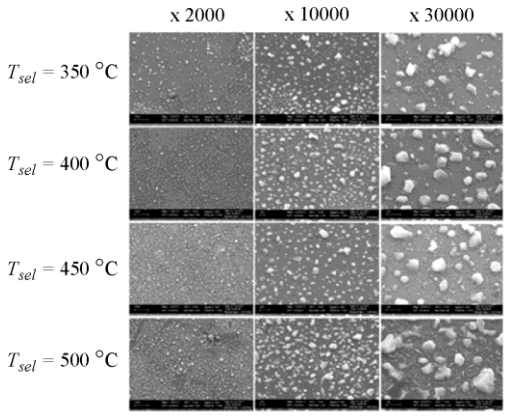


Рис.1. Морфология поверхности пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученных при разной температуре селенизации

Fig.1. The surface morphology of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at selenization temperatures

На рис.2 показаны результаты проведенного статистического анализа распределения поверхностной плотности микровключений. Известно, что распределение поверхностной плотности микровключений по размерам подчиняется логнормальному закону при $L > 0$:

$$f(L)=\frac{1}{L\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{\ln^2(L/a)}{2\sigma^2}\right),\ \text{где}\ f(L)\to\frac{n(L)}{S}.$$

Здесь a и σ (среднее квадратическое (стандартное) отклонение) – параметры логнормального распределения; $n(L)$ – число микровключений размером L; S – площадь пленки; $f(L) = 0$ при $L \to 0$.

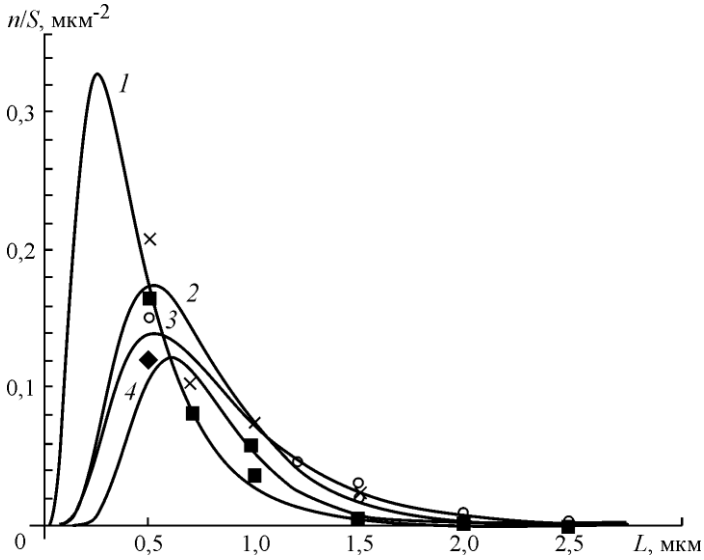


Рис.2. Распределение количества микровключений по размерам на единицу площади пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученных при разной температуре селенизации: *1* – 350 °С; *2* – 400 °С; *3* – 450 °С; *4* – 500 °С

Fig.2. The microinclusion size distribution per unit area of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at selenization temperatures: *1* – 350 °C; *2* – 400 °C; *3* – 450 °C; *4* – 500 °C

На микрофотографиях (см. рис.1) видно, что размеры микровключений при разной температуре селенизации варьируются в пределах $0,5 \le L \le 3,0$ мкм. Из результатов статистического анализа следует, что чем выше температура селенизации, тем крупнее оказывается средний размер микровключений в пленке. Зависимость среднего латерального размера кристаллитов от температуры селенизации линейна (рис.3). Из данного графика путем экстраполяции прямой на ось температуры получено значение минимальной температуры селенизации $T_{min} \approx 220$ °С, при которой возможно образование микровключений. Отметим, что эта температура близка к температуре образования соединения Cu_2Se.

Исследования химического состава синтезированных пленок методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что химический состав микро-

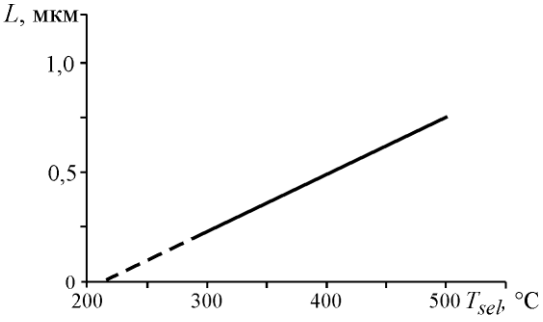


Рис.3. Зависимость среднего размера микровключений в пленках $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от температуры селенизации

Fig.3. The temperature dependence plot of medium size microinclusions in $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at $T_{sel} = 350...500$ °C

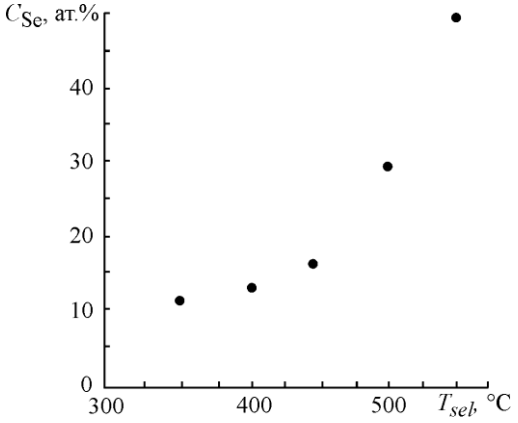


Рис.4. Концентрация селена в пленках $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученных при разной температуре селенизации

Fig.4. Selenium concentration in $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at different selenization temperatures

включений не отличается от состава основной пленки и распределение всех химических элементов по поверхности пленок равномерно. Результаты проведенного рентгенофлуоресцентного анализа представлены на рис.4. Видно, что концентрация селена в пленках с ростом температуры селенизации увеличивается и при $T_{sel} \geq 500$ °C достигает значений, соответствующих стехиометрическому составу CIGS.

Согласно данным рентгеновского фазового анализа (рис.5), процесс образования кристаллической фазы CIGS начинается при $T_{sel} = 350$ °C. С ростом температуры синтеза формируются поликристаллические пленки со структурой халькопирита. На дифрактограммах, полученных методом рентгеновской дифракции (XRD), присутствует серия дифракционных рефлексов, соответствующих отражению от плоскостей (112), (013), (121), (220/024), (116/132). С ростом температуры селенизации наблюдается рост интенсивности линии (112). Кроме того, на XRD-спектрах отмечаются рефлексы малой интенсивности, указывающие на формирование вторичных одинарных и двойных селенидов.

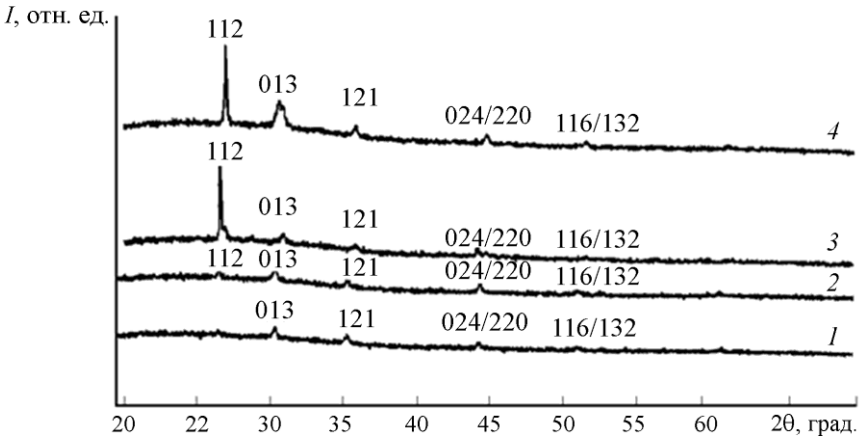


Рис.5. Дифрактограмма пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученных при разной температуре селенизации: *1* – 350 °C; *2* – 400 °C; *3* – 450 °C; *4* – 500 °C

Fig.5. X-ray diffraction pattern of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at different selenization temperatures: *1* – 350 °C; *2* – 400 °C; *3* – 450 °C; *4* – 500 °C

В табл.1 представлены результаты обработки XRD-спектров, проведенной с использованием программ High Score Plus. Видно, что с ростом температуры селенизации происходит смещение местоположения рефлекса (112) в область больших значений 2θ и уменьшение его интегральной ширины β. Угловое расположение рефлекса (112) при 26,66°, наблюдаемое в пленке, полученной при $T_{sel} = 350$ °C, указывает на образование в первую очередь кристаллитов с составом, близким к $CuInSe_2$. Вероятно, при низкой температуре селенизации происходит синтез такого рода образований с одновременным оттеснением галлия в область межзеренных границ. С ростом температуры селенизации основной пик (112) смещается в сторону больших углов 2θ по закону Вегарда, что указывает на изменение решетки и вовлечение галлия в образование четырехкомпонентного материала. На основе данных местоположения и интегральной ширины XRD-рефлекса (112) пленок вычислен средний размер кристаллитов D по формуле Селякова – Шеррера [10]. С ростом T_{sel} до 500 °C наблюдается увеличение среднего размера D от 55 до 79 нм.

Таким образом, исследования зависимости процесса селенизации интерметаллических слоев от температуры селенизации показали, что T_{min} компонентов интерметаллического слоя составляет ≈ 220 °C, формирование кристаллической фазы халькопирита начинается при $T_{sel} = 350$ °C, кристаллическое совершенство пленок CIGS наблюдается с ростом температуры процесса. При этом для достижения требуемой стехиометрии пленок CIGS процесс селенизации необходимо проводить при $T_{sel} \geq 500$ °C.

Таблица 1

Результаты обработки XRD-спектров пленок, полученных при различной температуре селенизации

Table 1

The results of the processing of the XRD spectra of the samples obtained at different selenization temperatures

Температура селенизации T_{sel}, °C	Угловое расположение рефлекса $2\theta_{112}$, град.	Интенсивность I_{112}, отн. ед.	Интегральная ширина рефлекса (112) β, град.	Размер кристаллитов D, нм
350	26,660	105	0,276	55
400	26,682	246	0,203	63
450	26,714	1932	0,199	71
500	26,723	2337	0,186	79

Эффект толщины интерметаллического слоя. В работе исследовались морфология поверхности и микроструктура пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученных в ходе селенизации при температуре T_{sel} = 550 °C образцов интерметаллических слоев CIG разной толщины. На рис.6 представлены микрофотографии поверхности пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$. Характерно, что пленки состоят из микрозерен, диаметр которых растет с ростом толщины, и происходит слияние микрозерен в конгломераты диаметром 3–6 мкм. С ростом толщины исходного интерметаллического слоя CIG количество таких конгломератов увеличивается. С ростом толщины исходной пленки до 1 мкм в результате селенизации наблюдается увеличение рельефа пленок за счет формирования на поверхности пленок крупных зерен с формой, близкой к сферической. Дальнейшее увеличение толщины исходной пленки приводит к сглаживанию рельефа и формированию более плотных пленок. На основании статистического анализа полученных изображений построены кривые распределения среднего латерального размера конгломератов, образующихся в процессе селенизации, на единицу площади пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ (рис.7). Характер кривых позволяет утверждать, что распределение плотности конгломератов по размерам подчиняется логнормальному закону. Из графика зависимости среднего латерального размера конгломератов микрозерен в пленках $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ от толщины исходной пленки CIG (рис.8) экстраполяцией линейного участка на вертикальную ось определено значение минимально возможного диаметра конгломерата микрозерен $d_{min} \approx 260$ нм. Данное характерное значение d_{min} можно рассматривать как минимально необходимую толщину исходного интерметаллического слоя CIG для формирования сплошной тонкой пленки $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$.

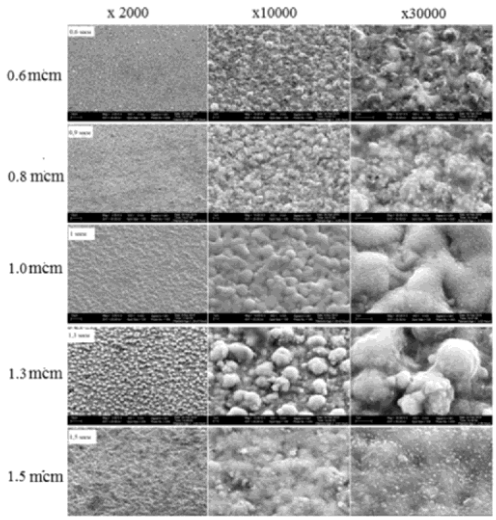


Рис.6. Морфология поверхности пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ разной толщины, полученных при T_{sel} = 550 °C

Fig.6. The surface morphology of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at T_{sel} = 550 °C for different thicknesses

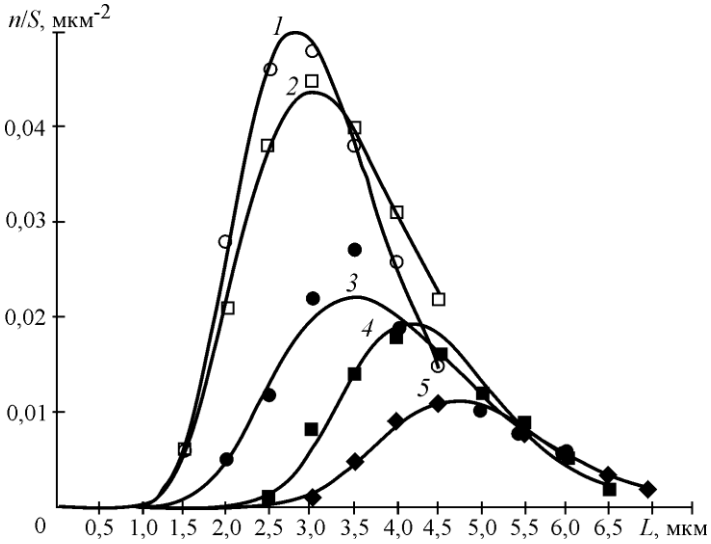


Рис.7. Распределение среднего латерального размера конгломератов на единицу площади пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ разной толщины, полученных при T_{sel} = 550 °С: *1* – 0,6 мкм; *2* – 0,9 мкм; *3* – 1 мкм; *4* – 1,3 мкм; *5* – 1,5 мкм

Fig.7. The microinclusion size distribution per unit area of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at T_{sel} = 550 °C for thicknesses: *1* – 0.6 mcm; *2* – 0.9 mcm; *3* – 1 mcm; *4* – 1.3 mcm; *5* – 1.5 mcm

Исследования микроструктуры и фазовый анализ методом рентгеновской дифракции показали, что с ростом толщины исходного слоя интенсивность основных рефлексов отражения от плоскостей кристаллической фазы халькопирита растет (рис.9). Это обусловлено увеличением толщины формируемой пленки. При этом соотношение интенсивностей основных рефлексов близко к табличным значениям, что свидетельствует об отсутствии какой-либо преимущественной ориентации кристаллитов в пленках. Данные обработки XRD-спектров образцов, полученных при селенизации исходных интерметаллических пленок CIG различной толщины, обобщены в табл.2. На примере данных по рефлексу (112) можно отметить, что с увеличением толщины селенизируемой пленки помимо роста интенсивности рефлексов наблюдается уменьшение их интегральной ширины, что соответствует увеличению среднего размера образующихся кристаллитов от 82 до 142 нм.

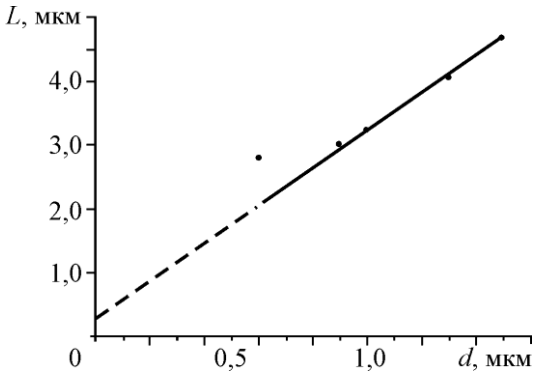


Рис.8. Зависимость среднего латерального размера конгломератов микрозерен пленки $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$, полученной при T_{sel} = 550 °С, от толщины исходной пленки CIG

Fig.8. The dependence plot of micrograin conglomerate medium lateral size on a thickness of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ film prepared at T_{sel} = 550 °C

Значения вычисленных параметров решетки *a* и *c* для синтезированных пленок хорошо согласуются с данными картотеки ICDD. При этом соотношение *c*/*a* незначительно уменьшается с ростом толщины исходного слоя [11]. Для пленки толщиной 1,5 мкм $c/a \approx 2$, что указывает на высокое совершенство полученных пленок $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$. Данная зависимость, по-видимому, связана с уменьшением микронапряжений, возникающих на границе раздела подложка – пленка. Кроме того, увеличение среднего размера кристаллитов с ростом толщины селенизируемой пленки приводит к уменьшению размеров межзерновых границ, содержащих дефекты (за счет сегрегации компонентов пленок из объема зерна).

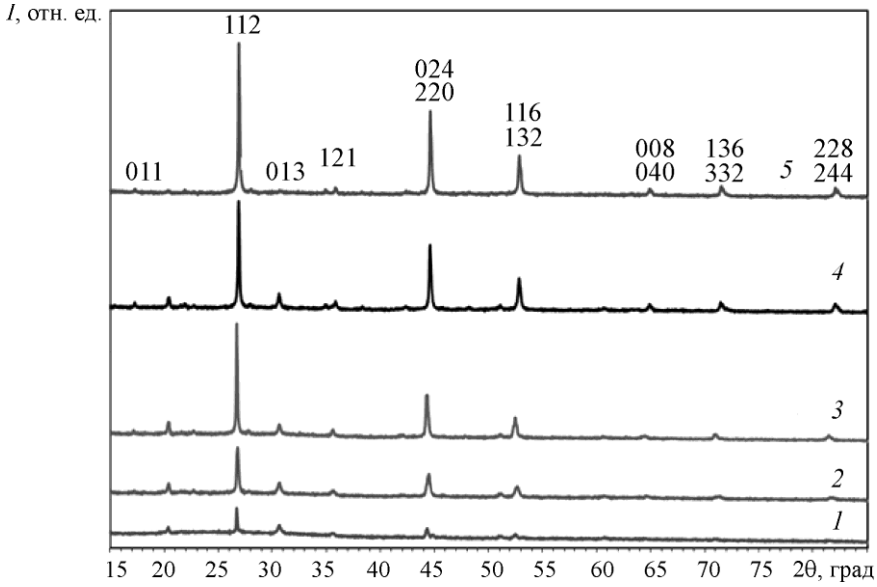


Рис.9. Дифрактограммы пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ разной толщины, полученных при T_{sel} = 550 °C: *1* – 0,6 мкм; *2* – 0,9 мкм; *3* – 1 мкм; *4* – 1,3 мкм; *5* – 1,5 мкм

Fig.9. X-ray diffraction pattern of various thickness $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ films prepared at different T_{sel} = 550 °C: *1* – 0.6 mcm; *2* – 0.9 mcm; *3* – 1 mcm; *4* – 1.3 mcm; *5* – 1.5 mcm

Таблица 2

Результаты обработки XRD-спектров образцов, полученных методом селенизации пленок CIG различной толщины

Table 2

The results of the processing of the XRD spectra of the samples obtained by selenization of differently thick

Толщина CIG *d*, мкм	Угловое расположение рефлекса $2\theta_{112}$, град.	Интенсивность I_{112}, отн. ед.	Интегральная ширина рефлекса (112) β112, град.	Соотношение *c*/*a*	Размер кристаллитов *D*, нм
0,6	26, 680	758	0, 181	2,01	82
0,8	26, 682	1275	0, 123	2,008	94
1,0	26, 749	3117	0, 115	2,004	98
1,3	26, 848	3492	0, 102	2,002	106
1,5	26, 877	4318	0, 088	2,002	142

Заключение. Исследования показали, что в результате селенизации слоев CIG двухэтапным методом в двухзонной термодиффузионной установке с участием газа-носителя реакционной компоненты (Se) формируются поликристаллические пленки CIGS со структурой халькопирита. Морфология поверхности, микроструктура и стехиометрия синтезированных пленок существенно зависят от температуры селенизации, а также от толщины исходного селенизируемого слоя.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможной приемлемости предложенной технологии получения пленок $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ для использования в качестве активного фоточувствительного слоя высокоэффективных преобразователей солнечного излучения.

Литература

1. ***Schock H-W., Noufi R.*** Progress in Photovoltaic's // Research and Applications. – 2000. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 151–160.

2. Properties of $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells with new record efficiencies up to 21.7% / ***J. Philip, H. Dimitrios, W. Roland et al.*** // Phys. Status Solidi. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 1–96.

3. Solar Frontier hits 22.3 % on CIGS Cell // Solar Frontier Press Release. – 2015. – URL: http://www.solar-frontier.com/eng/news/2015/C051171. html (дата обращения: 10.09.2018).

4. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / ***В.А. Миличко, А.С. Шалин, И.С. Мухин и др.*** // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – № 8. – С. 801–815.

5. ***Новиков Г.В., Гапанович М.В.*** Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se) // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187. – № 2. – С. 173 – 191.

6. ***Билалов Б.А., Гаджиев Т.М., Сафаралиев Г.К.*** Способ получения тонкой пленки диселенида меди и индия $CuInSe_2$ // Патент 2354006 RU, МПК H01L31/18/2009. Бюл. №12. – 5 с.

7. Вакуумная трубчатая печь / ***Т.М. Гаджиев, Р.М. Гаджиева, Р.К. Арсланов и др.*** // Патент 116614 RU, МПК F27B5/04/2012. Бюл. №15. – 5 с.

8. Устройство для натекания газа / ***Т.М. Гаджиев, И.Г. Зубаилов, Р.К. Арсланов и др.*** // Патент 168325 RU, МПК F17C 13/00. 2017. Бюл. №4. – 5 с.

9. Технология получения и оптическое поглощение пленок полупроводниковых растворов $CuIn_{0,95}Ga_{0,05}Se_2$ / ***М.А. Алиев, С.Н. Каллаев, Т.М. Гаджиев и др.*** // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – № 14. – С. 1–6.

10. ***Holzwarth U., Gibson N.*** The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation' // Nature Nanotechnology. – 2011. – Vol. 6. – P. 534.

11. ***Leon M., Merino J.M., Fernandez-Ruiz R.*** X-ray diffraction data and Rietveld refinement of $CuGaxIn_{1-x}Se_2$ (x = 0.15 and 0.50) // Friedrich.Powder Diffraction. – 2010. – Vol. 25. – Iss. 3. – P. 253–257.

Поступила в редакцию 18.09.2018 г.; после доработки 29.10.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Гаджиев Тимур Мажлумович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук (Россия, Республика Дагестан, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94), gadjiev_timur@mail.ru

Алиев Марат Алиевич – младший научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук (Россия, Республика Дагестан, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94), aliev_marat@mail.ru

Асваров Абил Шамсудинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук (Россия, Республика Дагестан, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94), abil-as@list.ru

Гаджиева Риза Магомедовна – научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук (Россия, Республика Дагестан, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 94), aliev_marat@mail.ru

Билалов Билал Аругович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой микроэлектроники Дагестанского государственного технического университета (Россия, Республика Дагестан, 367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, д. 70), bil-bilal@yandex.ru

Исмаилов Абубакар Магомедович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Дагестанского государственного университета (Россия, Республика Дагестан, 367000, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43а), egdada@mail.ru

Шомахов Замир Валериевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173), ведущий научный сотрудник Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, д. 89А), shozamir@yandex.ru

References

1. Schock H-W., Noufi R. Progress in Photovoltaic's. *Research and Applications*, 2000, vol. 8, iss. 1, pp.151–160.

2. Philip J., Dimitrios H., Roland W., Oliver K., Andreas B., Theresa M.F., Michael P. Properties of Cu(In,Ga)Se_2 solar cells with new record efficiencies up to 21.7%. *Phys. Status Solidi*, 2015, vol. 9, iss. 1, pp. 1–96.

3. Solar Frontier hits 22.3 % on CIGS Cell. *Solar Frontier Press Release*, 2015. Available: http://www.solar-frontier.com/eng/news/2015/C051171. html (accessed: 10.09.2018).

4. Milichko V.A., Shalin A.S., Kovrov A.E., Krasilin A.A., Vinogradov A.V., Belov P.A., Mukhin I.S., Simovski C.R. Solar photovoltaics: Current state and trends. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 727–772. (in Russian).

5. Novikov G.F., Gapanovich M.V Third-generation Cu-In-Ga-(S, Se)-based solar inverters. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 161–178. (in Russian).

6. Bilalov B.A., Gadzhiev T.M., Safaraliev G.K. *Method for production of thin films of Cu and $CuInSe_2$*. Patent RU 2354006, filed Oct. 22, 2007, and issued Apr. 27, 2009. (in Russian).

7. Gadzhiev T.M., Gadzhieva R.M., Arslanov R.K., Kurutsov M.G., Zubailov I.G. *Vacuum tube furnace*. Patent RU 116614, filed Dec. 19, 2011, and issued May 27, 2012. (in Russian).

8. Gadzhiev T.M., Zubailov I.G., Arslanov R.K., Kurutsov M.G., Aliev M.A., Gadzhieva R.M. *Gas flow device*. Patent RU 168325, filed March 30, 2016, and issued Jan. 30, 2017. (in Russian).

9. Aliev M.A., Kallaev S.N., Gadzhiev T.M., Gadzhieva R.M., Ismailov A.M., Bilalov B.A. Production technology and optical absorption characteristics of $CuIn_{0.95}Ga_{0.05}Se_2$ semiconductor solid solution films. *Pis'ma v ZHTF = Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 7, pp. 715–717. (in Russian).

10. Holzwarth U., Gibson N. The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation'. *Nature Nanotechnology*, 2011, vol. 6, p. 534.

11. Leon M., Merino J.M., Fernandez-Ruiz R. X-ray diffraction data and Rietveld refinement of $CuGaxIn_{1-x}Se_2$ (x = 0.15 and 0.50). *Friedrich. Powder Diffraction*, 2010, vol. 25, iss.3, pp. 253–257.

Received 18.09.2018; Revised 29.10.2018; Accepted 22.01.2019

Information about the authors:

Timur M. Gadzhiev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Scientist, Institute of Physics of Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Russia, Daghestan Republic, 367015, Makhachkala, Yaragsky st., 94), gadjiev_timur@mail.ru

Marat A. Aliev – Junior Research Scientist, Institute of Physics of Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Russia, Daghestan Republic, 367015, Makhachkala, Yaragsky st., 94), aliev_marat@mail.ru

Abil Sh. Asvarov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Research Scientist, Institute of Physics of Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Russia, Daghestan Republic, 367015, Makhachkala, Yaragsky st. 94), abil-as@list.ru

Riza M. Gadgieva – Research Scientist, Institute of Physics of Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Russia, Daghestan Republic, 367015, Makhachkala, Yaragsky st. 94), aliev_marat@mail.ru

Bilal A. Bilalov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Microelectronics Department, Daghestan State Technical University (Russia, Daghestan Republic, 367015, Makhachkala, Shamil st., 70), bil-bilal@yandex.ru

Abubakar M. Ismailov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., of the Physical Electronics Department, Daghestan State University (Russia, Daghestan Republic, 367000, Makhachkala, Gadjieva st., 43a), egdada@mail.ru

Zamir V. Shomakhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics and Information Technology Department, Kabardino-Balkarian State University (Russia, Kabardino-Balkar Republic, 360004, Nalchik, Chernyshevsky Str. 173), Leading Researcher at the Institute of Applied Mathematics and Automation of Kabardino-Balkarian Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Russia, Kabardino-Balkar Republic, 360000, Nalchik, Shortanova st., 89A), shozamir@yandex.ru

УДК 621.315.592 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-118-128

Формирование низкоомных слоев *p*-типа в гетероструктурах $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$

Е.Н. Вигдорович

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

evgvig@mail.ru

Технология изготовления функциональной гетероструктуры на основе GaN дает возможность выращивать слои GaN и $In_xGa_{1-x}N$ *n*-типа и слои GaN и $Al_xGa_{1-x}N$ *p*-типа. Если с получением слоев *n*-типа особых технологических проблем в настоящее время не существует, то получение слоев *p*-GaN – сложная задача. В работе показано, что в процессе получения легированного акцепторами GaN (при большом избытке NH_3) с применением металлоорганических соединений существует термодинамическая возможность образования высокой концентрации нейтральных комплексов $(A\text{-H})^0$. Установлено, что уменьшение концентрации акцептора и, соответственно, водорода в слоях снижает концентрацию нейтральных комплексов и упрощает технологическую задачу получения низкоомных слоев *p*-типа даже при низких концентрациях акцептора. Однако это требует разработки новых технологических приемов уменьшения содержания водорода и нежелательных примесей, таких как Si, O_2 и C, при эпитаксии GaN. Оптимальный расход Cp_2Mg, при котором в эпитаксиальном слое достигается максимально возможная концентрация магния $(6–8)\cdot10^{20}$ $см^{-3}$, составляет около 20–30 л/мин. Для достижения максимальных значений квантового выхода отжиг гетероструктур необходимо проводить в узком диапазоне температур (1063–1073 K).

***Ключевые слова*:** нитрид галлия; акцепторы; нейтральные комплексы; активация примеси

***Для цитирования*:** Вигдорович Е.Н. Формирование низкоомных слоев *p*-типа в гетероструктурах $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$ // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 118–128. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-118-128

© Е.Н. Вигдорович, 2019

The Formation of Low Resistivity Layers of *p*-type in Heterostructure $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$

E.N. Vigdorovich

MIREA – Russian University of technology, Moscow, Russia

evgvig@mail.ru

Abstract: When designing a functional heterostructure based on GaN, its manufacturing technology should allow to grow GaN and $In_xGa_{1-x}N$ layers of *n*-type conductivity and GaN and $Al_xGa_{1-x}N$ *p*-type conductivity. Specially unalloyed epitaxial layers GaN and $In_xGa_{1-x}N$ have *n* type of conductivity with electron concentration ranging from $1\cdot10^{16}$ to $1\cdot10^{17}$ cm^{-3}. In many works it is reliably established that uncontrolled donors are vacancies in the field of nitrogen atoms in the crystal lattice. These donors form small energy levels in the forbidden zone. The Ge and Si atoms in the GaN semiconductor are small donors. To create highly doped layers with a high concentration of electrons up to $1\cdot10^{19}$ cm^{-3}, it is necessary to carry out a special doping with donor impurities during their cultivation. Impurities Si, O_2, C and structural defects, as a rule, form different neutral and electroactive complexes with each other, which, as studies show, easily disintegrate at temperatures $T > 600$ K. If there are currently no specific technological problems with obtaining *n* – layers, then obtaining *p*-GaN layers was the most difficult problem. It is shown that in the process of obtaining the method of MOCVD doped with GaN acceptors (with a large excess of NH_3), there is a thermodynamic possibility of localization of acceptors (A) due to the formation of a high concentration of neutral complexes $(A\text{-}H)^0$. It is established that the decrease in the concentration of the acceptor and, accordingly, hydrogen in the layers will reduce the localization of the acceptor in neutral complexes and simplify the technological task of obtaining low-resistance layers of the hole type of conductivity even at low concentrations of the acceptor. However, this will require the development of new technological methods, since such a task is directly related to the reduction in the epitaxy of GaN hydrogen content and «undesirable» impurities, such as Si, O_2 and C. The optimal expenditure of Cp_2Mg, at which in the epitaxial layer the maximally possible concentration of Mg $(6–8)\cdot10^{20}$ cm^{-3} is achieved, is about 20–30 l/min. To achieve maximum values quantum yield annealing of heterostructures must be necessarily conducted in the temperature range (1063–1073 K).

***Key words*:** gallium nitride; acceptors; neutral complexes; impurity activation

***For citation*:** Vigdorovich E.N. The formation of low resistivity layers of *p*-type in heterostructure $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 118–128. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-118-128

Введение. Улучшение и расширение диапазона функциональных характеристик электронных систем, в том числе оптического и СВЧ-диапазона, связаны с разработкой элементной базы гражданского и военного назначения [1, 2]. Перспективным материалом для этих целей является нитрид галлия (GaN) в виде многокомпонентных упруго-напряженных наногетероструктур AlN/AlGaN/GaN/InGaN/GaN *n*- и *p*-типа [3, 4]. Высокая критическая напряженность поля GaN дает возможность реализовывать более высоковольтные приборы, большая ширина запрещенной зоны обеспечивает стабильность свойств при изменении температуры или воздействии радиации. Это важно в первую очередь для космической и военной электроники, а также для устройств, работающих в жестких условиях. Высокая подвижность электронов в GaN и дрейфовая ско-

рость определяют значительно меньшее сопротивление в проводящем состоянии и большую удельную мощность по сравнению с кремнием [5].

Основная проблема при создании мощных полевых транзисторов на основе GaN – «выброс» большим электрическим полем вблизи края затвора электронов из канала на поверхность пластины и в слой GaN, что приводит к увеличению сопротивления канала. В результате возникает явление коллапса, т.е. ток стока при росте напряжения стока резко падает [6]. При продольной конфигурации структуры справиться с коллапсом тока позволяет поляризация верхней и нижней границ раздела канала AlGaN. В результате у границ раздела формируются двухмерный дырочный газ (2DHG) с концентрацией дырок $1{,}3\cdot10^{13}$ см$^{-2}$ и двухмерный электронный газ (2DEG), что значительно подавляет коллапс тока. В качестве недостатка продольной геометрии можно отметить большое продольное расстояние, пропорциональное рабочему напряжению и току, и низкую термическую стойкость из-за использования кремниевой подложки. Транзисторы, созданные на основе вертикальных гомоэпитаксиальных GaN-структур, лишены данных недостатков. В таких устройствах ток протекает через GaN-подложку вертикально и большая часть падения напряжения приходится на вертикальное направление. Размер кристалла может быть в пять и более раз меньше, чем при продольной структуре. Более того, в вертикальной структуре при отсутствии коллапса тока повышаются скорости переключения и термическая стойкость. Отметим, что вертикальная конфигурация требует биполярной *p*–*n*-структуры. Получение низкоомных слоев *p*-типа позволяет создавать излучатели синего, зеленого и белого свечения высокой мощности [7].

При создании нелегированных слоев GaN с применением металлоорганических соединений (МОС-гидридная эпитаксия) независимо от условий получается устойчивый электронный тип проводимости. Это связано главным образом с возникновением в слоях высокой концентрации азотных вакансий и «неконтролируемым» легированием Si, O_2 и C. Примеси Si, O_2, C и структурные дефекты, как правило, образуют друг с другом различные нейтральные и электроактивные комплексы, которые, как показывают исследования, легко распадаются при температуре $T > 600$ К.

В настоящее время не существует технологических проблем при получении слоев *n*-типа, гораздо сложнее получить слои *p*-GaN. Цель настоящей работы – исследование получения слоев *p*-типа в гетероструктурах $Ga_{1-x}Al_xN/GaN$.

Акцепторы в GaN. В соответствии с моделью тетраэдрических связей в соединениях и твердых растворах в системе AlGaN атомы элементов II группы (Zn, Cd, Mg и Be), введенные в подрешетку элементов III группы, – типичные акцепторы. Известно, что при легировании твердых растворов $Al_{1-x}Ga_xN$ цинком и кадмием возникают глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне (0,34 и 0,55 эВ соответственно). Это затрудняет образование свободных дырок при комнатной температуре. Бериллий и его летучие соединения химически активны и опасны для здоровья человека, поэтому его использование в качестве легирующего компонента требует повышенных мер безопасности и усложняет технологическую реализацию процесса.

В качестве основного элемента для создания *p*-типа проводимости в GaN используется магний. Однако даже при увеличении концентрации акцепторов (Mg, Zn) до 10^{20} см$^{-3}$ в процессе эпитаксии получают высокоомные компенсированные (*i*) слои. Учитывая высокую растворимость акцепторов в соединениях $A^{III}B^{V}$, можно было ожидать, что увеличение при легировании концентрации акцепторов (более 10^{20} см$^{-3}$) приведет к образованию дополнительных структурных и точечных дефектов. Однако этого не наблюдается. Причем в некоторых случаях обнаружена инверсия типа проводимости. Это явление можно объяснить, если предположить, что решающую роль в формировании свойств легированных акцепторами слоев GaN играет водород. Во-первых, водород является основным газом-носителем при газофазной эпитаксии. Во-вторых, при взаимодействии, например, МОС Ga с NH_3 в процессе МОС-гидридной эпитаксии основным продуктом реакции кроме GaN является атомарный водород. При разложении МОС

также возможно образование атомарного водорода. Водород в GaN может являться донором (H^+) или акцептором (H^-), и его поведение будет определяться реальными условиями эпитаксии GaN. Так, при наличии в слоях донорных примесей водороду энергетически выгодно быть акцептором (H^-). При этом, вероятнее всего, будут образовываться неустойчивые при высокой температуре нейтральные или донорные комплексы. В случае легирования слоев акцепторными примесями водороду энергетически выгоднее быть донором (H^+), и тогда возможно образование комплексов типа $(A\text{-H})^0$.

Растворимость примесей в GaN. При термодинамическом равновесии процесс растворения примесей в GaN можно записать в виде

$$2GaN + 3Mg \leftrightarrow Mg_3N_2 + 2Ga,$$
$$2GaN + 3Zn \leftrightarrow Zn_3N_2 + 2Ga,$$
$$2GaN + 3H_2 \leftrightarrow 2NH_3 + 2Ga.$$

Расчетные значения изобарно-изотермического потенциала для этих реакций в широком интервале температур отрицательны, что свидетельствует о термодинамической возможности их протекания. Константу равновесия для реакции растворения магния можно представить как

$$K_\text{p}(\text{Mg}) = \frac{a_{\text{Mg}_3\text{N}_2} a_{\text{Ga}}^2}{a_{\text{GaN}}^2 a_{\text{Mg}}^3},$$

где a – активность соответствующих компонентов.

Аналогично можно выразить константу равновесия и для растворения Zn и H. Считая, что реакция проходит в растворе, и начиная с некоторой концентрации примеси N_i, галлий и нитриды примесей будут присутствовать в виде избыточных фаз, получаем для идеальных растворов уравнение для определения константы равновесия:

$$K_\text{p} = \frac{1}{N_{\text{GaN}}^n N_i^3},$$

здесь N – концентрация; n – стехиометрический коэффициент.

Так как $N_{\text{GaN}} \sim 1$ мольной доли, а K_p связана с изобарно-изотермическим потенциалом AZ_r выражением

$$\Delta Z_T = -RT \ln K_\text{p}, \quad \Delta Z_T = -RT \ln(1/N_i^3),$$

получаем

$$N_i = \exp\left(\frac{-\Delta Z_T}{3RT}\right).$$

Таким образом, рассчитав значения изобарно-изотермического потенциала, можно определить предельную равновесную концентрацию примеси (растворимость) в GaN. Результаты расчета предельной концентрации атомарного водорода в GaN при наличии молекулярного азота при различных температурах приведены в табл. 1. При расчете использовались термодинамические данные из [8–10].

В [11] показано, что растворимость подвижных доноров при наличии малоподвижного акцептора возрастает. На основании этого можно заключить, что предельная концентрация атомарного водорода при легировании GaN акцепторами Mg и Zn может быть выше расчетной и составлять более 10^{20} см$^{-3}$. Данный вывод подтвержден прямыми измерениями (SIMS). Так как концентрация атомарного водорода в системе определяется разложением NH_3, добавление азота в соответствии с реакцией

$$GaN + 9H + (3/2)N_2 <=> Ga + 3NH_3$$

Таблица 1

Равновесная предельная концентрация, см$^{-3}$, водорода и акцепторов в GaN

Table 1

The equilibrium concentration, cm^{-3}, of hydrogen acceptors in GaN

T, K	H		Mg	Zn
	NH_3+H_2	NH_3+N_2		
800	$1{,}4\cdot10^{16}$	$2{,}5\cdot10^{15}$	$3{,}3\cdot10^{20}$	$>10^{21}$
900	$9{,}2\cdot10^{17}$	$1{,}2\cdot10^{17}$	$1{,}0\cdot10^{21}$	
1200	$1{,}5\cdot10^{19}$	$2{,}6\cdot10^{18}$	$2{,}1\cdot10^{21}$	
1400	$1{,}1\cdot10^{20}$	$2{,}3\cdot10^{19}$	$3{,}5\cdot10^{21}$	

будет способствовать снижению концентрации атомарного водорода в GaN. Для этого случая равновесную концентрацию атомарного водорода можно рассчитать по уравнению

$$N_{\text{H}} = \exp\left(\frac{\Delta Z_T}{9RT}\right).$$

Образование нейтральных комплексов. Теория образования донорно-акцепторных пар, сформулированная H. Reiss, C.S. Fuller, F.J. Morin, получила дальнейшее развитие в работах В.М. Глазова [12] применительно к соединениям $A^{III}B^{V}$. Согласно этой теории при совместном легировании полупроводника донорами и акцепторами кроме ионной пары (e^-e^+) образуются и нейтральные донорно-акцепторные комплексы типа $(D\text{-}A)^0$. Для этого процесса можно написать уравнение равновесия в виде

$$(N_D - P) + (N_A - P) = P,$$

где N_D, N_A – концентрация доноров и акцепторов соответственно; P – концентрация образовавшихся нейтральных комплексов.

Тогда

$$K_{\text{р}} = \frac{P}{(N_D - P)(N_A - P)}.$$

Отсюда можно определить долю связанных в нейтральные комплексы акцепторов:

$$\frac{P}{N_A} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{N_A K_{\text{р}}} + \frac{N_D}{N_A}\right) - \sqrt{\frac{1}{4}\left(1 + \frac{1}{N_A K_{\text{р}}} + \frac{N_D}{N_A}\right)^2 - \frac{N_D}{N_A}}.$$

Константа равновесия образования нейтрального комплекса рассчитывается в соответствии с теорией Дебая – Хюккеля. При кулоновском взаимодействии возникает так называемый обобщенный потенциал иона α, который характеризует напряженность электрического поля иона и определяет его поведение:

$$K_{\text{р}} = 4\pi(\alpha r)^3 Q(\alpha),$$

$$\alpha = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon T r},$$

здесь r – расстояние между атомами в комплексе; $Q(a)$ – функция, взятая из работы [12]; q – заряд электрона; ε_0 – диэлектрическая постоянная в вакууме; ε – диэлектрическая постоянная матрицы.

При наличии в эпитаксиальном GaN большой концентрации вакансий подвижный ион (H^+), вероятнее всего, займет место вакансии и войдет в узлы решетки. При этом в результате кулоновского взаимодействия с акцептором возникает полярная ковалентная связь и образуется устойчивый при высоких температурах «химический» комплекс $(A\text{-H})^0$. В данном случае расстояние между атомами будет определяться соответствующими ковалентными радиусами. Так, для $(\text{Mg-H})^0$ расстояние составляет 0,192 нм, для $(\text{Zn-H})^0$ – 0,100 нм. Исследование показало, что расстояние между атомами в комплексе $(\text{Mg-H})^0$ равно 0,196 нм [11], что очень близко к рассчитанному значению. В табл. 2 приведены результаты расчета константы равновесия и доли акцепторов, связанных в нейтральный комплекс, для рассматриваемых систем при $N_A = N_D = 10^{20}$ см$^{-3}$.

Таблица 2

Изменение концентрации нейтральных комплексов в зависимости от температуры роста

Table 2

Changes in the concentration of neutral complexes from temperature

T, К	$(\text{Mg-H})^0$		$(\text{Zn-H})^0$	
	K_p	P/N_{Mg}, мольная доля	K_p	P/N_{Zn}, мольная доля
500	$7{,}7\cdot10^{-17}$	0,99	$1{,}1\cdot10^{-16}$	1,00
600	$6{,}7\cdot10^{-18}$	0,96	$1{,}0\cdot10^{-17}$	0,99
800	$5{,}1\cdot10^{-19}$	0,87	$7{,}6\cdot10^{-19}$	0,92
1000	$1{,}0\cdot10^{-19}$	0,73	$1{,}5\cdot10^{-19}$	0,80
1200	$3{,}3\cdot10^{-20}$	0,58	$4{,}9\cdot10^{-20}$	0,67
1400	$5{,}0\cdot10^{-21}$	0,25	$7{,}5\cdot10^{-21}$	0,36

Рассмотрим полученные результаты расчета изменения доли нейтральных комплексов на примере комплексов $(\text{Mg-H})^0$. Повышение температуры роста и увеличение концентрации акцептора приводят к некоторому снижению концентрации нейтральных комплексов, однако значение это остается достаточно высоким (рис.1).

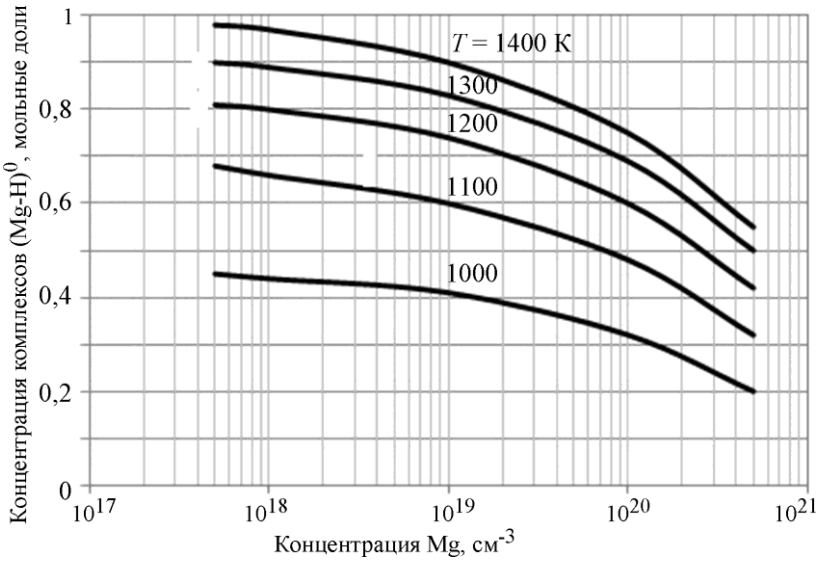


Рис.1. Зависимость концентрации нейтральных комплексов $(\text{Mg-H})^0$ от концентрации Mg в слоях GaN при $N_H = 10^{20}$ см$^{-3}$ и разной температуре роста

*Fig.1.*The dependence of the concentration of neutral complexes $(\text{Mg-H})^0$ on the magnesium concentration in the layers of gallium nitride at $N_H = 10^{20}$ cm^{-3} and different temperature

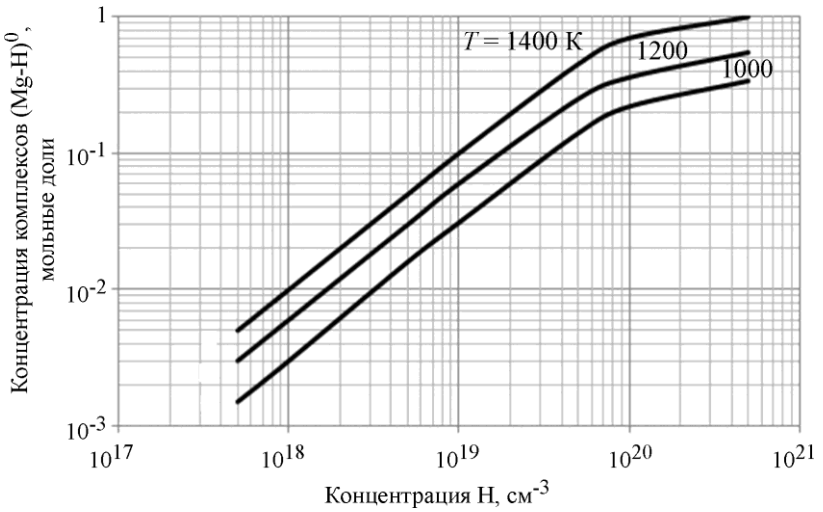


Рис.2. Зависимость концентрации комплексов (Mg-H)^0 от концентрации H в слоях GaN при концентрации $N_{Mg} = 10^{20}$ см$^{-3}$ и разной температуре роста
Fig.2. Dependence of the concentration of complexes (Mg-H)^0 on the hydrogen concentration in the GaN layers at a concentration of $N_{Mg} = 10^{20}$ cm^{-3} and different temperatures

На рис.2 представлено изменение доли комплексов в зависимости от концентрации водорода в GaN. При уменьшении концентрации атомарного водорода с 10^{20} до 10^{19} см$^{-3}$ доля комплексов (Mg-H)^0 снижается на порядок (до $5\cdot10^{-2}$ для 1400 К и $N_{Mg} = 1\cdot10^{20}$ см$^{-3}$) и концентрация активных акцепторов достигает значения ~$5\cdot10^{18}$см$^{-3}$. В этом случае при среднем уровне неконтролируемых доноров $(1–5)\cdot10^{17}$см$^{-3}$ возможно получение устойчивого низкоомного *p*-типа проводимости. Аналогичная картина наблюдается и для комплексов (Zn-H)^0. Отжиг при более низких температурах позволяет значительно снизить растворимость атомарного водорода, но при этом для достижения равновесия потребуется увеличение времени обработки. Именно так в настоящее время

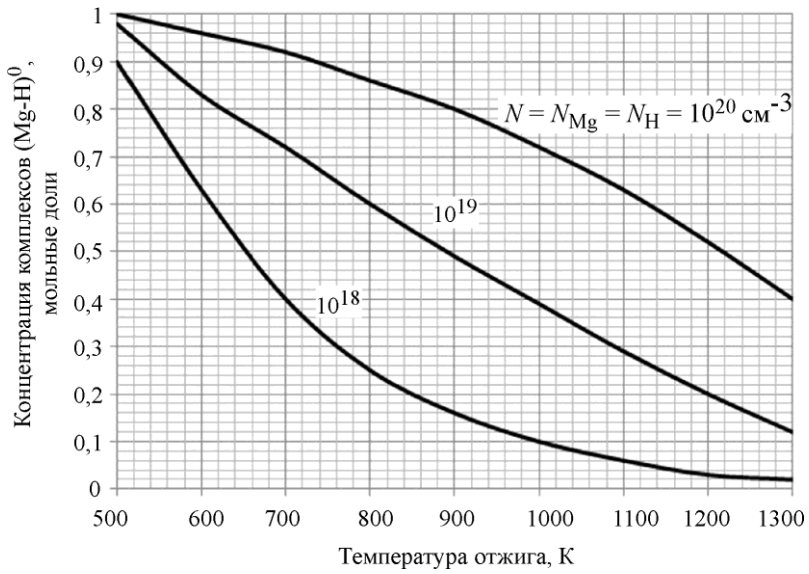


Рис.3. Изменение концентрации комплексов (Mg-H)^0 в зависимости от температуры отжига при разной концентрации $N = N_{Mg} = N_H$
Fig.3. Change in the concentration of complexes (Mg-H)^0 from temperature at different $N = N_{Mg} = N_H$

создается *p*-тип проводимости в GaN. Концентрацию водорода в слоях снижают следующими методами, уменьшая при этом долю связанных акцепторов: обработкой при низких температурах потоком низкоэнергетических электронов (LEEBI) или высокотемпературным отжигом в инертной атмосфере (RTA). Так, с использованием метода LEEBI удается снизить удельное сопротивление легированных магнием слоев GaN с 10^4 до 3 Ом·см, а с применением метода RTA – с 10^6 до 2 Ом см и ниже и получить устойчивый *p*-тип проводимости.

На рис.3 приведены результаты расчета изменения доли нейтральных комплексов $(Mg\text{-}H)^0$ в зависимости от температуры отжига при различной исходной концентрации водорода и акцептора в слоях ($N_D = N_A$).

Исследование получения низкоомных слоев *p*-типа. Для получения слоев GaN и $Al_xGa_{1-x}N$ *p*-типа наиболее подходящей примесью является Mg. В качестве источника Mg в процессе МОС-гидридной эпитаксии применяются дициклопентодиенил магния (Cp_2Mg). Поскольку конечная цель легирования – получение максимально возможной концентрации дырок в этих слоях, необходимо определить зависимость концентрации атомов Mg от скорости расхода основного применяемого вещества Cp_2Mg. На этапе роста слоев концентрацию акцепторной примеси можно контролировать путем регулирования количества соответствующего газообразного источника, поступающего в реактор. По данным измерений вторичной ионной масс-спектрометрии, зависимость концентрации атомов Mg от расхода соединения Cp_2Mg, поступающего в реактор, имеет четко выраженный максимум в интервале $(6–8)\cdot10^{20}$ см$^{-3}$. Он соответствует расходу источника (в данной конструкции) 25 л/мин.

Ранее предполагалось, что концентрация Mg в образцах будет расти с увеличением расхода Cp_2Mg до уровня предельной растворимости Mg в GaN более 10^{21} см$^{-3}$. Наличие низкого максимума концентрации означает, что имеет место механизм, препятствующий встраиванию атомов Mg в кристаллическую решетку. Это связано, очевидно, с тем, что с увеличением расхода Cp_2Mg после его разложения образуется большое количество углеводородов. Наиболее вероятным механизмом, возникающим на поверхности GaN, является «конкуренция» встраивания Mg и молекул углеводородов в растущий слой, что и приводит к уменьшению концентрации Mg в GaN при больших потоках МОС Mg. Таким образом, при указанных условиях эпитаксии оптимальный расход Cp_2Mg, при котором в эпитаксиальном слое достигается максимально возможная концентрация магния $(6–8)\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, составляет около 20–30 л/мин.

Технология активации акцепторной примеси магния в эпитаксиальных слоях $Al_xGa_{1-x}N$ и GaN *p*-типа. Эксперименты по получению низкоомных слоев GaN *p*-типа показали, что существует необходимость активировать Mg, используя отжиг легированных слоев. После обработки легированных магнием слоев электронным лучом с низкой энергией получены *p*-слои с удельным сопротивлением 35 Ом·см, концентрацией дырок $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ и подвижностью носителей 8 см^2/В·с. Ранее сделано предположение, что причина отсутствия дырочной проводимости или низкой концентрации дырок в слоях *p*-GaN заключается в существовании Mg в кристаллической решетке материала в пассивном состоянии в виде нейтральных комплексов.

Несмотря на то что концентрация атомов Mg в эпитаксиальном слое составляет $(1\cdot10^{19} – 6\cdot10^{19})$ см$^{-3}$, из-за образования нейтральных комплексов $(Mg\text{-}H)^0$ выращенные *p*-слои имеют низкую концентрацию дырок (порядка 10^{16}–10^{17}см$^{-3}$). Существуют различные технологические способы активации атомов Mg, заключающиеся в разрушении этих комплексов и в соответствующем увеличении концентрации Mg-акцепторов с мелкими энергетическими уровнями в запрещенной зоне. В работе [13] предложена

технология постростовой активации с помощью кратковременного нагрева полученных гетероструктур в атмосфере азота, разрушающего нейтральные комплексы $(Mg\text{-}H)^0$ и, как следствие, увеличивающего концентрацию дырок. В различных публикациях приводятся разные значения для температуры и времени активации.

Очевидно, что температура отжига не может быть выше температуры роста активной области гетероструктур (993–1023 К), так как это приводит к размытию гетерограниц между квантовыми ямами и барьерами, а также к генерации дефектов в активной области и уменьшению квантового выхода излучения выращенных структур. Желательно не только использовать более низкие температуры отжига, но и уменьшать его продолжительность.

Проведены эксперименты, позволившие определить оптимальные технологические условия термообработки, обеспечивающие в отожженных гетероструктурах получение максимальной концентрации дырок в *p*-областях и максимальной величины квантового выхода излучения. Термообработка выращенных гетероструктур проводилась в печи с лучевым ИК-нагревом в атмосфере чистого азота. Перед отжигом осуществлялась продувка печной камеры азотом с целью устранения кислорода и водорода из газовой атмосферы. Скорость расхода азота во время отжига составляла 3–5 л/мин. Продолжительность отжига была ограничена и составляла 5 мин, включая нагрев в течение 1 мин до выбранной температуры отжига, отжиг при этой температуре в течение 3 мин и охлаждение в течение 1 мин. Температура отжига выбиралась в диапазоне 1043–1093 К. С целью изучения влияния температуры активации на величину квантового выхода излучения выращенные гетероструктуры разделены на группы, каждая из которых подверглась отжигу при разных температурах. Результаты эксперимента представлены на рис.4

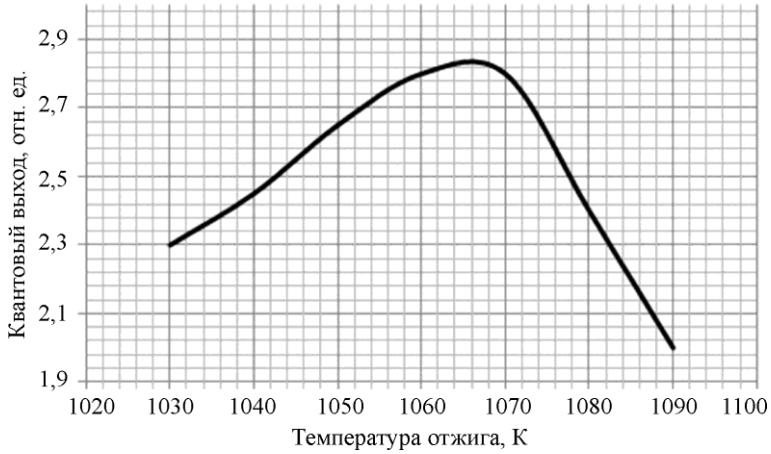


Рис.4. Зависимость квантового выхода излучения гетероструктур от температуры отжига
Fig.4. Dependence of the quantum yield of heterostructure radiation on the annealing temperature

Как видно из представленной зависимости, в диапазоне температур 1043–1063 К происходит постепенное увеличение квантового выхода, что, очевидно, связано с более полным процессом активации акцепторов, приводящим к увеличению концентрации дырок в слоях *p*-типа и увеличению их эффективности инжекции в активную область. Дальнейшее увеличение температуры от 1063–1073 К приводит к стабилизации квантового выхода на максимальном уровне, а при температурах отжига выше 1073 К начина-

ется деградация свойств структуры, что и отражается на снижении значений квантового выхода. Таким образом, для достижения максимальных значений квантового выхода отжиг гетероструктур необходимо проводить в узком диапазоне температур (1063–1073 К).

При отработке технологии активации примеси Mg обнаружен новый эффект: зависимость квантового выхода от взаимного расположения пластин. Оказалось, что если располагать пластины парами «лицом к лицу» при тесном контакте их *p*-областей, то квантовый выход после отжига имеет максимальное значение. Такое расположение пластин, по-видимому, уменьшает образование вакансий азота в приповерхностной области *p*-слоев, присутствие которых приводит к увеличению степени компенсации акцепторной примеси магния и, соответственно, к уменьшению концентрации дырок.

При выращивании методом металлоорганической газофазной эпитаксии слоя *p*-GaN, легированного Mg, с последующей термической активацией получены слои с концентрацией дырок выше 10^{18} $см^{-3}$ и подвижностью до 10 $см^2/В{\cdot}с$. Аналогичные подходы использованы и в технологии выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии низкоомных слоев $Al_xGa_{1-x}N$ *p*-типа, легированных Mg.

Заключение. Исследования показали, что в процессе получения легированного акцепторами GaN методом МОС-гидридной эпитаксии (при большом избытке NH_3) существует термодинамическая возможность образования высокой концентрации нейтральных комплексов $(A\text{-H})^0$. Уменьшение концентрации акцептора и, соответственно, водорода в слоях способствует снижению концентрации нейтральных комплексов и упрощает технологическую задачу получения низкоомных слоев *p*-типа проводимости даже при низких концентрациях акцептора. Однако это требует разработки новых технологических приемов, связанных с уменьшением при эпитаксии GaN содержания водорода и нежелательных примесей, таких как Si, O_2, C.

Литература

1. ***Гольцова М.*** Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2012. – № 4 (118). – С. 86–101.

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

3. ***Крапухин Д.В., Мальцев П.П.*** Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. – 2016. – Т. 4. – № 4 (13). – С. 42–53.

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

5. ***Балакирев А.И., Туркин А.Н.*** Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике // Современная электроника. – 2015. – №4. – С. 28–32.

6. ***Федоров Ю.*** Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 2. – С. 92–107.

7. ***Туркин А.Н.*** Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. – 2011. – № 5. – С. 6–10.

8. ***Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л.*** Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. – М.: Химия, 1968. – 467 с.

9. ***Стрельченко С.С., Лебедев В.В.*** Соединения: справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.

10. ***Волков А.В., Жарский И.М.*** Справочник по физической химии. Таблицы термических констант веществ. – Минск: Современная школа (Букмастер), Интерпрессервис, 2016. – 256 с.

11. ***Болтакс Б.И.*** Диффузия в полупроводниках. – М.: ГИФМ, 1961. – 404 с.

12. ***Глазов В.М., Земсков В.С.*** Физико-химические основы легирования полупроводников. –

М.: Наука, 1967. – 371 с.

13. ***Туркин А.Н., Юнович А.Э.*** Научные и технологические новости на нитридном направлении в России // Полупроводниковая светотехника. – 2013. – №6. – С. 28–29.

Поступила в редакцию 29.10.2018 г.; после доработки 29.10.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Вигдорович Евгений Наумович – доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института МИРЭА – Российского технологического университета (Россия, 107076, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20), evgvig@mail.ru

References

1. Goltsova M. Powerful GaN-transistors. Truly revolutionary technology. *Elektronika: nauka, obrazovaniye, biznes = Electronics: science, technology ,business*, 2012, no.4 (118), pp. 86–101. (in Russian).

2. Belkin M.E., Kudzh S., Sigov A.S. New principles of construction of radio - electronic equipment of microwave range with the use of radio-photon technology. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian technology magazine*, 2016, no. 1 (10). pp. 4–20. (in Russian).

3. Krapukhin D.V., Maltsev P.P. Monolithic integrated circuit of low-noise amplifier on gallium nitride for the range of 57–64 GHz. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian technology magazine*, 2016, vol. 4, no. 4 (13), pp. 42–53. (in Russian).

4. Svetogorov V.N., Akchurin R.H., Marmalyuk A.A., Ladugin M.A., Yarotskaya I.V. Calculation of progenerates heterostructures $Al_xGa_yIn_{1-x-y}$ As/InP with quantum wells for efficient laser emitters. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal = Russian technology magazine*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 46–55. (in Russian).

5. Balakirev A.I., Turkin A.N. Development of gallium nitride technology and prospects of its application in microwave electronics. *Sovremennaya elektronika = Modern electronics*, 2015, no. 4, pp. 28–32. (in Russian).

6. Fedorov Yu.A. Wide bandgap heterostructure (Al, Ga, In)N and devices on their basis for the millimetre wavelength range. *Elektronika: nauka, obrazovaniye, biznes = Electronics: science, technology, business*, 2011, no. 2, pp. 92–107. (in Russian).

7. Turkin A.N. Gallium nitride as one of the most promising materials in modern optoelectronics. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*, 2011, no. 5, pp.6–10. (in Russian).

8. Karapet'yants M.X., Karapet'yants M.L. *Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances.* Moscow, Chemistry Publ., 1968. 467 p. (in Russian).

9.Strelchenko S.S., Lebedev V.V. *Connections Directory*. Moscow, Metallurgy Publ., 1984. 144 p. (in Russian).

10. Volkov V. *Handbook of physical chemistry. Tables of thermal constants of substances*. Minsk, Sovremennaya shkola (Bukmaster), Interpresservis Publ., 2016. 256 p. (in Russian).

11. Boltax B.I. *Diffusion in semiconductors*. Moscow, GIFM Publ., 1961, 404 p. (in Russian).

12. Glazov V.M., Zemskov V.S. *Phisical and Chemical of Semiconductor Doping*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 56 p. (in Russian).

13. Turkin A.N., Yunovich A.E. Scientific and technological news on nitride field in Russia. *Poluprvodnikovaya svetotekhnika = Semiconductor lighting engineering*. 2013, no. 6, pp. 28–29. (in Russian).

Received 29.10.2018; Revised 29.10.2018; Accepted 22.01.2019

Information about the author:

Eugene N. Vigdorovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 107076, Moscow, Stromynka, 20), evgvig@mail.ru

УДК 621.3.049.77.002 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-129-136

Спектрофотометрический контроль хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя

Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, Д.В. Костюк

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

R.Tikhonov@tcen.ru

Использование хлоридных электролитов для электрохимического осаждения пермаллоя $Ni_{81}Fe_{19}$ перспективно, так как сульфатные электролиты при наличии серы являются нестабильными. Магнитные параметры пленок сплава $Ni_{81}Fe_{19}$ очень чувствительны к отклонению состава от молярного соотношения компонентов, равного 4,26. В работе контроль точности приготовления хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя проведен с использованием спектрофотометрии. Анализ электролита по спектрам поглощения и рассеивания света коллоидными частицами гидроксида железа показал, что электролитическая диссоциация двухвалентного железа и механизм аномального соосаждения никеля и железа зависят от температуры и влияют на электрохимическое осаждение пленок пермаллоя. Отмечено, что специфической особенностью раствора хлорида железа при гидролизе является выделение осадка гидроксида железа в виде коллоидных частиц с комплексообразователем – борной кислотой. Показано, что из хлоридного электролита после фильтрации раствора хлорида железа никель осаждается лучше, чем железо. Установлено, что происходит нормальное конгруэнтное осаждение пленок сплава $Ni_{81}Fe_{19}$ и аномальное соосаждение исключается.

Ключевые слова: хлоридный электролит; пленки пермаллоя; электрохимическое осаждение; спектрофотометрический контроль

***Для цитирования*:** Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Костюк Д.В. Спектрофотометрический контроль хлоридного электролита для электрохимического осаждения пермаллоя // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 129–136. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-129-136

© Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, Д.В. Костюк, 2019

Spectrophotometric Monitoring Chloride Electrolyte for Electrochemical Deposition of Permalloy

R.D. Tikhonov, S.A. Polomoshnov, D.V. Kostuk

SMC «Technological Center», Moscow, Russia

R.Tikhonov@tcen.ru

Abstract: The use of chloride electrolytes for electrochemical deposition of $Ni_{81}Fe_{19}$ permalloy seems to be promising because the sulphate electrolytes in presence of sulphur are non-stable. The magnetic properties of $Ni_{81}Fe_{19}$ are very sensitive to rejection of the whole component o 4.26. In this work the control of preparing the electrolyte for electrochemical deposition has been conducted using the spectrophotometric investigation of the chloride electrolyte. The analysis of the electrolyte absorption spectrum and scattering of light by particles of iron hydroxide colloid has revealed that the dissociation of the two-valent iron and the mechanism of anomalous electrodeposition depend on temperature and affect the electrochemical deposition of the permalloy films. It has been noted, that the specific feature of the $FeCl_2$ solution during hydrolysis of $FeCl_2$ is the iron hydroxide precipitate $(Fe(OH)_2$ in the form of colloid particles with the complex forming boric acid. It has been shown that from the chloride electrolyte with iron chloride solution filtration nickel is precipitated better than iron. It has been stated that normal congruent deposition of the $Ni_{81}Fe_{19}$ alloy films takes place and the abnormal codeposition is excluded.

Keywords: chloride electrolyte; permalloy films; electrodeposition; spectrophotometric

For citation: Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Kostuk D.V. Spectrophotometric monitoring chloride electrolyte for electrochemical deposition of permalloy. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 129–136. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-129-136

Введение. Исследования электрохимического осаждения пермаллоя $Ni_{81}Fe_{19}$, как правило, проводятся с использованием сульфатного электролита, который характеризуется нестабильностью и наличием серы в осадках. Поэтому применение хлоридных электролитов представляется перспективным.

В работе [1] пленки сплава никель – железо получены электроосаждением из хлоридного электролита с суммарной концентрацией хлористых железа и никеля C_{Fe+Ni} = 1 моль/л и при изменении соотношения C_{Fe} /$C_{Fe+Ni.}$ Установлено преимущественное осаждение железа при меньшей скорости осаждения более благородного никеля и сделан вывод об аномальности осаждения. Процесс электроосаждения сплава никель – железо из хлоридной ванны описан в [2], где для подавления аномального соосаждения предлагается использовать добавки комплексообразователя этилендиамина. Электроосаждение из хлоридного электролита при наличии комплексообразующих соединений изучено в [3]. Показано, что при выбранных концентрациях примесей в электролите и плотности электрического тока не удается получить пленки сплава $Ni_{81}Fe_{19}$. Процесс получения пленок сплава никель – железо путем электроосаждения из хлоридного электролита с массовым соотношением Ni^{2+}/ Fe^{2+}, равным 20,7; 13,8; 7,8, описан в [4]. Соответственно массовым соотношениям в пленке содержится 11, 13 и

31% железа, т.е. состав электролита не соответствует составу пленки. Кроме того, в пленке содержится много кислорода (до 22,5 %).

Применяемые хлоридные электролиты характеризуются широким диапазоном молярного соотношения никеля и железа (от 35,1 до 0,1). Исследование процесса осаждения из хлоридного электролита с молярным соотношением 4,26, которое соответствует сплаву $Ni_{81}Fe_{19}$, проведено в работах [5, 6]. Полученные пленки имеют наилучшие магнитные свойства, что способствует развитию технологии магнитополупроводниковых микросистем [7, 8]. В работе [9] разработана технология локального электрохимического осаждения пермаллоя на кремниевые пластины с магниторезистивными наноструктурами. Высокие магнитные параметры магнитомягких пленок пермаллоя для применения в магнитополупроводниковых микросистемах получены в [10].

В настоящей работе приготовление хлоридного электролита с целью обеспечения воспроизводимого осаждения пленок пермаллоя с высокими магнитными свойствами проводилось с применением спектрофотометрического контроля.

Гидролиз хлорида железа. В результате диссоциации хлорида железа происходит образование слабого электролита. При гидролизе ионы Fe^{2+} и Cl^{-} связываются с ионами водорода H^{+} или гидроксила OH^{-}. По принципу Ле-Шателье уменьшение концентрации ионов должно приводить к дальнейшему распаду молекул воды на ионы. Если один из ионов участвует в образовании электролита, то другой ион накапливается в растворе и изменяет *p*H среды. Согласно закону действующих масс при введении в раствор одного из продуктов гидролиз соли уменьшается. Гидролиз соли усиливается при удалении одного из продуктов гидролиза, а также в разбавленном растворе и при нагревании. Гидролиз хлорида железа подробно описан в работах [11–13].

В результате гидролиза хлорида железа (II) $FeCl_2$ и при однократной ионизации образуются основная соль FeOHCl и соляная кислота HCl. Предполагаются образование продукта реакции $FeOH^{+}$ и выделение иона водорода H^{+}. При растворении $FeCl_2$ уменьшаются *p*H и концентрация водорода, который при этом не выделяется.

В [11] рассмотрен гидролиз хлорида железа (III) $FeCl_3$ при нагреве раствора почти до кипения. В результате изменяется цвет раствора и выпадает осадок гидроксида трехвалентного железа $Fe(OH)_3$. Добавка концентрированной HCl исключает гидролиз $FeCl_3$ при нагреве. Согласно [12] при гидролизе $FeCl_3$ образуется $Fe(OH)_3$ в виде дисперсной системы коллоидного раствора с размерами частиц менее 500 нм, которые рассеивают свет по эффекту Тиндаля. Коллоидные частицы адсорбируют на поверхности ионы из раствора и создают диффузный слой противоположно заряженных ионов и растворителя. В результате образуется электронейтральная мицелла. Благодаря взаимному отталкиванию частиц и гидратной оболочки коллоидный раствор характеризуется устойчивостью и не выпадает в осадок.

Гидроксид двухвалентного железа $Fe(OH)_2$ при выдержке на воздухе в течение суток окисляется растворенным кислородом до трехвалентного гидроксида. Осадок $Fe(OH)_2$ в свежеосажденном виде имеет серовато-зеленый цвет, в воде не растворяется, быстро темнеет вследствие окисления. При взаимодействии $Fe(OH)_2$ с HCl образуется $FeCl_2$. Осадок $Fe(OH)_3$ имеет красновато-коричневый цвет, не растворяется в воде. В результате взаимодействия бурого осадка с раствором HCl получается желтый раствор трехвалентного железа.

Исследование оптических свойств однокомпонентного хлоридного электролита. Измерения коэффициента оптического пропускания света *T*, оптической плотности и концентрации веществ *C*, содержащихся в электролите, для электрохимического осаждения пермаллоя в жидких пробах проводились на спектрофотометре В-1100

в 1-см кюветах в диапазоне длин волн 315–1050 нм. Спектральные коэффициенты направленного пропускания измерялись в диапазоне 0,1–99,0 %. На рис.1 представлены спектры оптического пропускания раствора тетрагидрата железа $FeCl_2 \cdot 4H_2O$. При комнатной температуре раствор характеризуется прозрачностью, имеет светло-желтый цвет, при нагреве до 75 °С раствор мутнеет за счет гидролиза и образования взвеси нерастворимого гидроксида железа $Fe(OH)_2$. Добавление HCl исключает образование $Fe(OH)_2$ при нагреве до 75 °С и расширяет пик поглощения 345 нм. Можно предположить, что этот пик связан с ионами хлора, а пик поглощения 975 нм – с ионом железа. Оба пика изменяются при разной концентрации $FeCl_2$. Логарифмическая зависимость коэффициента оптического пропускания от концентрации раствора $FeCl_2$, показана на рис.2.

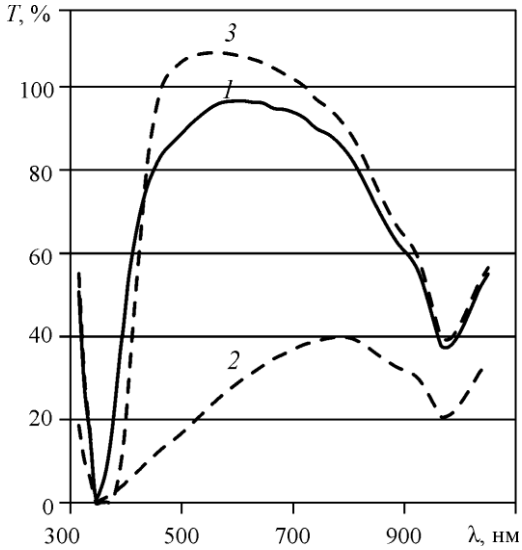


Рис.1. Спектр оптического пропускания раствора $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ при комнатной температуре (кривая *1*), после нагрева до 75 °С (кривая *2*), после добавки HCl и нагрева до 75 °С (кривая *3*)

Fig.1. Optical Spectrum bandwidth solution $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ at room temperature (curve *1*), after heating to a temperature of 75°C (curve *2*), after the HCl and supplements up to 75°C (curve *3*)

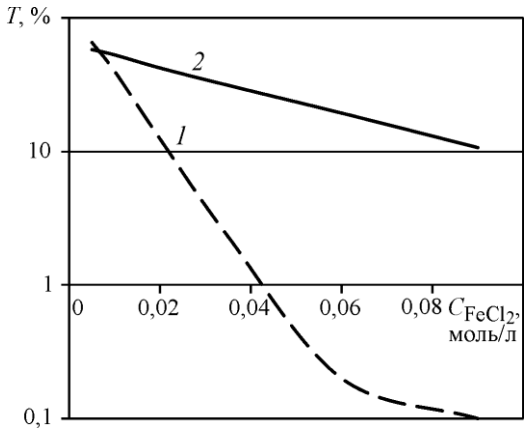


Рис.2. Зависимость коэффициента оптического пропускания света на длинах волн 345 нм (кривая *1*) и 975 нм (кривая *2*) от концентрации раствора $FeCl_2$

Fig.2. Dependence of optical transmittance of light at wavelengths of 345 nm (curve *1*) and 975 nm (curve *2*) versus concentration solution

Исследование оптических свойств многокомпонентного хлоридного электролита. Зависимость коэффициента оптического пропускания электролита на длине волны 605 нм, содержащего изначально борную кислоту H_3BO_3, хлорид железа $FeCl_2$, хлорид никеля $NiCl_2$, добавку соляной кислоты HCl на 15-й день и сахарина $C_7H_4NaNO_3S$ на 13-й день, от времени выдержки представлена на рис.3.

После выдержки в течение 24 ч электролит на основе $FeCl_2$ становится прозрачным и образуются взвеси белого цвета из мицелл $FeCl_2$ и комплесообразователя H_3BO_3. Через несколько дней выдержки коэффициент оптического пропускания света уменьшается, т.е. продолжается гидролиз соли и процесс комплексообразования $Fe(OH)_2$ и H_3BO_3. Фильтрация раствора через матерчатый фильтр на пятый день снижает прозрачность, так как мелкие частицы взвеси проникают через фильтр и заполняют объем электролита. Через 24 ч выдержки взвесь опустилась на дно и электролит стал прозрачным. Соотношение железа к хлору на фильтрах изменяется от 1/1,65 при фильтрации

верхней части раствора, содержащей преимущественно FeCl, до 4,63/1 на фильтрах из нижней части раствора с промывкой осадка на фильтре.

Исследование состава пленок проводилось с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора Philips XL 40, который регистрирует содержание тяжелых элементов (железа, хлора), не определяя содержание легких элементов (кислорода и водорода). Выяснено, что в осадок выпадает гидроксид железа красно-бурого цвета, который при добавлении HCl дает желтый прозрачный раствор, характерный для $FeCl_3$. Добавка HCl немного снижает прозрачность электролита, но уже на следующий день взвесь растворяется и электролит становится идеально прозрачным и стабильным во времени. Очевидно, что HCl реагирует с $Fe(OH)_2$, уменьшая его образование и стабилизируя электролит. Добавка сахарина $C_7H_4NaNO_3S$ незначительно ухудшает коэффициент оптического пропускания света, но при последующей выдержке он сначала увеличивается, а потом уменьшается, особенно у раствора с большими концентрациями $FeCl_2$. Сахарин участвует в образовании комплексов с гидроксидами. В итоге раствор становится темно-зеленого цвета, но процесс образования гидроксидов продолжался.

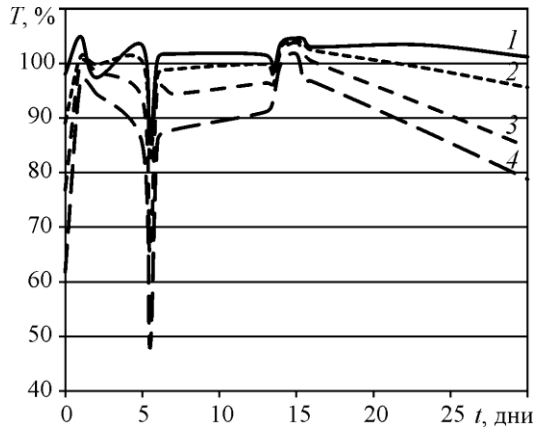


Рис.3. Зависимость коэффициента оптического пропускания света на длине волны 605 нм от времени выдержки хлоридного электролита, содержащего H_3BO_3, $C_7H_4NaNO_3S$, HCl, $NiCl_2$ и $FeCl_2$ в соотношении Ni/Fe = 4,26, при разной концентрации $FeCl_2$: кривая *1* – 8 г/л; кривая *2* – 20 г/л; кривая *3* – 40 г/л; кривая *4* – 80 г/л

Fig.3. Dependence of optical light transmittance at wavelength 605 nm from time to time extracts chloride electrolyte containing H_3BO_3, $C_7H_4NaNO_3S$, HCl, $NiCl_2$ and $FeCl_2$ ratio Ni/Fe = 4.26, with varying concentrations of $FeCl_2$: curve *1* – 8 g/l; curve *2* – 20 g/l; curve *3* – 40 g/l; curve *4* – 80 g/l

Можно утверждать, что специфической особенностью раствора на основе $FeCl_2$ в процессе гидролиза является образование осадка $Fe(OH)_2$ в виде коллоидных частиц. Сравнение констант диссоциации растворов показывает, что диссоциация $FeCl_2$ и $Fe(OH)_2$ происходит значительно быстрее, чем диссоциация $FeCl_3$ и $Fe(OH)_3$. Хлорид никеля $NiCl_2$ в растворе диссоциирует полностью и гидролизуется. Константа диссоциации $NiCl_2$ равна $2{,}5\cdot10^{9}$, а гидроксида никеля $Ni(OH)_2$ составляет $2{,}5\cdot10^{-5}$.

При добавлении в раствор H_3BO_3 образуется взвесь коллоидных частиц гидроксида железа с комплесообразователем – борной кислотой. Фильтрация позволяет выделить из электролита осадок $Fe(OH)_3$. Уменьшение образования гидроксидов железа и стабилизация электролита определяют его стабильность для электрохимического осаждения пленок пермаллоя $Ni_{81}Fe_{19}$. Следует отметить, что полезную информацию об электролите удается получить не только по пикам поглощения спектра, но и по рассеянию света на коллоидных частицах в диапазоне спектра между пиками.

Спектрофотограмма хлоридного электролита с содержанием $FeCl_2$, $NiCl_2$ и H_3BO_3 показана на рис.4. Добавка сахарина в этот электролит (рис.5, кривая *1*) уменьшает коэффициент оптического пропускания света на длинах волн 500 и 900 нм для раствора $NiCl_2$. Добавка HCl (рис.5, кривая *2*) уменьшает поглощение света на длинах волн 540 и 860 нм, электролит становится заметно светлее, взвесь растворяется и электролит стабилизируется.

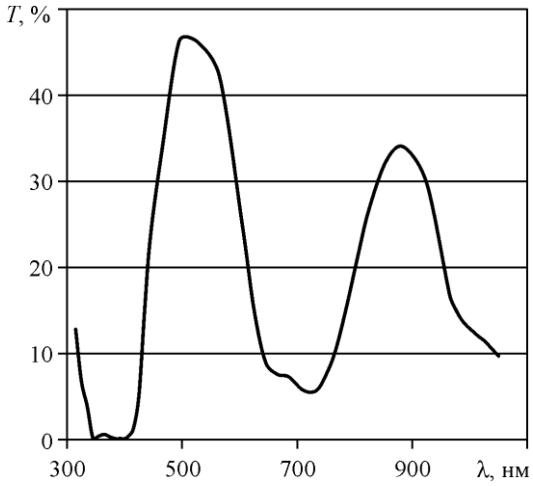


Рис.4. Спектр оптического пропускания электролита, содержащего $FeCl_2$, $NiCl_2$ и H_3BO_3
Fig.4. Optical bandwidth of solution containing $FeCl_2$, $NiCl_2$ and H_3BO_3

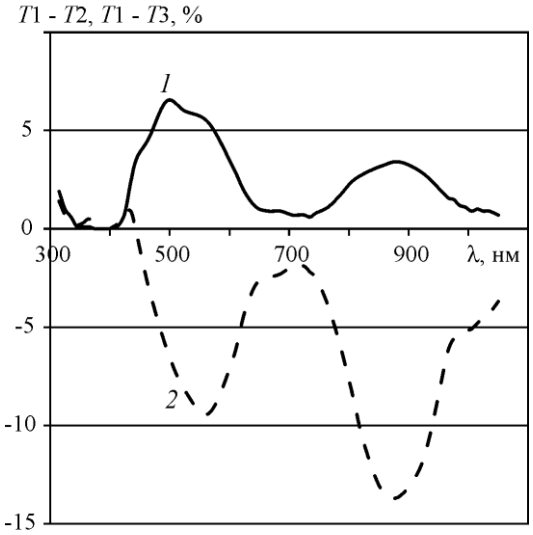


Рис.5. Зависимость разности коэффициентов оптического пропускания света от длины волны: *T*1 – электролит с H_3BO_3; *T*2 – электролит с H_3BO_3, $C_7H_5NaNO_3S$ (кривая *1*); *T*3 – электролит с H_3BO_3, $C_7H_5NaNO_3S$, $C_7H_4NaNO_3S$ и HCl (кривая *2*)
Fig.5. Dependence of difference coefficients of optical transmission of light of wavelength: *T*1 – chloride electrolyte with H_3BO_3; *T*2 – electrolyte with H_3BO_3, $C_7H_5NaNO_3S$ (curve *1*); *T*3– electrolyte with H_3BO_3, $C_7H_5NaNO_3S$, $C_7H_4NaNO_3S$ and HCl (curve *2*)

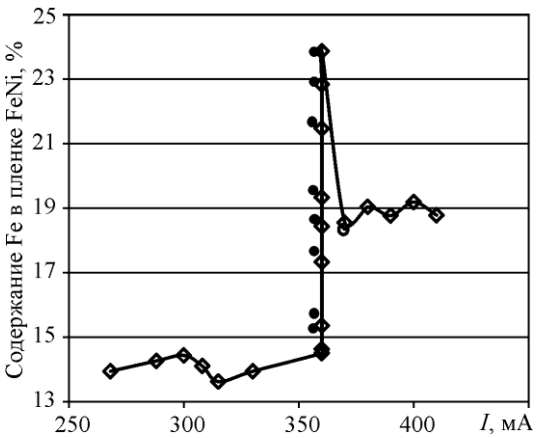


Рис.6. Зависимость содержания Fe в пленке FeNi от тока при электрохимическом осаждении из хлоридного электролита с добавками $FeCl_2$ (•) и $NiCl_2$ (○)
Fig.6. Dependence of Fe content in the film NiFe from electrochemical deposition current from chloride electrolyte containing additives of $FeCl_2$ (•) and $NiCl_2$ (○)

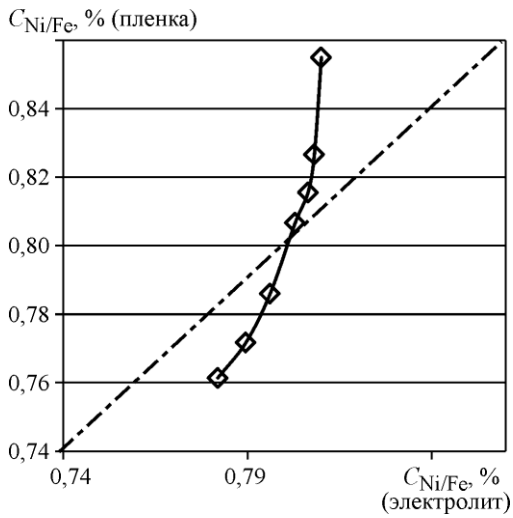


Рис.7. Зависимость соотношения концентраций $C_{Ni/Fe}$ в пленках и электролите (- · - · - равное осаждение никеля по отношению к электролиту)
Fig.7. Attitude $C_{Ni/Fe}$ concentrations in films and electrolyte (- · - · - an equal deposition of nickel at film relative to electrolyte)

Обсуждение результатов. На рис.6 показана зависимость состава пленок от тока в диапазоне 260–500 мА. Электрохимическое осаждение осуществлялось из хлоридного электролита при температуре 70 °С и содержании атомов никеля и железа в соотношении 4,26, что соответствует сплаву $Ni_{81}Fe_{19}$. Видно, что изменение электрического тока процесса не приводит к изменению состава пленки. При выбранном значении электрического тока происходит изменение состава пленки. Из рис.7 следует, что содержание никеля в пленке сплава никель – железо выше, чем в электролите. Следовательно, никель осаждается лучше, чем железо, и аномального соосаждения не наблюдается.

За два месяца использования хлоридного электролита с фильтрацией раствора $FeCl_2$, H_3BO_3 и добавкой HCl проведено 24 процесса осаждения с общей толщиной пленок 167 мкм. Установлено, что электролит не истощается и не изменяет своих спектральных характеристик.

Заключение. Исследование спектрофотометрических характеристик хлоридного электролита в процессе его составления, учитывающего взаимодействие основных и вспомогательных химикатов, показало следующее. Очистка электролита от преципитатов гидроксида железа с помощью борной кислоты и фильтрации, а также подавление образования гидроксида железа соляной кислотой обеспечивают стабильность электролита и воспроизводимое осаждение пленок пермаллоя $Ni_{81}Fe_{19}$. Удаление гидроксидов железа из хлоридного электролита позволяет решить проблему аномального соосаждения и получать пленки с заданным составом.

Литература

1. ***Коровин Н.В.*** О катодном процессе при электроосаждении сплава железо – никель // Журнал неорганической химии. – 1957. – Т. 2. – Вып. 9. – С. 2259–2263.
2. ***Harris Th.M., Wilson J.L.*** Electroplating bath for nickel-iron alloys and method // Patent US 5932082 A, 1999.
3. ***Afshar A., Dolati A.G., Ghorbani M.*** Electrochemical characterization of the Ni-Fe alloy electrodeposition from chloride-citrate-glycolic acid solutions // Materials Chemistry and Physics. – 2002. – Vol. 77. – P. 352–358.
4. Electrodeposition and characterization of nanocrystalline Ni-Fe Alloys / ***R. Abdel-Karim, Y. Reda, M. Muhammed et al.*** // Journal of Nanomaterials. – 2011. – Vol. 2011. – Article ID519274. – 8 p.
5. ***Тихонов Р.Д.*** Электроосаждение сплава NiFe для производства интегральных микросхем // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2015. – №4. – С. 13–19.
6. ***Tikhonov R.D.*** Normal electrochemical deposition of NiFe films// Advances in Research. – 2017. – No. 11(2). – P. 1–10.
7. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов / ***В.В. Амеличев, В.В. Аравин, А.Н. Белов и др.*** // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 3. – С. 29–33.
8. Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем / ***В.В. Амеличев, И.Е. Абанин, В.В. Аравин и др.*** // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 5. – С. 505–510.
9. Локальное электрохимическое осаждение пермаллоя на кремниевые пластины с магниторезистивными наноструктурами / ***С.В. Шаманаев, Р.Д. Тихонов, А.А. Черемисинов и др.*** // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 3. – С. 313–316.
10. Магнитомягкие пленки пермаллоя, полученные электрохимическим осаждением из хлоридного электролита / ***Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, Д.В. Горелов и др*** // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2015. – № 4. – С. 26–31.
11. ***Ляндсберг Р.А., Саушкина Н.А.*** Лабораторный практикум по общей и неорганической химии. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. – 105 с.
12. ***Коровин Н.В.*** Общая химия. – М.: Высшая школа, 1998. – 559 с.
13. Электрохимический процесс осаждения пленок пермаллоя для магнитополупроводниковых микросистем / ***В.В. Амеличев, С.А. Поломошнов, Н.Н. Николаева и др.*** // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – № 5. – С. 482–484.

Поступила в редакцию 30.10.2018 г.; после доработки 19.12.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019.

Тихонов Роберт Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), R.Tikhonov@tcen.ru
Поломошнов Сергей Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), PSA@tcen.ru
Костюк Дмитрий Валентинович – начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), D.kostyuk@tcen.ru

References

1. Korovin N.V. O katodnom processe pri elektroosajdenii splava jelezo-nikel. *Journal neorganic chimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1957, vol. 2, no. 9, pp. 2259–2263. (in Russian).
2. Harris Th.M., Wilson J.L. *Electroplating bath for nickel-iron alloys and meth*od. Patent US 5932082 A, 1999.
3. Afshar A., Dolati A.G., Ghorbani M. Electrochemical characterization of the Ni-Fe alloy electrodeposition from chloride-citrate-glycolic acid solutions. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, vol. 77, pp. 352–358.
4. Abdel-Karim R., Reda Y., Muhammed M., El-Raghy S., Shoeib M., Ahmed H. Electrodeposition and Characterization of Nanocrystalline Ni-Fe Alloys. *Journal of Nanomaterials*, 2011, vol. 2011, Article ID519274, 8 p.
5. Tikhonov R.D. Electrodeposition of Ni-Fe Alloy for the Production of Integrated Microcircuits. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti = Electroplating & Surface Treatment,* 2015, vol. XXIII, no. 4, pp. 13–19. (in Russian).
6. Tikhonov R.D. Normal Electrochemical Deposition of NiFe Films. *Advances in Research*, 2017, 11(2), pp. 1–10.
7. Amelichev V.V., Aravin V.V., Belov A.N., Krasyukov A. Yu., Reznev A.A., Saurov A.N. Developing Integral Components for the Amplification of Magnetic Signal in Wireless MEMS Based on Magnetoresistive Elements. *Nano- I microsistemnay tehnika = Nano- and microsystems technology*, 2013, no. 3, pp. 29–33. (in Russian).
8. Amelichev V.V., Abanin I.E., Aravin V.V., Kostyuk D.V., Kasatkin S.I., Reznev A.A., Saurov A.N. Development of Magneto-Semiconductor Microsystems Technology. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 505–510. (in Russian).
9. Shamanaev S.V., Tikhonov R.D., Chremisinov A.A., Generalov S.S., Gorelov D.V., Polomoshnov S.A., Kazakov Ju.V., Amelichev V.V. Local Electrochemical Deposition of Permalloy Films on Silicon Wafers with Magnetoresistance Nanostructures. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 3, pp. 313–316. (in Russian).
10. Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Gorelov D.V., Kazakov Ju.V., Amelichev V.V., Nikolaeva N.N. Soft magnetic Permalloy films by an electrochemical deposition received from chloride electrolyte. *Oboronnyj kompleks - naucno-tehniceskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements - Russian Scientific and Technical Progress* , 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
11. Lyndsberg R.A., Saushkina N.A. *Laboratory of General and inorganic chemistry*. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU Publ., 2008, 105 p. (in Russian).
12. Korovin N.V. *General chemistry*. Moscow, Vysshay shkola Publ., 1998, 559 p. (in Russian).
13. Amelichev V.V., Polomoshnov S.A., Nikolaeva N.N., Tikhonov R.D., Kupriyanova M.A. Electrochemical Deposition Process for Permalloy Films on Magneto-Semiconductor Microsystems. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, no. 5, pp. 482–484. (in Russian).

Received 30.10.2018; Revised 19.12.2018; Accepted 22.01.2019

Information about the authors:
Robert D. Tikhonov – Cand. Sci. (Eng), Senior Researcher, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), R.Tikhonov@tcen.ru
Sergey A. Polomoshnov – Cand. Sci. (Eng), Head of Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), PSA@tcen.ru
Dmitriy V. Kostuk – Head of Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), D.kostyuk@tcen.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.382.323:538.9 **DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-137-150**

Зарядовые свойства транзисторной МОП-структуры с каналом из двумерного кристалла

Т.И. Маковская, А.Л. Данилюк, А.В. Кривошеева, В.Л. Шапошников, В.Е. Борисенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

danilyuk@nano-center.org

Для дальнейшего увеличения эффективности и быстродействия полевых транзисторов возможно применение полупроводниковых двумерных кристаллов. Такие транзисторы лишены некоторых отрицательных эффектов, проявляющихся в традиционных МОП-транзисторах при уменьшении их размеров. В работе предложена модель и исследованы зарядовые свойства транзисторной МОП-структуры с каналом из двумерного кристалла. Численное моделирование таких характеристик выполнено в диапазоне варьирования электрофизических свойств 2D-кристаллов, типичных для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2, $ZrSe_2$, $HfSe_2$, $PtTe_2$. Установлена самосогласованная взаимосвязь между электрофизическими параметрами структуры через химический потенциал, а также показано влияние на них потенциала полевого электрода и емкости подзатворного диэлектрика. Выполненные расчеты крутизны передаточной характеристики и коэффициента усиления такой транзисторной структуры показали, что для канала из дихалькогенидов тугоплавких металлов с шириной запрещенной зоны в диапазоне 0,25–2,1 эВ значения данных параметров могут достигать 0,1 мА/В и 1000 соответственно.

Ключевые слова: двумерный кристалл; транзисторная структура; квантовая емкость; переходная характеристика; крутизна; коэффициент усиления

Для цитирования: Зарядовые свойства транзисторной МОП-структуры с каналом из двумерного кристалла / Т.И. Маковская, А.Л. Данилюк, А.В. Кривошеева и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 137–150. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-137-150

© Т.И. Маковская, А.Л. Данилюк, А.В. Кривошеева, В.Л. Шапошников, В.Е. Борисенко, 2019

Charge Properties of a MOS Transistor Structure with a Channel Made of a Two-Dimensional Crystal

T.I. Makovskaya, A.L. Danilyuk, A.V. Krivosheeva, V.L. Shaposhnikov, V.E. Borisenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

danilyuk@nano-center.org

Abstract: For further improvement of efficiency and speed of field transistors the application of semiconductor two-dimensional crystals is possible. Such transistors are devoid of some negative effects, appearing in traditional MOS transistors while decreasing their dimensions. In this paper the model has been proposed and the charge properties of the transistor MOS structure with the channel made of two-dimensional crystal have been investigated. The numerical modeling of such characteristics has been performed in the range of variation of electro-physical properties of 2D-crystals, typical for $MoSe_2$, WS_2, WSe_2, $ZrSe_2$, HfSe, $PtTe_2$. A self-consistent relationship through the chemical potential between the electrophysical parameters of the structure has been established, as well as the influence of potential of field electrode and the gate dielectric potential on them. The performed calculations of the steepness of the transfer characteristic and the amplification coefficient of such transistor structure have shown that for the channel made of the transition metals dichalcogenides with the bandgap in the range of 0.25-2.1 eV the values of given parameters can reach 0.1 mA/V and 1000, respectively.

Keywords: two-dimensional crystal; transistor structure; quantum capacitance; transfer characteristic; steepness; amplification coefficient

For citation: Makovskaya T.I., Danilyuk A.L., Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Charge properties of a MOS transistor structure with a channel made of a two-dimensional crystal. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 137–150. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-137-150

Введение. Решением проблемы дальнейшего увеличения эффективности и быстродействия полевых транзисторов может стать применение полупроводниковых двумерных (2D) кристаллов. Такие транзисторы лишены некоторых отрицательных эффектов, проявляющихся в традиционных МОП-транзисторах при уменьшении их размеров. Наибольший практический интерес представляют 2D-кристаллы из дихалькогенидов тугоплавких металлов (ДТМ) MeX_2 толщиной в один или несколько мономолекулярных слоев, где *Me* – Mo, W; *X* – S, Se, Te. [1–4]. Эти материалы в зависимости от состава и толщины имеют ширину запрещенной зоной 1–2 эВ, подвижность электронов составляет 60–500 $см^2/(В·с)$. Использование ДТМ в качестве канала МОП-транзистора обеспечивает эффективную работу таких приборов в СВЧ-диапазоне и при повышенных температурах [5–10]. Кроме этого, прямой переход запрещенной зоны в кристаллах мономолекулярной толщины из ДТМ определяет перспективность их применения в интегральной оптоэлектронике [11–14].

Современный уровень технологий позволяет формировать 2D-кристаллы из ДТМ на традиционных для микроэлектроники подложках и создавать на них МОП-

транзисторные структуры. Наряду с неоспоримыми преимуществами использования 2D-кристаллов в твердотельной электронике актуальными остаются описание зарядовых эффектов в изготовленных на их основе МОП-транзисторах и адекватное моделирование электрических характеристик таких транзисторов.

Цель настоящей работы – установление связи электрофизических свойств канала из 2D-кристалла в МОП-транзисторной структуре с ее зарядовыми параметрами, а также моделирование электрических переходных и выходных характеристик такой структуры с учетом выявленных закономерностей.

Модель МОП-структуры с каналом из 2D-кристалла. Объектом рассмотрения является МОП-транзисторная структура, включающая в себя расположенные на плоской подложке исток, 2D-кристалл в качестве канала, полевой затвор, отделенный оксидным диэлектриком, и сток (рис.1). В основе работы транзистора с 2D-кристаллом лежит эффект поля, дающий возможность управления протекающим током в результате изменения напряжения полевого электрода по аналогии с традиционными МОП-структурами. Конструктивно МОП-транзистор с 2D-кристаллом ближе к традиционному МОП-транзистору со встроенным каналом, однако отличается отсутствием полупроводниковой подложки. Поэтому его канал не может обмениваться носителями заряда с другими структурными элементами транзистора. Управление проводимостью 2D-канала осуществляется исключительно за счет изменения химического потенциала носителей заряда. Отличительными особенностями МОП-структуры с 2D-кристаллом от традиционной МОП-структуры являются двумерная проводимость канала, ее амбиполярный характер, возможность управления проводимостью канала с помощью двух полевых электродов (верхнего и нижнего), а также другие закономерности влияния электрофизических параметров структуры на проводимость канала и их взаимосвязи между собой. Это связано с тем, что химический потенциал носителей заряда в 2D-кристалле зависит не только от концентрации носителей в нем, но и определяется электрофизическими параметрами структуры и влияет на их значения. Электрофизические параметры 2D-кристаллов из ДТМ на примере MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 представлены в таблице [11, 15–18].

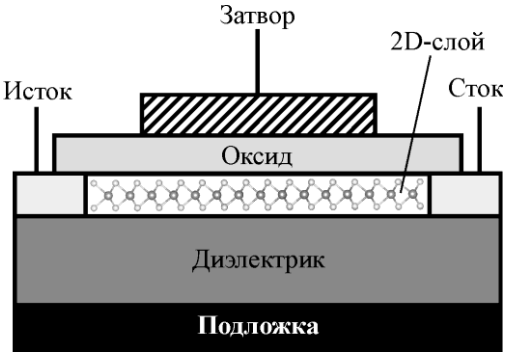


Рис.1. Структура МОП-транзистора с каналом из 2D-кристалла
Fig.1. The MOSFET structure with a channel made of a two-dimensional crystal

Концентрация электронов на единицу площади двумерного полупроводника зависит от плотности состояний DOS_{2D} [6]:

$$n_e = \int_{E_c}^{\infty} DOS_{2D}(E)\, f(E-\mu)dE, \qquad (1)$$

где

$$DOS_{2D} = (4\pi m_e^* / h^2)\sum_n H(E-E_n).$$

Здесь E_c – энергия минимума зоны проводимости; μ – химический потенциал; m_e^* – эффективная масса электронов; h – постоянная Планка; H – функция Хевисайда; E_n – энергия n-подзоны (основной вклад в концентрацию носителей заряда вносит основное состояние при $n = 0$).

Электрофизические характеристики двумерных кристаллов ДТМ
Electrophysical characteristics of two-dimensional DTM crystals

Параметр	MoS_2	$MoSe_2$	WS_2	WSe_2
Ширина запрещенной зоны E_g, эВ	1,65 [16] 1,78 [17] 1,68 [11] 1,85 [18]	1,44[16] 1,49 [17] 1,45 [11] 1,61 [18]	1,80[16] 1,93 [17] 1,82 [11] 1,98 [18]	1,54[16] 1,55 [11] 1,66 [18]
Разность энергий между долинами Г и К в зоне проводимости $\Delta E_{Г\text{-}К}$, эВ	0,10 [18]	0,01 [18]	0,04 [18]	0,06 [18]
Относительная диэлектрическая проницаемость в направлении, параллельном слою ДТМ $\varepsilon_{\parallel}$	2,6 [18]	2,7 [18]	2,6 [18]	2,7 [18]
Относительная диэлектрическая проницаемость в направлении, перпендикулярном слою ДТМ $\varepsilon_{\perp}$	4,9 [18]	5,0 [18]	4,8 [18]	4,9 [18]
Эффективная масса электронов в единицах массы свободного электрона m_e*	0,52 [15] 0,55 [16] 0,54 [11]	0,60 [17] 0,49 [16]	0,34 [17]	0,36 [15]
Эффективная масса дырок в единицах массы свободного электрона m_h*	0,64 [15] 0,56 [16] 0,44 [11]	0,70 [17] 0,61[16]	0,46 [17]	0,5 [15]

Для концентрации дырок n_h записывается аналогичное выражение [6].

Химический потенциал μ, определяющий концентрацию носителей заряда, для транзисторов с каналом из 2D-кристалла существенно зависит от параметров структуры. Для этого обычно рассматривается конденсаторная структура с одним или двумя полевыми электродами [5, 6]. Значение μ определяется из условия электронейтральности с учетом наличия внешних электрических полей [19]. Для структуры с одним полевым электродом условие электронейтральности при отсутствии заряженных дефектов в подзатворном диэлектрике и при постоянной плотности поверхностных состояний (ПС) на границе подзатворного диэлектрика и 2D-кристалла может быть записано в следующем виде [6, 20]:

$$\mu = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{it}}(qV_G - qV_{G0} - qV) - \frac{qQ_S}{C_{ox} + C_{it}}, \quad (2)$$

где C_{ox} – удельная емкость подзатворного диэлектрика; C_{it} – удельная емкость ПС, определяемая зарядом на ловушках с малым временем перезарядки; q – заряд электрона; V_G – потенциал полевого электрода; V_{G0} – потенциал плоских зон; V – электростатический потенциал; $Q_S = qn_S = q(n_e - n_h)$ – удельный заряд в канале.

Таким образом, для расчета концентрации носителей заряда в канале необходимо учитывать влияние заряда двумерного полупроводника Q_S на его химический потенциал. При этом систему уравнений (1), (2) необходимо решать самосогласованно.

Для построения эквивалентной электрической схемы транзистора с каналом из 2D-кристалла обычно сначала определяют емкость исток–затвор C_G (емкость затвора) и емкость канала C_{ch}. Отсутствие обедненной области, существующей в традиционных кремниевых МОП-структурах, ведет к уменьшению паразитных параметров. Емкости затвора и канала могут быть определены следующим образом [6, 20]:

$$C_G = \frac{C_Q + C_{it}}{1 + (C_Q + C_{it})/C_{ox}}, \quad C_{ch} = \frac{C_Q}{1 + (C_Q + C_{it})/C_{ox}},$$

где C_Q – квантовая емкость.

Особенностью транзистора с каналом из 2D-кристалла является важная роль квантовой емкости, которая связана с видом энергетической зависимости плотности состояний в двумерном полупроводнике. Квантовая емкость заряженного 2D-кристалла определяется как [21]

$$C_Q = q\frac{dQ_S}{d\mu}.$$

Для описания передаточных и выходных характеристик транзистора будем использовать диффузионно-дрейфовую модель [5, 6, 20], в которой выражение для тока 2D-канала имеет вид [5, 6]

$$J_D = q\frac{W}{L}u_0\int_{V_S}^{V_D} n_S dV, \tag{3}$$

где W и L – соответственно ширина и длина двумерного полупроводника; u_0 – подвижность носителей заряда; V_D – потенциал стока; V_S – потенциал истока.

Конкретизация выражения (3) зависит от механизмов насыщения тока в канале. Для структур с длинным каналом ($L > 1$ мкм) насыщение тока обусловлено механизмом электростатического запирания потока носителей заряда [19, 20]. В этом случае ток в канале при постоянной температуре может быть выражен через градиент химического потенциала [5, 6]. Преобразуя выражение (3) с учетом замены производной $dV \to (dV/d\mu)d\mu$ и используя выражение (2), для транзисторной структуры с длинным каналом из 2D-кристалла получаем выражение для тока канала:

$$J_D = \frac{W}{L}u_0\left[\kappa\frac{m^*(kT)^2}{\pi(h/2\pi)^2}\left(\frac{E_c(\mu_D-\mu_S)}{(kT)^2} + Li_2\left(-\exp\left(\frac{\mu_D}{kT}\right)\right) - Li_2\left(-\exp\left(\frac{\mu_S}{kT}\right)\right)\right) - \frac{1}{C_{ox}}\left(Q_{SD}^2 - Q_{SS}^2\right)\right], \tag{4}$$

где $\kappa = (C_{ox}+C_{it})/C_{ox}$, μ_D, μ_S – химические потенциалы канала, определяемые из системы уравнений (1), (2) при $V = V_D$ и $V = V_S$ соответственно; Q_{SD} и Q_{SS} – заряды в канале, определяемые из системы (1), (2) при $\mu = \mu_D$ и $\mu = \mu_S$ соответственно; $Li_2(z)$ – дилогарифм аргумента z [22].

Из выражения (4) следует, что если принять во внимание зависимость химического потенциала от заряда канала (2), то ток в 2D-канале определяется главным образом его зарядовыми свойствами. С помощью выражения (4) можно рассчитать передаточные и выходные ВАХ МОП-транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла, зная зависимости химического потенциала, концентрации носителей заряда и квантовой емкости от потенциала полевого электрода.

Транзисторная структура характеризуется крутизной передаточной характеристики $S = dJ_D/dV_G$ при $V_D = \text{const}$, внутренним сопротивлением (дифференциальным выходным сопротивлением) $R_i = (dJ_D/dV_D)^{-1}$ при $V_G = \text{const}$, а также коэффициентом усиления по напряжению $dV_D/dV_G = SR_i$ при $J_D = \text{const}$. Численное моделирование таких

характеристик выполнено в диапазоне варьирования электрофизических свойств 2D-кристаллов, типичных для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2, $ZrSe_2$, $HfSe_2$, $PtTe_2$ [11–18].

Результаты и их обсуждение. Расчеты по предложенной модели для 2D-кристаллов из ДТМ, характеризующихся шириной запрещенной зоны от 0,26 до 2,1 эВ, выполнены с использованием модельного материала с характеристиками MoS_2. Ширина запрещенной зоны варьируется за счет дефектов или наличия примеси. Приведем численные значения параметров моделирования транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла:

Ширина 2D-полупроводника W ..... 1 мкм
Длина 2D-полупроводника L ..... 10 мкм
Относительная диэлектрическая проницаемость
подзатворного диэлектрика ε_{ox} ..... 6–16 отн. ед.
Ширина запрещенной зоны 2D-полупроводника E_g .....0,26–2,1 эВ
Эффективная масса электронов m_e^* .....0,45–0,56 m_0
Удельная емкость поверхностных состояний C_{it} .....0,001–0,005 Ф/м^2
Толщина подзатворного диэлектрика d ..... 15 нм
Потенциал полевого электрода V_G ..... 0–5 В
Потенциал стока V_D ..... 0–10 В
Подвижность носителей заряда (электронов) u_0 .....0,02–0,06 м^2/(В·с)

При проведении расчетов фиксировались значения следующих величин: W/L = 0,1; ε_{ox} = 6 и 16, m^* = 0,52; u_0 = 200 см^2/(В·с); d = 15 нм.

С использованием системы уравнений (1), (2) рассчитаны зависимости химического потенциала канала μ от потенциала полевого электрода V_G при различных значениях ширины запрещенной зоны E_g, относительной диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика ε_{ox}, емкости ПС. Отметим, что уменьшение ε_{ox} эквивалентно увеличению толщины диэлектрика во столько же раз. Рассматривалась только область концентраций электронов, соответствующих $V_G > 0$ и $V_D > 0$. Установлено, что с ростом потенциала полевого электрода значение химического потенциала возрастает и достигает насыщения (рис.2,*а*). С ростом ширины запрещенной зоны наблюдается увеличение химического потенциала в области насыщения μ_{sat}. При этом значение потенциала V_{Gt}, при котором наблюдается выход на насыщение, растет от 0,5 до 3 В при ε_{ox} = 16. При уменьшении диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика до ε_{ox} = 6 значение μ_{sat} не меняется, но наблюдается существенное возрастание V_{Gt} до 5 В при E_g = 2,08 эВ и ε_{ox} = 6. Таким образом, изменение емкости подзатворного диэлектрика не приводит к изменению μ_{sat}, но меняет наклон зависимости $\mu(V_G)$. Влияние изменения емкости ПС C_{it} состоит в том, что ее рост приводит к увеличению V_{Gt} без изменения μ_{sat}.

Зависимости концентрации электронов от потенциала полевого электрода V_G приведены на рис.2,*б*. Для них характерны насыщение зависимости $n_S(V_G)$ с ростом V_G и ее сдвиг по оси V_G с ростом ширины запрещенной зоны. При этом происходит рост концентрации n_S почти на пять порядков при увеличении значения V_G на 0,5 В. Наблюдается существенное различие концентрации электронов в области насыщения, которая уменьшается с ростом ширины запрещенной зоны и уменьшением диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика. Рост емкости ПС приводит к сдвигу области насыщения n_S по оси потенциала полевого электрода в сторону его роста. Зависимость заряда канала от химического потенциала $Q_S(\mu)$ имеет пороговый характер и сдвигается по оси μ с ростом ширины запрещенной зоны (рис.3).

При графическом представлении результатов моделирования на рис.2–6 принято: кривая *1* – E_g = 0,26 эВ: кривая *2* – 0,52 эВ; кривая *3* – 0,72 эВ; кривая *4* – 1,04 эВ; кривая *5* – 1,44 эВ; кривая *6* – 2,08 эВ.

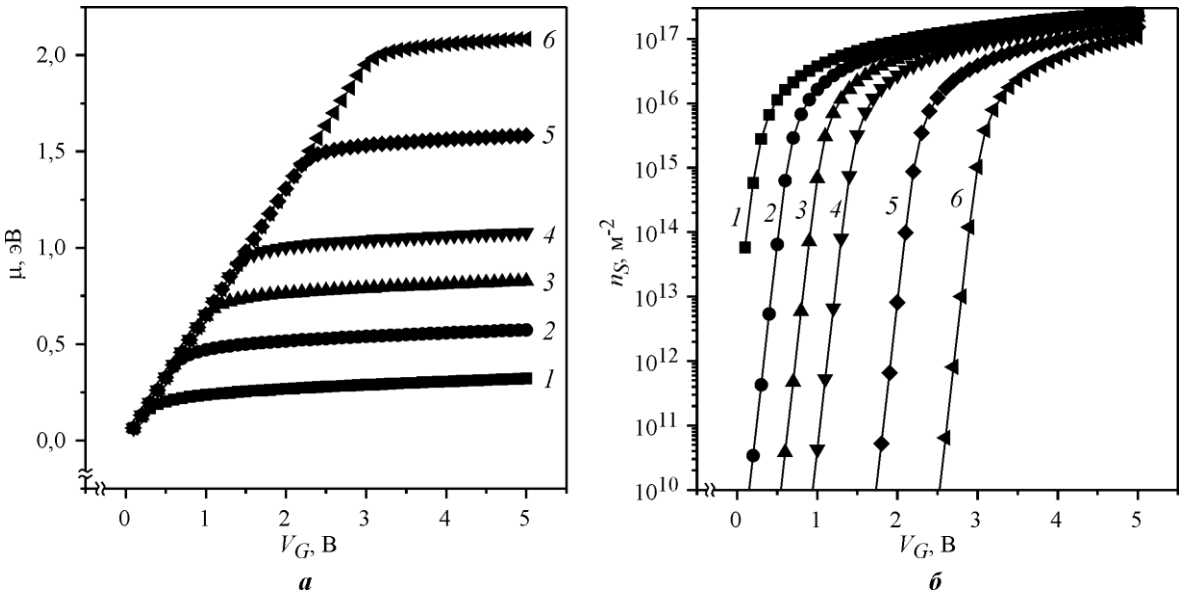


Рис.2. Зависимости химического потенциала (*а*) и концентрации электронов (*б*) от потенциала полевого электрода для транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла при различных E_g
Fig.2. Dependence of the chemical potential (*a*) and electron concentration (*b*) on the potential of the field electrode for a transistor structure with a two-dimensional crystal channel for different E_g (*1* – E_g = 0,26 eV: *2* – 0,52 eV; *3* – 0,72 eV; *4* – 1,04 eV; *5* – 1,44 eV; *6* – 2,08 eV)

Результаты расчета удельной квантовой емкости канала приведены на рис.4,*а*. Ее изменение с ростом потенциала полевого электрода также имеет пороговый характер. Основной вклад квантовой емкости соответствует области насыщения концентрации электронов, которая при V_G = 5 В достигает значений 0,4–0,6 Ф/м^2 для ε_{ox} = 16 и 0,15–0,4 Ф/м^2 для ε_{ox} = 6. Рост ширины запрещенной зоны и уменьшение диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика (или увеличение его толщины) приводят к уменьшению C_Q. Аналогично влияет и рост емкости ПС. Результаты моделирования емкости затвора (рис.4,*б*) и канала при различной ширине запрещенной зоны показали следующее. Зависимости характеризуются пороговыми величинами, которые коррелируют с аналогичными порогами для квантовой емкости. Влияние ширины запрещенной зоны, плотности ПС и диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика аналогично случаю квантовой емкости. Отличие состоит в относительно резком, по сравнению с квантовой емкостью, достижении насыщения с ростом V_G, т.е. фактически наличием скачка от порогового значения до насыщения. При этом величина насыщения данных емкостей не зависит от ширины запрещенной зоны. Снижение емкости подзатворного диэлектрика ведет к уменьшению емкостей канала и затвора. Рост емкости ПС приводит только к росту нижнего плато в емкости затвора C_G и практически не

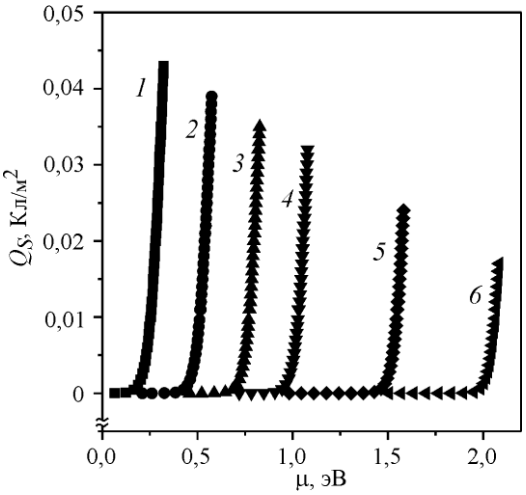


Рис.3. Зависимость заряда канала из 2D-кристалла от его химического потенциала при различных E_g
Fig.3. Dependence of the charge of a channel made of a two-dimensional crystal on its chemical potential for different E_g

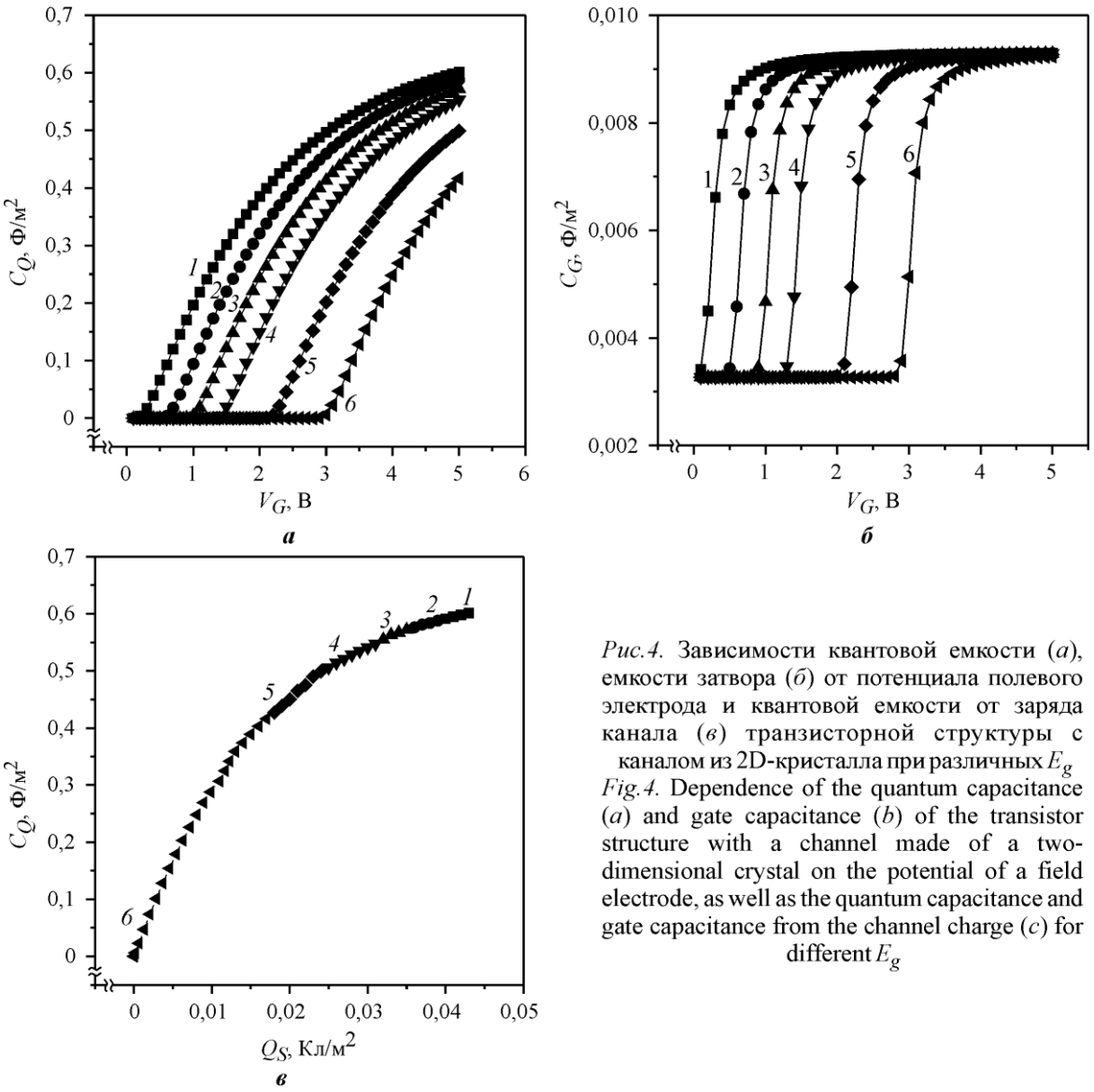


Рис.4. Зависимости квантовой емкости (*а*), емкости затвора (*б*) от потенциала полевого электрода и квантовой емкости от заряда канала (*в*) транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла при различных E_g

Fig.4. Dependence of the quantum capacitance (*a*) and gate capacitance (*b*) of the transistor structure with a channel made of a two-dimensional crystal on the potential of a field electrode, as well as the quantum capacitance and gate capacitance from the channel charge (*c*) for different E_g

влияет на верхние плато, т.е. на насыщение. Полученные зависимости, характеризующие взаимосвязь квантовой емкости и заряда канала, приведены на рис.4,*в*. При варьировании ширины запрещенной зоны зависимости вырождаются в одну кривую (стягиваются в одну зависимость). Аналогичный результат получен и для емкостей канала и затвора.

Отмеченные закономерности выхода химического потенциала на насыщение с ростом потенциала полевого электрода определяются, с одной стороны, тем, что рост концентрации электронов (соответственно заряда канала) с увеличением химического потенциала ограничен статистикой Ферми – Дирака. С другой стороны, увеличение заряда канала с ростом заряда полевого электрода (с ростом потенциала V_G) также ограничено значением химического потенциала канала. В последнем случае разность зарядов полевого электрода и канала регулируется химическим потенциалом канала. Это приводит к взаимосвязи зарядов полевого электрода и канала через химический потенциал. Следовательно, химический потенциал выполняет двоякую роль – управляет зарядом канала в соответствии со статистикой Ферми – Дирака и регулирует зарядовый

баланс структуры через условие электронейтральности. Влияние ширины запрещенной зоны состоит в уменьшении концентрации электронов в канале (уменьшении его заряда), что и приводит к соответствующему росту химического потенциала при прочих равных условиях. Этими же причинами объясняются и полученные закономерности взаимосвязи квантовой емкости и потенциала полевого электрода, которая пропорциональна производной заряда канала по химическому потенциалу. Вырождение зависимостей квантовой емкости от заряда канала при варьировании ширины запрещенной зоны говорит о наличии в рассматриваемой системе полной компенсации снижения заряда канала с увеличением E_g за счет роста химического потенциала. Таким образом, зависимость квантовой емкости от заряда канала отражает наличие в системе самосогласованного изменения электрофизических параметров. Влияние емкостей подзатворного диэлектрика и ПС состоит в изменении зарядового баланса структуры.

Резкий рост значений емкостей затвора и канала при достижении порогового значения потенциала полевого электрода можно объяснить. Когда значение квантовой емкости C_Q становится больше суммы $C_{ox}+C_{it}$, то емкости канала и затвора перестают зависеть от C_Q и становятся близкими к C_{ox}. Так как условие $C_Q > C_{ox} + C_{it}$ наступает быстро после достижения порога, наблюдается резкое увеличение емкостей затвора и канала, после которого они уже не меняются с ростом потенциала полевого электрода. Использование полученных взаимосвязей электрофизических параметров и заряда канала при моделировании транзисторных структур с каналами из 2D-кристаллов позволяет выявить особенности токопереноса в них и обеспечить оптимальное сочетание значений этих параметров. Полученные результаты по определению взаимосвязи электрофизических параметров транзисторной структуры с 2D-каналом позволили установить закономерности влияния зарядовых свойств на передаточные и выходные характеристики транзистора. Зависимости тока канала от потенциала полевого электрода и потенциала стока представлены на рис.5,*а* и 6,*а*.

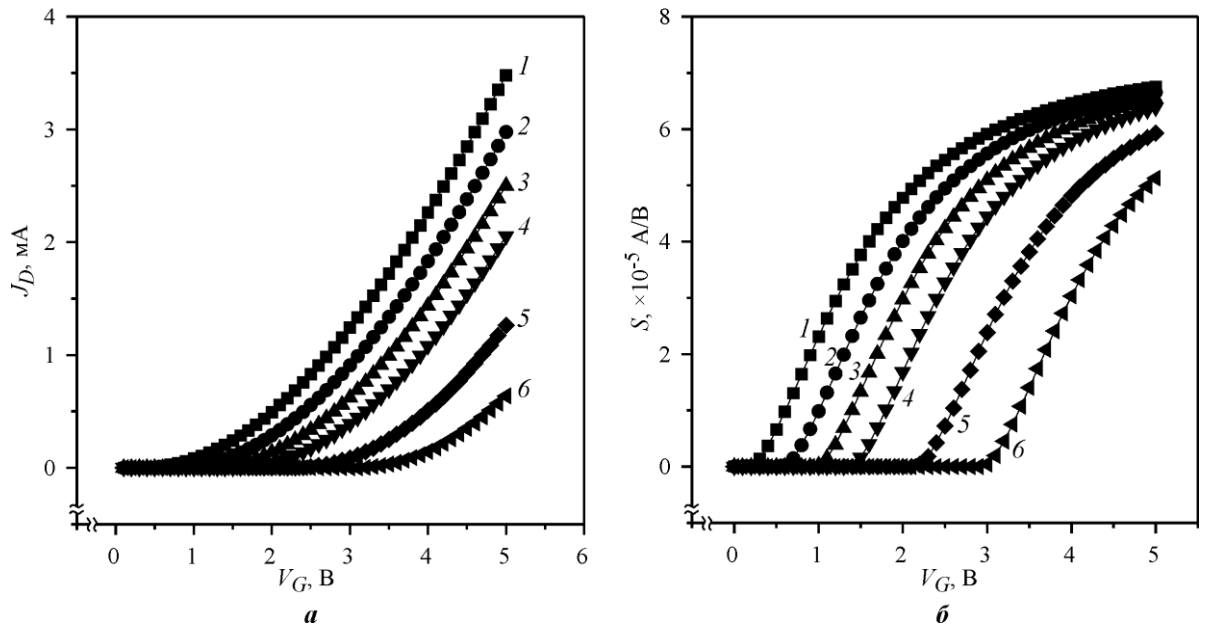


Рис.5. Передаточная характеристика (*а*) и крутизна передаточной характеристики (*б*) транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла при различных E_g

Fig.5. The transfer characteristic (*a*) and the steepness of the transfer characteristic (*b*) of the transistor structure with a channel made of a two-dimensional crystal for different E_g

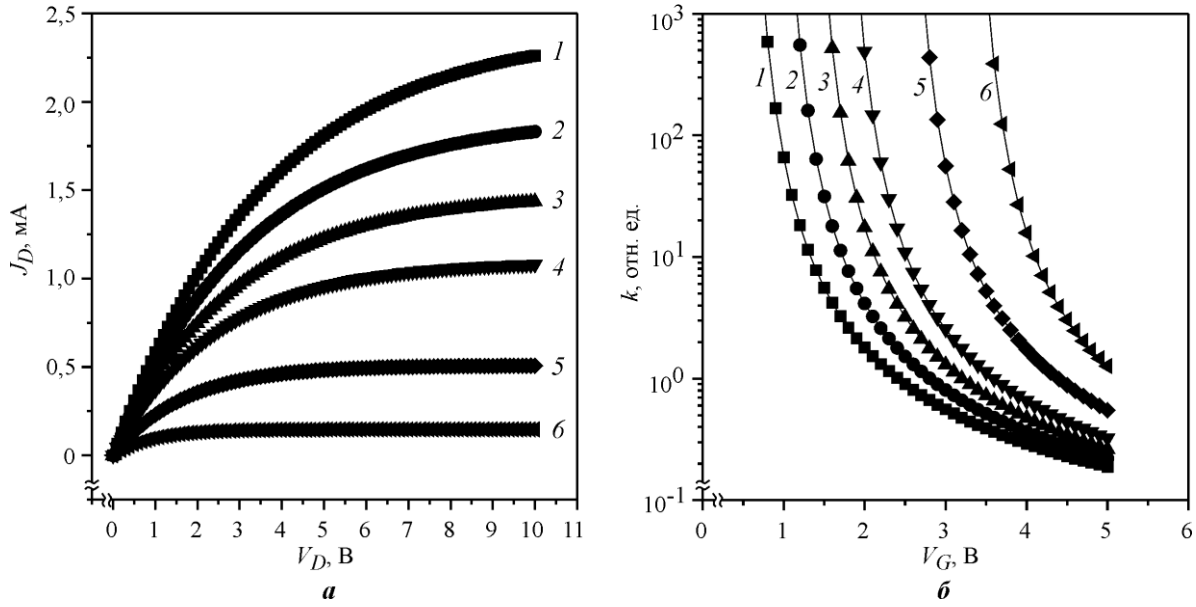


Рис.6. Выходная характеристика (*а*) и коэффициент усиления (*б*) транзисторной структуры с каналом из 2D-кристалла при различных E_g

Fig.6. The output characteristic (*a*) and the amplification coefficient (*b*) of the transistor structure with a channel made of two-dimensional crystal for different E_g

Передаточные характеристики транзисторной структуры с 2D-каналом в зависимости от ширины запрещенной зоны материала канала имеют типичный пороговый характер и отличаются количественно из-за изменения зарядовых свойств структуры (см. рис.5,*а*). Увеличение ширины запрещенной зоны, или емкости ПС, а также уменьшение емкости подзатворного диэлектрика приводят к уменьшению тока канала. С увеличением ширины запрещенной зоны происходит и возрастание порогового напряжения от 0,5 до почти 3,5 В. При этом крутизна передаточной характеристики S при постоянном напряжении стока V_D уменьшается (рис.5,*б*). Крутизна падает, а пороговое напряжение растет и с уменьшением емкости подзатворного диэлектрика. Полученные зависимости, характеризующие взаимосвязь крутизны передаточной характеристики и заряда канала, показали, что при варьировании ширины запрещенной зоны они вырождаются в одну кривую. Это также связано с самосогласованной взаимосвязью параметров, когда проявляется компенсация падения заряда канала за счет увеличения химического потенциала.

На рис.6,*а* приведены выходные характеристики моделируемой транзисторной структуры при разной ширине запрещенной зоны. Видно, что рост ширины запрещенной зоны приводит к снижению тока канала. К этому также приводит и уменьшение емкости подзатворного диэлектрика и увеличение емкости ПС. Таким образом, для увеличения тока канала необходимо увеличивать емкость подзатворного диэлектрика, снижать ширину запрещенной зоны и уменьшать емкость ПС при прочих равных условиях. Наблюдается существенный рост коэффициента усиления с ростом ширины запрещенной зоны (рис.6,*б*). Значение коэффициента усиления транзистора снижается с ростом потенциала V_G и составляет от 0,2 до 1000 в зависимости от ширины запрещенной зоны материала канала. Это связано с тем, что внутреннее сопротивление R_i растет быстрее, чем падает крутизна. С уменьшением емкости подзатворного диэлектрика коэффициент усиления растет. Его рост значителен при ширине запрещенной зоны $E_g > 0{,}52$ эВ. Крутизна в рассматриваемом случае находится в пределах 0,01–0,1 мА/В,

а коэффициент усиления достигает 1000, что сопоставимо с лучшими экспериментально полученными значениями для каналов из MoS_2 и WSe_2 [23–25]. Характерные значения внутреннего сопротивления составляют 5–100 кОм.

Заключение. В рамках предложенной модели МОП-структуры с каналом из 2D-полупроводника установлены самосогласованные связи между химическим потенциалом, шириной запрещенной зоны материала канала, концентрацией носителей заряда в нем, квантовой емкостью, емкостью канала и затвора, потенциалом полевого электрода, емкостью подзатворного диэлектрика и емкостью ПС. Для такой структуры наблюдается насыщение химического потенциала и заряда канала с увеличением потенциала полевого электрода.

Расчеты передаточной характеристики и ВАХ подтвердили, что, хотя конструктивно МОП-транзистор с 2D-кристаллом ближе к МОП-транзистору со встроенным каналом, его передаточная характеристика и ВАХ аналогичны характеристикам традиционного МОП-транзистора с индуцированным каналом ввиду наличия порогового напряжения и отсутствия тока канала при нулевом потенциале затвора. Результаты расчетов внутреннего сопротивления, крутизны передаточной характеристики и коэффициента усиления транзисторной структуры с 2D-кристаллом показали следующее: для канала из ДТМ с шириной запрещенной зоны в диапазоне 0,25–2,1 эВ указанные параметры могут достигать 100 кОм, 0,1 мА/В и 1000 соответственно. Это в целом сравнимо с аналогичными значениями для традиционных МОП-транзисторов.

Преимуществами транзисторной структуры с 2D-кристаллом являются в первую очередь отсутствие полупроводниковой подложки, что позволяет исключить паразитный *p*–*n*-переход, а также наличие установленной взаимосвязи электрофизических параметров. Это позволяет обеспечить оптимальные характеристики путем выбора материалов и самосогласованного варьирования размеров структурных элементов и электрофизических параметров. Таким образом, данный вид транзисторных структур перспективен для использования в цифровой электронике и дает потенциальный ресурс для работы на более высоких частотах по сравнению с традиционными МОП-транзисторами.

Коэффициент усиления можно менять в очень широких пределах, выбирая необходимые значения. Крутизну также можно повысить путем увеличения отношения ширина/длина канала, а именно: применять конструкцию с широким и коротким каналом, использовать 2D-кристалл с большей подвижностью, уменьшать толщину подзатворного диэлектрика, увеличивать напряжение затвора. Однако эти меры могут снизить быстродействие из-за роста емкости затвор–канал, что потребует оптимизации электрических характеристик прибора.

Литература

1. ***Yoon Y., Ganapathi K., Salahuddin S.*** How good can monolayer MoS_2 transistors be? // Nano Lett. – 2011. – Vol. 11. – P. 3768–3773.

2. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides / ***Q.H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis et al.*** // Nat. Nanotechnol. – 2012. – Vol. 7. – P. 699–712.

3. ***Mingsheng X., Tao L., Minmin S., Hongzheng C.*** Graphene-like two-dimensional materials // Chem. Rev. – 2013. – Vol. 113. – No. 5. – P. 3766–3798.

4. Single-layer MoS_2 transistors / ***B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio et al.*** // Nat. Nanotechnol. – 2011. – Vol. 6. – P. 147–150.

5. ***Cao W., Kang J., Liu W., Banerjee K.*** A compact current-voltage model for 2D semiconductor based field-effect transistors considering interface traps, mobility degradation, and inefficient doping effect // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Vol. 61. – No. 12. – P. 4282–4290.

6. ***Jiménez D.*** Drift-diffusion model for single layer transition metal dichalcogenide field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 101. – P. 243501-1–243501-4.

7. ***Fuhrer M.S., Hone J.*** Measurement of mobility in dual-gated MoS_2 transistors // Nat. Nanotechnol. – 2013. – Vol. 8. – P. 146–147.

8. ***Duan X., Wang C., Pan A., Duan X.*** Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – No. 24. – P. 8859–8876.

9. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets / ***Chhowalla M., Suk Shin H., Eda G. et al.*** // Nature Chem. – 2013. – Vol. 5. – No. 4. – P. 263–275.

10. Substrate modified thermal stability of mono- and few-layer MoS_2 / ***X. Wang, W. Fan, Z. Fan et al.*** // Nanoscale. – 2018. – Vol. 10. – No. 7. – P. 3540–3546.

11. ***Chernozatonskii L.A., Artyukh A.A.*** Quasi-two-dimensional transition metal dichalcogenides: structure, synthesis, properties, and applications // Phys.-Usp. – 2018. – Vol. 61. – No 1. – P. 2–28.

12. Band gap modifications of two-dimensional defected MoS_2 / ***A.V. Krivosheeva, V.L. Shaposhnikov, V.E. Borisenko et al.*** // International Journal of Nanotechnology. – 2015. – Vol. 12. – No. 8/9. – P. 654–662.

13. Electronic properties of bulk and monolayer TMDs: theoretical study within DFT framework (GVJ-2e method) / ***J. Gusakova, X. Wang, L.L. Shiau et al.*** // Phys. Stat. Sol. (A). – 2017. – Vol. 214. – No. 12. – P. 1700218 (1–7).

14. Theoretical study of defect impact on two-dimensional MoS_2 / ***A.V. Krivosheeva, V.L. Shaposhnikov, V.E. Borisenko et al.*** // J. Semicond. – 2015. – Vol. 36. – No. 12. – P. 122002 (1–6).

15. Tunnel field-effect transistors in 2-D transition metal dichalcogenide materials / ***H. Ilatikhameneh, Y. Tan, B. Novakovic et al.*** // IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits. – 2015. – Vol. 1. – P. 12–18.

16. ***Rasmussen F.A., Thygesen K.S.*** Computational 2D materials database: electronic structure of transition-metal dichalcogenides and oxides // J. Phys. Chem. C. – 2015. – Vol. 119. – P. 13169−13183.

17. ***Liu L., Bala Kumar S., Ouyang Y., Guo J.*** Performance limits of monolayer transition metal dichalcogenide transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Vol. 58. – No. 9. – P. 3042–3047.

18. ***Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Борисенко В.Е.*** Зонная структура и оптические свойства дихалькогенидов молибдена и вольфрама // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2016. – Т. 77. – № 3(16). – С. 41–48.

19. ***Sze S.M.*** Physics of Semiconductor Devices. – N.Y.: Wiley, 1969. – 812 p.

20. ***Zebrev G.I.*** Graphene field effect transistors: diffusion-drift theory // 23 Chapter in Physics and Applications of Graphene-Theory. ed. by S. Mikhailov. – London: InTech, 2011. – P. 476–498.

21. ***Luryi S.*** Quantum capacitance devices // Appl. Phys. Lett. – 1988. – Vol. 52. – P. 501–503.

22. ***Wolfram S.*** The Mathematica Book. – Fifth Edition. – Wolfram Media, Inc., USA, 2003. – 1488 p.

23. Investigations on field-effect transistors based on two-dimensional materials / ***T. Finge, F. Riederer, M.R. Mueller et al.*** // Ann. Phys. (Berlin). – 2017. – Vol. 529. – No. 11. – P. 1700087 (1–10).

24. Field-effect transistors built from all two-dimensional material components / ***T. Roy, M. Tosun, J.S. Kang et al.*** // ACS Nano. – 2014. – Vol. 8. – No. 6. – P. 6259–6264.

25. Advances in MoS_2-based field effect transistors (FETs) / ***X. Tong, E. Ashalley, F. Lin et al.*** // Nano-Micro Lett. – 2015. – Vol. 7. – No. 3. – P. 203–218.

Поступила в редакцию 18.07.2018 г.; после доработки 18.10.2018; принята к публикации 22.01.2019 г.

Маковская Татьяна Ивановна – младший научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6), tanya22051979@gmail.com

Данилюк Александр Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6), danilyuk@nano-center.org

Кривошеева Анна Владимировна – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6), krivosheeva@bsuir.by

Шапошников Виктор Львович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6), victor.shaposhnikov@gmail.com

Борисенко Виктор Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6), borisenko@bsuir.by

References

1. Yoon Y., Ganapathi K., Salahuddin S. How good can monolayer MoS_2 transistors be? *Nano Lett*., 2011, vol. 11, pp. 3768–3773.

2. Wang Q.H., Kalantar-Zadeh K., Kis A. et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nat. Nanotechnol*., 2012, vol. 7, pp. 699–712.

3. Mingsheng X., Tao L., Minmin S., Hongzheng C. Graphene-like two-dimensional materials. *Chem. Rev.*, 2013, vol. 113, no. 5, pp. 3766–3798.

4. Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J. et al. Single-layer MoS_2 transistors. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, vol. 6, pp. 147–150.

5. Cao W., Kang J., Liu W., Banerjee K. A compact current-voltage model for 2D semiconductor based field-effect transistors considering interface traps, mobility degradation, and inefficient doping effect. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 12, pp. 4282–4290.

6. Jiménez D. Drift-diffusion model for single layer transition metal dichalcogenide field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett*., 2012, vol. 101, p. 243501.

7. Fuhrer M.S., Hone J. Measurement of mobility in dual-gated MoS_2 transistors. *Nat. Nanotechnol.*, 2013, vol. 8, pp. 146–147.

8. Duan X., Wang C., Pan A., Duan X. Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, vol. 44, no. 24, pp. 8859–8876.

9. Chhowalla M., Suk Shin H., Eda G. et al. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chem*., 2013, vol. 5, no. 4, pp. 263–275.

10. Wang X., Fan W., Fan Z. et al. Substrate modified thermal stability of mono- and few-layer MoS_2. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 7, pp. 3540–3546.

11. Chernozatonskii L.A., Artyukh A.A., Quasi-two-dimensional transition metal dichalcogenides: structure, synthesis, properties, and applications. *Phys.-Usp.*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–28.

12. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al. Band gap modifications of two-dimensional defected MoS_2. *International Journal of Nanotechnology*, 2015, vol. 12, no. 8/9, pp. 654–662.

13. Gusakova J., Wang X., Shiau L.L. et al. Electronic properties of bulk and monolayer TMDs: theoretical study within DFT framework (GVJ-2e method). *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2017, vol. 214, no. 12, pp. 1700218 (1–7).

14. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al. Theoretical study of defect impact on two-dimensional MoS_2. *J. Semicond*., 2015, vol. 36, no. 12, pp. 122002 (1–6).

15. Ilatikhameneh H., Tan Y., Novakovic B. et al. Tunnel field-effect transistors in 2-D transition metal dichalcogenide materials. *IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits*, 2015, vol. 1, pp. 12–18.

16. Rasmussen F.A., Thygesen K.S. Computational 2D materials database: electronic structure of transition-metal dichalcogenides and oxides. *J. Phys. Chem. C*, 2015, vol. 119, pp. 13169−13183.

17. Liu L., Bala Kumar S., Ouyang Y., Guo J. Performance limits of monolayer transition metal dichalcogenide transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, vol. 58, no. 9, pp. 3042–3047.

18. Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. Band structure and optical properties of molybdenum and tungsten dichalcogenides. *Vestnik fonda fundamental'nykh issledovaniy = Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2016, vol. 77, № 3(16), pp. 41–48. (in Russian) .

19. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Wiley, 1969. 812 p.

20. Zebrev G.I. *Graphene field effect transistors: diffusion-drift theory / 23 Chapter in Physics and Applications of Graphene-Theory*. Ed. by S. Mikhailov. InTech, 2011. pp. 476–498.

21. Luryi S. Quantum capacitance devices. *Appl. Phys. Lett.*,1988, vol. 52, pp. 501–503.

22. Wolfram S. *The Mathematica Book*. Fifth Edition. Wolfram Media, Inc., USA, 2003. 1488 p.

23. Finge T., Riederer F., Mueller M.R. et al. Investigations on field-effect transistors based on two-dimensional materials. *Ann. Phys. (Berlin)*, 2017, vol. 529, no. 11, pp. 1700087 (1–10).

24. Roy T., Tosun M., Kang J.S. et al. Field-effect transistors built from all two-dimensional material components. *ACS Nano*, 2014 , vol. 8, no. 6, pp. 6259–6264.

25. Tong X., Ashalley E., Lin F. et al. Advances in MoS_2-based field effect transistors (FETs). *Nano-Micro Lett.*, 2015,vol. 7, no. 3, pp. 203–218.

Received 18.07.2018; Revised 18.10.2018; Accepted 22.01.2019.

Information about the authors:

Tatyana I. Makovskaya – Junior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, P. Browka st. 6), tanya22051979@gmail.com

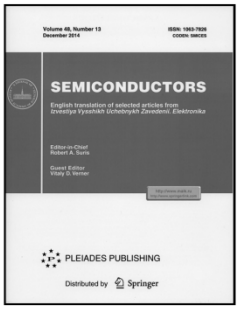
Alexander L. Danilyuk – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, P. Browka st. 6), danilyuk@nano-center.org

Anna V. Krivosheeva – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, P. Browka st. 6), krivosheeva@bsuir.by

Victor L. Shaposhnikov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, P. Browka st. 6), victor.shaposhnikov@gmail.com

Victor E. Borisenko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Micro- and Nanoelectronics Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Belarus, 220013, Minsk, P. Browka st. 6), borisenko@bsuir.by

Уважаемые авторы и читатели!





Вышли в свет журналы

SEMICONDUCTORS

Vol. 52, *No.* 15, 2018. - ISSN PRINT: 1063-7826, ISSN ONLINE: 1090-6479,

RUSSIAN MICROELECTRONICS

Vol. 47, *No.* 7, 2018. - ISSN PRINT: 1063-7397, ISSN ONLINE: 1608-3415,

в которых опубликованы избранные статьи журнала «Известия вузов. Электроника».

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

УДК 621.311.61 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-151-159

Исследование влияния температуры на выходные параметры радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиационного распада

С.Г. Новиков[1], А.В. Беринцев[1], А.С. Алексеев[1,2], А.И. Сомов[1], В.В. Светухин[3]

[1]Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы УлГУ, г. Ульяновск, Россия
[2]Ульяновский государственный университет, г.Ульяновск, Россия
[3]НПК «Технологический центр», г.Москва, Россия

granik@ya.ru

При разработке радиоизотопных источников электрического питания длительного срока службы для различных применений (в космической отрасли, медицине, нано- и микросистемной технике, криптографии и телекоммуникациях) одним из важных вопросов является определение температурного диапазона их надежной работы. В работе исследовано влияние отрицательных и положительных температур в диапазоне от –60 до +60 °С на выходные параметры радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии. Показано, что в указанных диапазонах температур напряжение холостого хода радиоизотопного источника меняется в 4 раза. При этом максимальное значение отдаваемой в нагрузку мощности реализуется при температуре около 0 °С. Проведен анализ влияния температуры на все стадии преобразования энергии. Исследования показали, что значительное снижение напряжения холостого хода и форма кривой отдаваемой мощности определяются двумя механизмами: снижением с температурой интенсивности свечения радиолюминесцентных источников света (температурное гашение люминесценции) и снижением эффективности фотопреобразователей. При этом в интервале отрицательных температур (от –60 до 0 °С) снижение эффективности фотопреобразователей выражено слабо и основной вклад в изменение выходных параметров источников вносит температурное гашение люминесценции в источнике света. В интервале положительных температур оба процесса оказывают значительное влияние на снижение выходного напряжения и мощности. Разработанные радиоизотопные источники электрического питания на основе двойного преобразования могут найти применение в электронной аппаратуре, эксплуатирующейся при пониженных температурах, например в условиях Крайнего Севера.

***Ключевые слова*:** тритиевый источник питания; радиолюминесцентный источник света; фотоэлектрический источник питания; фотовольтаика

©С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.С. Алексеев, А.И. Сомов, В.В. Светухин, 2019

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ – Правительство Ульяновской области (проект № 16-48-730330 р_а).

Для цитирования: Исследование влияния температуры на выходные параметры радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиационного распада / С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.С. Алексеев и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 151–159. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-151-159

Investigation of Influence of Temperature on Output Parameters of Nuclear Power Sources of Electric Supply Based on Double Step Conversion of Radioactive Decay Energy

S.G. Novikov[1], A.V. Berintsev[1], A.S. Alekseev[1,2], A.I. Somov[1], V.V. Svetukhin[3]

[1]Technological Research Institute S.P.Kapitsa of Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia
[2]Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia
[3]SMC «Technological Center», Moscow, Russia

granik@ya.ru

Abstract: In development of radio isotope electric feed sources of long-term service for various application in the space branch, medicine, nano-and microsystem equipment, cryptography and telecommunications one of the most important issue is the determination of their reliable operation temperature range. In the work the influence of the negative and positive temperatures in the range from –60 to +60 °C to the output parameters of radio isotope sources of electrical feed, based on the energy double conversion has been investigated. It has been shown that in the indicated temperature ranges the voltage of the radio isotope idle running is 4 times increased. In this case the maximum value of the returned power loading is realized at temperature near 0 °C.The influence of temperature on all stages of the energy conversion has been analyzed. The investigations demonstrate that a significant reduction of the idle running and the shape of the returned power curve are determined by two mechanisms: a decrease in the luminous intensity of radioluminescent light sources (temperature quenching of lumninescence emission) and a decrease in the efficiency of the photoconverters. In this case, the decrease in the efficiency of photoconverters is weakly expressed in the negative temperature range (from –60 to 0 °C), and the main contribution, to the change of the output parametrers of the power sources is made by the thermal quenching of luminescence in the light source. In the positive temperature range both processes have a significant effect on the reduction of the output voltage and power.

Keywords: tritium nuclear battery; radioluminescent light source; indirect conversion nuclear battery; photovoltaic’s

Funding: this research has been funded by the grant RFBR – Government of the Ulyanovsk Region (project № 16-48-730330 p_a).

For citation: Novikov S.G., Berintsev A.V., Alekseev A.S., Somov A.I., Svetukhin V.V. Investigation of influence of temperature on output parameters of nuclear power sources of electric supply based on double step conversion of radioactive decay energy. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 151–159. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-151-159

Введение. Разработка эффективных методов преобразования энергии радиоактивного бета-распада долгоживущих изотопов в электрическую в настоящее время является предметом интереса многих компаний-разработчиков и потребителей электронной аппаратуры различного назначения. Современные радиоизотопные источники электрического питания, которые в течение десятилетий могут преобразовывать энергию радиоактивного распада в электрическую, имеют сравнительно низкие значения выходных напряжений (единицы вольт) и выходных токов (сотни – тысячи наноампер) при активностях радиоизотопов в несколько кюри [1, 2]. Однако уже этого достаточно для питания устройства со сверхнизким энергопотреблением (микроконтроллеры, часы реального времени, запоминающие устройства и др.). Наибольший интерес представляет применение подобных устройств и источников питания длительного срока службы в космической отрасли, медицине, нано- и микросистемной технике, криптографии и телекоммуникациях [3, 4]. При их практическом использовании в узлах электронной аппаратуры актуальны вопросы о допустимых температурных режимах работы и влиянии температуры на основные выходные токи и напряжения [5, 6].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния температуры на выходные параметры образцов радиоизотопных источников электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиоактивного распада.

Эксперимент. Радиоизотопные источники электрического питания на основе двойного преобразования энергии радиоактивного распада в световую, а затем в электрическую описаны в [7]. В качестве радиоактивного изотопа использовался газообразный тритий, под давлением помещенный в стеклянную колбу круглого сечения с внешним диаметром 3 мм, внутренним диаметром 1 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 25 мм. Внутренняя стенка колбы покрыта радиолюминофором на основе ZnS, легированного медью (зеленый цвет свечения). В качестве фотопреобразователей применялись солнечные элементы из аморфного гидрогенизированного кремния размерами 35×14×1 мм. КПД фотопреобразователей составлял ~ 10 %. Для базовой ячейки источников на основе трех радиолюминесцентных источников света и двух фотопреобразователей получены значения токов короткого замыкания $I_{к.з}$ = 300 нА и напряжения холостого хода $U_{х.х}$ = 0,7 В.

Для выполнения экспериментов по исследованию влияния температуры на параметры радиоизотопных источников питания собраны три батареи из 12 базовых ячеек со следующими параметрами: $I_{к.з}$ = 1,2 мкА; $U_{х.х}$ = 0,7 В. Батареи помещены в корпуса из нержавеющей стали, геометрические размеры которых составляют 87×47×18 мм. Выводы батарей – медные штыревые контакты – изолированы от корпуса фторопластовыми втулками.

В ходе экспериментов исследованы зависимости напряжения холостого хода источника $U_{х.х}$, тока короткого замыкания $I_{к.з}$, а также тока $I_{н}$, протекающего через резистивную нагрузку R = 100 кОм, от температуры. Кроме того, проанализированы интенсивности люминесценции радиолюминесцентных источников света, фототок и фотонапряжение в зависимости от температуры при фиксированной термостабилизированной подсветке для фотопреобразователей на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

Для проведения эксперимента в диапазоне температур от –60 до +60 °С использовалась климатическая камера М-60/100-120 КТХ. Погрешность установки температуры составляла 0,1 °С. Для измерения напряжения холостого хода применялся вольтметр универсальный цифровой АКИП В7-78/1, ток измерялся пикоамперметром Keithley 6485, число фотонов – детектором счета фотонов серия COUNT BLUE-COUNT-100B с интегрирующей сферой IC2.

Исследование температурных зависимостей характеристик радиоизотопных источников питания. Измерения зависимостей $U_{х.х}$, $I_{к.з}$, а также $I_н$ от температуры выполнялись следующим образом. Радиоизотопный источник электрического питания помещался в климатическую камеру. Провода от контактов через термоизолирующую проходку выводились наружу и через коммутатор подсоединялись к измерительным приборам. С помощью коммутатора осуществлялось переключение между режимами измерений $U_{х.х}$, $I_{к.з}$ и $I_н$ при установившейся температуре (в среднем время температурной стабилизации составляло 30 мин). Результаты измерений в диапазоне температур от –60 до +60 °С приведены на рис.1. Как видно из рисунка, наиболее значительно изменяется $U_{х.х.}$ На нижней границе температур $U_{х.х}$ = 1,43 В, при высокой температуре $U_{х.х.}$ = 0,34 В. В результате отношение максимального и минимального значений напряжения на выбранном диапазоне температур $U_{х.х.}$ = 4,2. Полученные результаты в указанном диапазоне температур можно аппроксимировать прямой вида $U_{х.х.} = –9{,}09 \cdot 10^{-3} T + 0{,}9$. Однако вне рассматриваемого диапазона зависимость, вероятно, будет отличаться от линейной, что обусловлено нелинейными зависимостями интенсивности свечения радиолюминофоров и эффективности полупроводникового преобразователя от температуры. Чувствительность $U_{х.х.}$ источника к изменению температуры в данном случае составляет 9 мВ/°С.

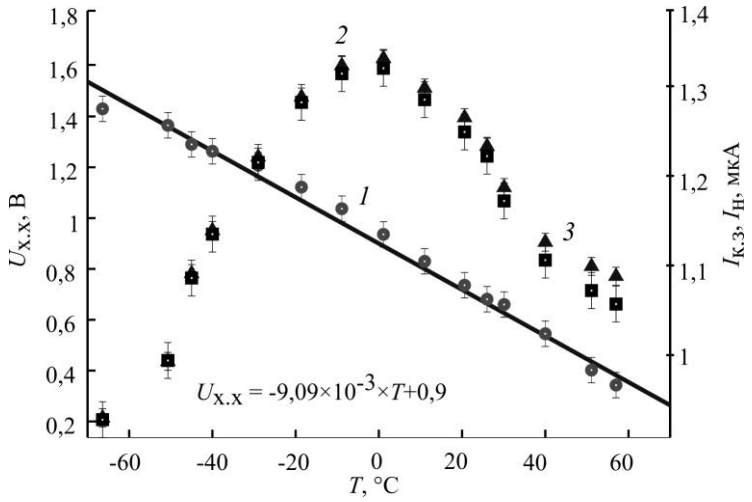


Рис.1. Зависимость напряжения холостого хода (*1*), тока короткого замыкания (*2*) и тока на нагрузке (*3*) источников питания от температуры
Fig.1. The dependence of the no-load voltage (*1*), the short-circuit current (*2*) and the current on the load (*3*) on the temperature

Ток короткого замыкания $I_{к.з}$ и ток $I_н$, протекающий через нагрузку, ведут себя иным образом. Их зависимости от температуры имеют максимум в районе 0 °С. При этом значения токов изменяются не более чем на 35 %.

Зависимость отдаваемой мощности от температуры и коэффициент формы приведены на рис.2. Коэффициент формы рассчитывается по формуле

$$FF = \frac{I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}}}{U_{\text{х.х}} I_{\text{к.з}}},$$

где $I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}}$ – выделяемая на нагрузке мощность.

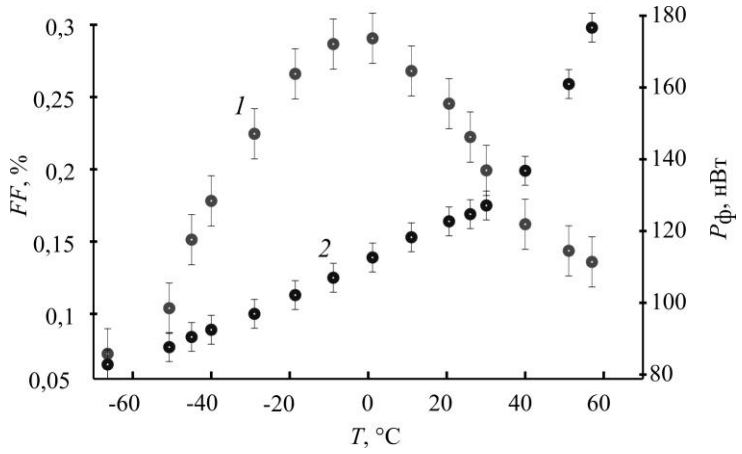


Рис.2. Зависимость отдаваемой мощности источника на нагрузку 100 кОм (*1*) и коэффициента формы (*2*) от температуры
Fig.2. Dependence on the temperature of the output power of the source on the load of 100 kOhm (*1*) and fill-factor (*2*)

При температуре 0 °С источник отдает в нагрузку максимальную мощность. Рост коэффициента формы во всем диапазоне температур обусловлен значительным снижением $U_{\text{х.х}}$ с повышением температуры. На отрицательном участке температур $I_{\text{н}}$ примерно совпадает с $I_{\text{к.з}}$. Таким образом, отношение $I_{\text{н}}^2/I_{\text{к.з}}$ остается постоянным и не оказывает существенного влияния на коэффициент формы в отличие от участка 0–60 °С, где рост коэффициента формы ускоряется за счет снижения $I_{\text{к.з}}$. Изменения параметров радиоизотопного источника электрического питания можно объяснить снижением яркости радиолюминесцентного источника света с увеличением температуры (температурное гашение люминесценции) [8–10], а также снижением эффективности с ростом температуры у используемых фотопреобразователей из аморфного гидрогенизированного кремния [11, 12].

Температурные исследования интенсивности радиолюминесцентных источников света. Для определения ключевых температурных эффектов, влияющих на выходную мощность радиоизотопного источника электрического питания, проведены исследования интенсивности свечения радиолюминесцентного источника света и выходных параметров фотопреобразователей от температуры. Эксперименты по исследованию интенсивности и спектров излучения проводились для единичных источников. Радиолюминесцентный источник света размещался в интегрирующей сфере IC2, которая устанавливалась в климатическую камеру. Интегрирующая сфера с помощью многомодового оптоволоконного кабеля соединялась со счетчиком фотонов COUNT-100B. При различных температурах измерялось количество импульсов на выходе счетчика фотонов. Результаты измерений для числа импульсов на выходе счетчика фотонов приведены на рис.3.

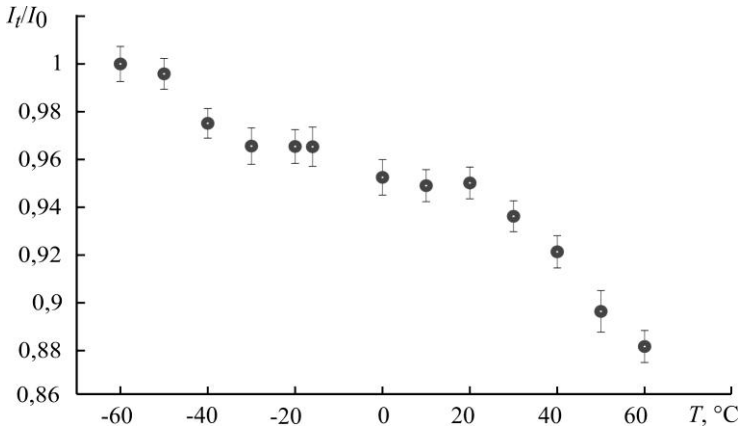


Рис.3. Зависимость числа фотонов на выходе радиолюминесцентного источника света от температуры

Fig.3. Dependence of the number of photons on the output of a radioluminescent light source on the temperature

Максимальная интенсивность свечения наблюдается при температурах порядка –60 °С. Во всем диапазоне температур интенсивность излучения радиолюминесцентного источника света снижается с ростом температуры. При повышении температуры интенсивность свечения люминофоров на основе ZnS снижается в соответствии с выражением [9]

$$I_t = \frac{I_0}{1 + S \cdot e^{-E/kT}},$$

где I_0 – максимальная интенсивность люминесценции; S – частотный фактор; E – энергия активации центра свечения; T – температура, К.

Данное уравнение характеризует температурное гашение люминесценции, наблюдаемое в люминофорах на основе ZnS. Однако снижение интенсивности в выбранном диапазоне температур невелико – порядка 12 % для одного источника. Возможно, что при наличии 36 источников света в одной батарее наблюдается мультипликативный эффект, приводящий к значительному снижению $U_{х.х}$ с ростом температуры.

Исследование характеристик фотопреобразователей под воздействием температуры. Экспериментально исследованы зависимости $U_{х.х}$, $I_{к.з}$ и $I_н$ от температуры (рис.4). Фотопреобразователи, защищенные от внешней засветки, помещались в климатическую камеру. При этом источник подсветки – светодиод зеленого цвета свечения – размещался вне камеры (в нормальных условиях). Ток, протекающий через светодиод, подбирался таким образом, чтобы смоделировать подсветку фотопреобразователя радиолюминесцентными источниками света. Оптическая связь между фотопреобразователями и светодиодом осуществлялась посредством плоского световода из органического стекла, боковая поверхность которого покрыта металлической фольгой.

У фотопреобразователей из аморфного гидрогенизированного кремния наблюдается снижение $U_{х.х}$ с ростом температуры более чем в 2 раза на выбранном диапазоне (см. рис.4). Похожее поведение фотопреобразователей из аморфного гидрогенизированного кремния отмечено в работах [11, 12]. При этом $I_{к.з}$ на выбранном диапазоне нелинейно возрастает. Разница между минимальным и максимальным значением тока короткого замыкания составляет 20 %.

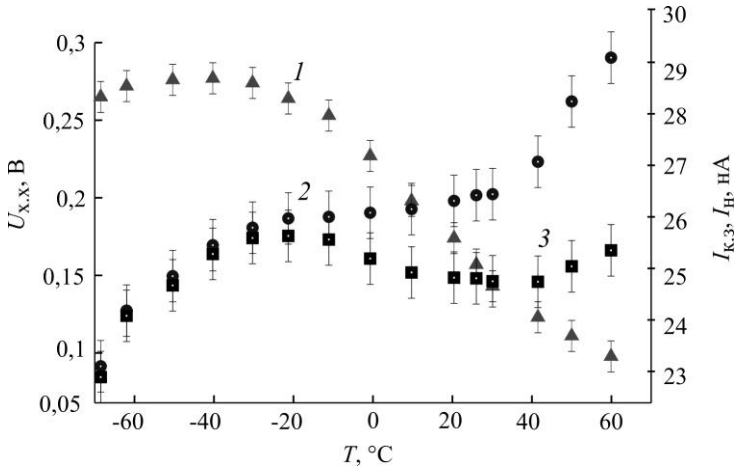


Рис.4. Зависимость напряжения холостого хода (*1*), тока короткого замыкания (*2*) и тока на нагрузке (*3*) фотопреобразователя от температуры
Fig.4. Dependence of the open circuit voltage (*1*) and short-circuit current (*2*) and current on the load (*3*) of the photoconverter on the temperature

Ток $R_н$, протекающий через сопротивление нагрузки, в диапазоне температур от –40 до +60 °С изменяется слабо (порядка 3 %). Так же слабо изменяется с температурой и отдаваемая мощность. При этом максимальная отдаваемая мощность наблюдается при температурах порядка –30 °С, а коэффициент формы, так же как и в случае батареи, растет во всем диапазоне исследуемых температур.

Заключение. Проведенные исследования показывают, что значительное снижение напряжения холостого хода и форма кривой отдаваемой мощности радиоизотопного источника питания определяются двумя механизмами: снижением с температурой интенсивности свечения радиолюминесцентных источников света (температурное гашение люминесценции) и снижением эффективности фотопреобразователей. При этом в интервале отрицательных температур (от –60 до 0 °С) снижение эффективности фотопреобразователей выражено слабо и основной вклад в изменение выходных параметров источников вносит температурное гашение люминесценции в источнике света. В интервале положительных температур оба процесса оказывают значительное влияние на снижение выходного напряжения и мощности. Таким образом, экспериментальные исследования радиоизотопных источников электрической энергии в диапазоне температур от –60 до +60 °С показывают, что наиболее оптимальные температуры находятся в районе 0 °С.

Разработанные радиоизотопные источники электрического питания на основе двойного преобразования могут найти применение в электронной аппаратуре, эксплуатирующейся при пониженных температурах, например в условиях Крайнего Севера.

Литература

1. ***Olsen L.C., Cabauy P., Elkind B.J.*** Betavoltaic power sources // Physics Today. – 2012. – Vol. 65. – No. 12. – P. 35–38.

2. Betavoltaic battery performance: Comparison of modeling and experiment / ***A.A. Svintsov, A.A. Krasnov, M.A. Polikarpov et al.*** // Applied Radiation and Isotopes. – 2018. – Vol. 137 – P. 184–189.

3. ***Ануфриев Ю.В., Зенова Е.В., Воронков Э.Н.*** Оценка перспективы применения бета-электрических батарей в микромощных автономных устройствах // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – Т. 20. – № 6. – P. 356–367.

4. Возможности применения бетавольтаического источника питания для питания имплантируемых устройств / ***А.А. Краснов, С.А. Леготин, С.И. Диденко и др.*** // Материалы Междунар. науч.-практич.

конф. «Медицинские импланты». – 2016. – Курск: ГБОУ ВПО Курский государственный медицинский университет Минздрава России ООО «МедТестИнфо», 2016. – P. 68.

5. ***Yunpeng L., Xiao G., Zhangang J., Xiaobin T.*** Temperature dependence of 63Ni-Si betavoltaic microbattery // Applied Radiation and Isotopes. – 2018. – Vol. 135 – P. 47–56.

6. ***Cheu D.S., Adams T.E., Revankar S.T.*** Experiments and modeling on effects of temperature on electrical performance of a betavoltaic // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Vol. 325 – P. 256–260.

7. Двойное преобразование энергии в радиоизотопном источнике питания / ***В.В. Светухин, С.Г. Новиков, А.В. Беринцев и др.*** // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – № 5. – С. 429–434.

8. ***Михальченко Г.А.*** Радиолюминесцентные излучатели. – М.: Атомиздат, 1988. – 152 с.

9. ***Hill C.G.A., Klasens H.A.*** The influence of temperature on the efficiencies of zinc sulfide phosphors containing silver and cobalt // Journal of The Electrochemical Society. – 1949. – Vol. 96. – No. 5. – P. 275–286. – URL: http://jes.ecsdl.org/content/96/5/275.full.pdf+html (дата обращения: 01.10.2018).

10. ***Osada Kikusaburo.*** Thermoluminescence of zinc sulfide phosphors // Journal of the Physical Society of Japan. – 1960. – Vol. 15. – No. 1. – P. 145–149. – URL: https://doi.org/10.1143/JPSJ.15.145 (дата обращения: 01.10.2018).

11. Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystalline silicon PV modules / ***Kholid Akhmad, Akio Kitamura, Fumio Yamamoto et al.*** // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1997. – Vol. 46. – No. 3. – P. 209–218. – URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0927024897000032 (дата обращения: 01.10.2018).

12. Effective conversion efficiency enhancement of amorphous silicon modules by operation temperature elevation / ***M. Kondo, H. Nishio, S. Kurata et al.*** // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1997. – Vol. 49. – No. 1. – P. 1–6. – URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0927024897001682 (дата обращения: 01.10.2018).

Поступила в редакцию 09.10.2018 г.; после доработки 09.11.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019.

Новиков Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы УлГУ (Россия, 432017, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корп. 4), novikovsg@ulsu.ru

Беринцев Алексей Валентинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы УлГУ (Россия, 432017, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корп. 4), berints@mail.ru

Алексеев Александр Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы УлГУ (Россия, 432017, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корп. 4), аспирант кафедры физического материаловедения Ульяновского государственного университета (432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42), granik@ya.ru

Сомов Андрей Ильич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы УлГУ (Россия, 432017, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корп. 4), andrey_somov@mail.ru

Светухин Вячеслав Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, директор НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), V.Svetukhin@tcen.ru

References

1. Olsen L.C., Cabauy P., Elkind B.J. Betavoltaic power sources. *Physics Today*, 2012, vol. 65, no. 12, pp. 35–38.

2. Svintsov A.A., Krasnov A.A., Polikarpov M.A., Polyakov A.Y., Yakimov E.B. Betavoltaic battery performance: Comparison of modeling and experiment. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol. 137, pp. 184–189.

3. Anufriev Yu.V., Zenova E.V., Voronkov E.N. Estimation of the Prospects for the Beta Voltaic Batteries in the Micro-Power Autonomous Devices. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystems technology*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 356–367. (in Russian).

4. Krasnov A.A., Legotin S. A., Didenko S.I., Omelchenko Y. K., Murashev V.N. Possibilities of using a beta-voltaic power source for powering implantable devices. *Materials of the International scientific-practical conference «Medical implants»*, 2016. P. 68. (in Russian).

5. Yunpeng L., Xiao G., Zhangang J., Xiaobin T., Temperature dependence of 63Ni-Si betavoltaic microbattery. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol. 135, pp. 47–56.

6. Cheu D. S., Adams T. E., Revankar S. T. Experiments and modeling on effects of temperature on electrical performance of a betavoltaic. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, vol. 325, pp. 256–260.

7. Svetukhin V.V., Novikov S.G., Berintsev A.V., Chertoriysky A.A., Alekseev A.S. Double Step Energy Conversion in Radioisotope Power Source. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 5, pp. 429–434. (in Russian).

8. Mikhalchenko G.A. *Radioluminescent Radiators*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 152 p. (in Russian).

9. Hill C.G.A., Klasens H.A. The influence of temperature on the efficiencies of zinc sulfide phosphors containing silver and cobalt. *Journal of The Electrochemical Society*, 1949, vol. 96, no. 5, pp. 275–286. Available at: http://jes.ecsdl.org/content/96/5/275.full.pdf+html (accessed: 01.10.2018).

10. Osada Kikusaburo. Thermoluminescence of zinc sulfide phosphors. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1960, vol. 15, no. 1, pp. 145–149. Available at: https://doi.org/10.1143/JPSJ.15.145 (accessed: 01.10.2018).

11. Kholid Akhmad, Akio Kitamura, Fumio Yamamoto et al. Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, vol. 46, no. 3, pp. 209–218. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0927024897000032 (accessed: 01.10.2018).

12. Kondo M., Nishio H., Kurata S. et al. Effective conversion efficiency enhancement of amorphous silicon modules by operation temperature elevation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, vol. 49, no. 1, pp. 1–6. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0927024897001682 (accessed: 01.10.2018).

Received 09.10.2018; Revised 09.11.2018; Accepted 22.01.2019.

Sergey G. Novikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Solid State Electronics, Technological Research Institute S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University (Russia, 432017, Ulyanovsk, Universitetskaya Nabereghnaya st., campus 4), novikovsg@ulsu.ru

Alexey V. Berintsev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Solid State Electronics, Technological Research Institute S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University (Russia, 432017, Ulyanovsk, Universitetskaya Nabereghnaya st., campus 4), berints@mail.ru

Alexander S. Alekseyev – Junior Researcher of Solid State Electronics, Technological Research Institute S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University (Russia, 432017, Ulyanovsk, Universitetskaya Nabereghnaya str., campus 4), PhD student of the Physical Materials Science, Ulyanovsk State University (432017, Russia, Ulyanovsk, L. Tolstoy st., 42), granik@ya.ru

Andrey I. Somov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Solid State Electronics, Technological Research Institute S.P. Kapitsa of Ulyanovsk State University (Russia, 432017, Ulyanovsk, Universitetskaya Nabereghnaya st., campus 4), andrey_somov@mail.ru

Vyacheslav V. Svetukhin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Director of SMC «Technological Center (124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), V.Svetukhin@tcen.ru

УДК 538.955:621.377.624:004.942 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-160-173

Прецессия намагниченности свободного слоя спинового вентиля и его переключение при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии

Ю.А. Юсипова

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

linda_nike@mail.ru

Современные микроэлектронные устройства, в основе архитектуры которых лежат слоистые спин-вентильные структуры, отличаются малым энергопотреблением, высокой надежностью и широким температурным диапазоном. Изучение динамических режимов спинового вентиля и исследование возможностей управления этими режимами представляют практический интерес. В работе рассмотрены режимы работы спинового вентиля, которые являются базовыми для магниторезистивной памяти с произвольным доступом (MRAM), бинарного стохастического нейрона (p-bit) и различных спин-трансферных наноосцилляторов (STNOs). Построена математическая модель спинового вентиля с продольной анизотропией, помещенного в магнитное поле, перпендикулярное оси анизотропии и параллельное плоскости слоев. Получена система уравнений, описывающих динамику вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля. Качественный анализ системы уравнений позволил определить равновесные положения намагниченности свободного слоя для спин-вентильной структуры. На основании проведенного бифуркационного анализа динамической системы уравнений найдены условия смены типа особых точек системы. Исследование динамики вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля позволило выявить основные режимы его работы в качестве составляющей магниторезистивной памяти, бинарного стохастического нейрона и спин-трансферного наноосциллятора и определить диапазоны тока и магнитного поля, соответствующие данным режимам. Для спин-трансферных наноосцилляторов рассчитаны частотные и амплитудные характеристики. Предложенная структура с планарной анизотропией, помещенная в поле, перпендикулярное оси анизотропии, с точки зрения ее применения в качестве спин-трансферного наноосциллятора будет предпочтительнее структуры с полем, приложенным параллельно оси анизотропии.

Ключевые слова: спиновый вентиль; магниторезистивная память с произвольным доступом; бинарный стохастический нейрон; спин-трансферный наноосциллятор; MRAM; p-bit; STNOs

© Ю.А. Юсипова, 2019

Для цитирования: Юсипова Ю.А. Прецессия намагниченности свободного слоя спинового вентиля и его переключение при воздействии магнитного поля, перпендикулярного оси анизотропии // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 160–173. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-160-173

Precession of Spin-Valve Free Layer Magnetization and Its Switching Under Influence of a Magnetic Field Perpendicular to Axis of Anisotropy

Iu.A. Iusipova

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

linda_nike@mail.ru

Abstract: Modern microelectronic devices based on the layered spin-valve structures are characterized by low power consumption, high reliability and wide temperature range. The study of the spin valve modes and the investigation of the possibilities of controlling these modes are of practical interest. In the work the spin valve modes operation, which are the base for magnetoresistive random-access memory MRAM, a binary stochastic neuron p-bit and a variety of the spin-transfer nano-oscillators STNOs, have been considered. For this purpose, a mathematical model of a spin valve with longitudinal anisotropy, placed in a magnetic field perpendicular to the axis of anisotropy and parallel to the plane of the layers has been constructed. A system of equations, describing the dynamics of the magnetization vector of the free layer of the spin valve has been obtained. The qualitative analysis of this system has enabled us to determine the equilibrium state of the free layer magnetization for the spin-valve structure. Based on the bifurcation analysis of the dynamic system of equations the conditions for changing the type of singular points of the system have been determined. The study on the dynamics of the magnetization vector of the free layer of the spin valve has helped to identify the main modes of its work as a part of the magnetoresistive random access memory, a binary stochastic neuron, spin-transfer nano-oscillators and to determine the ranges of the current and the magnetic field corresponding to the modes. For the spin-transfer nano-oscillators, also, the frequency and amplitude characteristics have been calculated. The proposed structure with planar anisotropy, placed in the field, which is perpendicular to the anisotropy axis, from the point of view of its application as a spin-transfer nano-oscillator will be more preferable than the structure with the field applied in parallel to anisotropy axis.

Keywords: spin valve; MRAM; STNO; p-bit; magnetoresistive random-access memory; binary stochastic neuron; spin-transfer nanosillator

For citation: Iusipova Iu.A. Precession of spin-valve free layer magnetization and its switching under influence of a magnetic field perpendicular to axis of anisotropy. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 160–173. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-160-173

Введение. Слоистые спин-вентильные структуры находят применение в таких микроэлектронных устройствах, как считывающие головки жестких дисков, магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM), бинарный стохастический нейрон (p-bit) и различные спин-трансферные наноосцилляторы (STNOs). Это обусловлено тем, что спинэлектронные устройства отличаются хорошим временем отклика на электрические и магнитные воздействия, малым энергопотреблением и высокой надежностью.

В работе [1] представлена новая MRAM с диаметром ячейки 11 нм и временем переключения 10 нс. Вероятностная спиновая логика (PSL), основанная на сетях бинарных стохастических нейронов, – новое направление в современной наноэлектронике. PSL лежит в основе архитектуры квантовых компьютеров на базе модели Изинга [2–5], генераторов случайных чисел, нейронных сетей, использующих байесовский статистический вывод [3] и обратимую булеву логику [6], а также применяется для устройств распознавания изображений [7]. Наноразмерные микроволновые осцилляторы STNOs могут конкурировать с используемыми в настоящее время генераторами микроволнового излучения с точки зрения частотных характеристик. Одно из важных качеств STNOs – возможность изменения частоты осцилляций в широком диапазоне с помощью приложенного электрического тока или магнитного поля [8]. Поэтому исследования различных динамических режимов спинового вентиля и возможностей управления этими режимами представляют практический интерес.

Работа спинового вентиля основана на явлении переноса спинового момента, теоретическая модель которого предложена Дж. Слончевским [9]. Динамика вектора намагниченности спинового вентиля с планарной анизотропией при воздействии магнитного поля, приложенного вдоль оси анизотропии, широко исследована в работах [10–12].

Цель настоящей работы – изучение спинового вентиля с планарной анизотропией, помещенного в магнитное поле, перпендикулярное оси анизотропии. Среди возможных динамические режимы следует выделить различные переключательные и режимы прецессии. Переключение спинового вентиля из неустойчивого положения равновесия в единственное устойчивое используется в работе MRAM. Базовый логический элемент PSL – p-bit, основным режимом работы которого является переключение с двумя вероятными исходами. Прецессия вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля находит применение в работе наноосцилляторов.

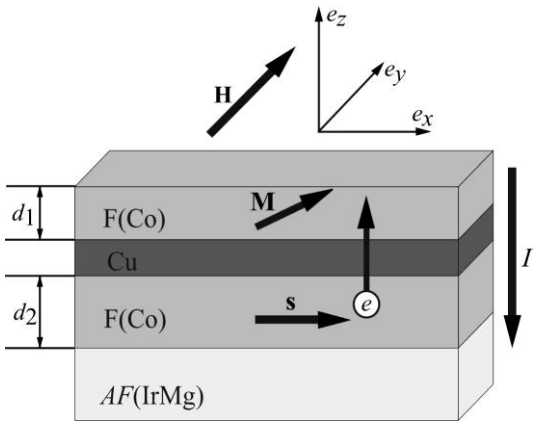


Рис.1. Модель спинового вентиля с продольной анизотропией
Fig.1. Spin valve model with longitudinal anisotropy

Основные уравнения. Объект исследования – трехслойная вентильная структура квадратного поперечного сечения со стороной 11 нм. Оси *OX* и *OY* декартовых координат, связанных со структурой, ориентированы вдоль сторон квадрата, ось *OZ* перпендикулярна плоскости слоев. Ферромагнитные слои вентиля изготовлены из монокристаллического кобальта с осью легкого намагничивания, параллельной оси *OX* (рис.1). Намагниченность толстого (закрепленного) слоя фиксирована, его толщина $d_2 = 5$ нм. Направление вектора намагниченности тонкого (свободного) слоя **M** толщиной $d_1 = 2$ нм может изменяться. Структура помещена в магнитное поле **H**,

направленное вдоль оси *OY*. Параллельно оси *OZ* пропускается электрический ток плотностью *J*.

Динамика вектора намагниченности свободного слоя **M** описывается уравнением Ландау – Лифшица – Гильберта [9]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -|\gamma|\mu_0 \left[\mathbf{M}\times\mathbf{H}_{eff}\right] + \frac{\alpha}{M_s}\left[\mathbf{M}\times\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}\right], \qquad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение; α – безразмерный коэффициент диссипации; M_s – намагниченность насыщения.

Эффективное магнитное поле $\mathbf{H}_{eff}$ включает те виды физических взаимодействий, которые учтены в рассматриваемой модели:

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H} + \mathbf{H}_a + \mathbf{H}_f + \mathbf{H}_c .$$

В данном случае внешнее магнитное поле $\mathbf{H}$ направлено вдоль оси OY: $\mathbf{H} = H\mathbf{e}_y$. Так как эффективное поле магнитной анизотропии $\mathbf{H}_a$ направлено вдоль оси OX, оно определяется соотношением

$$\mathbf{H}_a = 2K_a\mu_0^{-1}M_s^{-2}(\mathbf{M},\mathbf{e}_x)\mathbf{e}_x = 2K_a\mu_0^{-1}M_s^{-2}M_x\mathbf{e}_x ,$$

где K_a – константа анизотропии.

Эффективное поле размагничивания $\mathbf{H}_f$, возникающее за счет конечных размеров вентильной структуры, в выбранной геометрии можно считать равным $-M_z\mathbf{e}_z$. Здесь M_x, M_z – проекции вектора **M** на оси *OX*, *OZ* соответственно. Эффективное поле, создаваемое спин-поляризованным током инжекции $\mathbf{H}_c$, определяется выражением [9]

$$\mathbf{H}_c = G\frac{J\hbar}{d_1 e\mu_0 M_s^{\,2}}\left[\mathbf{s}\times\mathbf{M}\right],$$

где G – коэффициент токовой поляризации; **s** – направление спиновой поляризации тока, совпадающее с направлением намагниченности в толстом слое (в данной геометрии $\mathbf{s}\equiv\mathbf{e}_x$).

Используя нормировки $\mathbf{m} = \frac{\mathbf{M}}{M_s}$, $\mathbf{h}_{eff} = \frac{\mathbf{H}_{eff}}{M_s}$, $\mathbf{h} = \frac{\mathbf{H}}{M_s}$, $\tau = \frac{t\gamma\mu_0 M_s}{(1+\alpha^2)}$, $j = \frac{J\hbar}{d_1 e\mu_0 M_s^{\,2}}$, $k = \frac{2K_a}{\mu_0 M_s^2}$, уравнение (1) можно привести к безразмерному виду

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \tau} = -\left[\mathbf{m}\times\mathbf{h}_{eff}\right] + \alpha\mathbf{h}_{eff} - \alpha\mathbf{m}(\mathbf{m},\mathbf{h}_{eff}). \qquad (2)$$

В этом случае координатная запись эффективного магнитного поля $\mathbf{h}_{eff}$ имеет вид

$$\mathbf{h}_{eff} = \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} km_x \\ h - jGm_z \\ jGm_y - m_z \end{pmatrix},$$

где m_x, m_y, m_z – проекции вектора намагниченности свободного слоя **m** спинового вентиля на оси *OX*, *OY* и *OZ* соответственно.

В координатной записи система (2) имеет вид

$$\begin{aligned}
\dot{m}_x &= m_z h - jGm_z^2 - jGm_y^2 + m_y m_z + \alpha k m_x + \alpha m_x m_z^2 - \alpha m_x m_y h - \alpha k m_x^3,\\
\dot{m}_y &= \alpha h - m_x m_z - k m_x m_z + jGm_x m_y - \alpha jGm_z + \alpha m_y m_z^2 - \alpha h m_y^2 - \alpha k m_y m_x^2,\\
\dot{m}_z &= k m_x m_y - h m_x + jGm_x m_z + \alpha jGm_y - \alpha m_z + \alpha m_z^3 - \alpha h m_y m_z - \alpha k m_z m_x^2.
\end{aligned} \qquad (3)$$

Коэффициент токовой поляризации как скалярная безразмерная функция $G(\mathbf{m})$, согласно [9], определяется выражением

$$G = \frac{4P^{3/2}}{(1+P)^3(3+\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}) - 16P^{3/2}} = \frac{c}{b+m_x}.$$

Здесь $c = \dfrac{4P^{3/2}}{(1+P)^3}$; $b = 3-4c$; $P = \dfrac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow}$ – параметр спиновой поляризации.

Использованные в расчетах параметры материала (кобальта), из которого изготовлены ферромагнитные слои спинового вентиля, следующие: $P = 0{,}35$; $\alpha = 0{,}02$; $\mu_0 M_s = 1{,}76$ Тл; $K_a = 5{,}3\cdot 10^5$ Дж/м^3 [12].

Качественный анализ динамической системы. Определим точки равновесия вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля. Для их нахождения правые части системы (3) необходимо приравнять к нулю. Тогда путем последовательного исключения переменных получим выражения для расчета координаты m_x особых точек:

$$A_6 m_x^6 + A_5 m_x^5 + A_4 m_x^4 + A_3 m_x^3 + A_2 m_x^2 + A_1 m_x + A_0 = 0, \qquad (4а)$$

где

$$\begin{aligned}
A_6 &= k^2(k+1)^2;\\
A_5 &= 4bk^2(k+1)^2;\\
A_4 &= (k+1)(h^2 - k^2 - k^3 + h^2 k + 6b^2k^2 + 6b^2k^3 + 2kc^2j^2);\\
A_3 &= 4b(k+1)(h^2 - k^2 - k^3 + h^2 k + b^2k^2 + b^2k^3 + kc^2j^2);\\
A_2 &= k^4(b^4 - 6b^2) + k^3(2b^4 - 12b^2) + k^2(b^4 - 6b^2 + 6h^2b^2 - 2c^2j^2 + 2b^2c^2j^2) +\\
&+ k(12h^2b^2 - 2c^2j^2 + 2b^2c^2j^2) + 6h^2b^2 + c^4j^4 + h^2c^2j^2;\\
A_1 &= -4b^3k^4 - 8b^3k^3 + k^2(4h^2b^3 - 4b^3 - 4bc^2j^2) + k(8h^2b^3 - 4bc^2j^2) + 4h^2b^3 + 4h^2bc^2j^2;\\
A_0 &= -b^4k^4 - 2b^4k^3 + k^2(h^2b^4 - b^4 - 2b^2c^2j^2) + k(2h^2b^4 - 2b^2c^2j^2) + h^2b^4 - c^4j^4 + b^2c^2j^2h^2,
\end{aligned}$$

$$m_x = 0. \qquad (4б)$$

Уравнение (4а) отвечает двум положениям равновесия, которые при нулевом магнитном поле и любых токах имеют координаты $T_1(1;0;0)$ и $T_2(-1;0;0)$. Уравнение (4б) отвечает четырем положениям равновесия, которые при $H = 0$ и $J = 0$ имеют координаты $T_3(0;0;1)$, $T_4(0;0;-1)$, $T_5(0;1;0)$ и $T_6(0;-1;0)$. Это соответствует результатам, полученным в работах [10–12].

На рис.2 показана бифуркационная диаграмма при $|m_x, m_y, m_z| \le 1$, построенная в программной среде MatLab. Бифуркационная диаграмма симметрична относительно оси J. Линии p и p' ограничивают области существования точек T_1 и T_2, а линии q и q' – точек T_3, T_4, T_5 и T_6. Линия p пересекает ось H в точке $H_p = \dfrac{2K_a}{M_s\mu_0}$, а линия p' – в точке $H_{p'} = -\dfrac{2K_a}{M_s\mu_0}$. Линии q и q' пересекают ось J в точке $J_{q,q'} = \dfrac{d_1 e\mu_0 M_s{}^2 b}{2c\hbar}$, а ось H – в точках $H_q = M_s$ и $H_{q'} = -M_s$ соответственно. Таким образом, в каждой точке области I существуют шесть особых точек. В каждой точке областей II и IV имеются четыре особые точки, при этом в области IV две точки рассчитаны по выражению (4б), а другие две – по выражению (4а). В области II все четыре точки рассчитаны по выражению (4б). В каждой точке области III существуют две особые точки, рассчитанные по (4б), а в области V – две особые точки, рассчитанные по (4а).

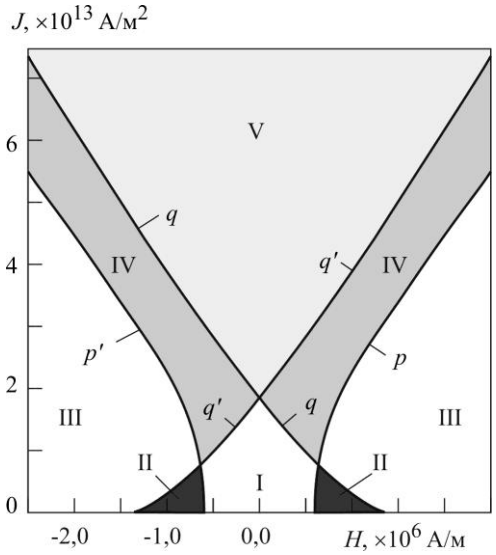


Рис.2. Бифуркационная диаграмма при $|m_x, m_y, m_z| \le 1$ нм
Fig.2. Bifurcation diagram for the number of the singular points ($|m_x, m_y, m_z| \le 1$)

На рис.3,*а* показаны траектории изменения координат особых точек T_1 и T_2. В случае приложения магнитного поля и последующего его увеличения при нулевом токе координаты точек T_1 и T_2 смещаются вдоль экватора единичной сферы. Если $H > 0$, то точки смещаются в сторону координаты (0;1;0), если $H < 0$ – в сторону (0;–1;0). При $|H| = \dfrac{2K_a}{M_s\mu_0}$, достигнув соответствующего положения, точки T_1 и T_2 аннигилируют. В случае $J \ne 0$ и $H > 0$ траектория движения точек проходит по дуге выше экватора в первой четверти единичной сферы, в обратном случае – по дуге ниже экватора в третьей четверти единичной сферы. На рис.3,*а* в третьей четверти единичной сферы черными линиями показаны траектории движения точек T_1 и T_2 при постоянном токе и изменяющемся магнитном поле: $J = 2\cdot10^{13}$ А/м^2 (штрихпунктирная линия с двумя точками); $J = 4\cdot10^{13}$ А/м^2 (штрихпунктирная линия с одной точкой); $J = 6\cdot10^{13}$ А/м^2 (пунктирная линия). В случае приложения положительного магнитного поля возникают симметричные относительно оси OX траектории в первой четверти единичной сферы.

В первой четверти единичной сферы на рис.3,*а* серым цветом показаны траектории изменения координаты точек T_1 и T_2 при постоянном положительном магнитном поле и растущем токе: $H = 0,5\cdot10^6$ А/м (сплошная линия); $H = \dfrac{2K_a}{M_s\mu_0} = 0,6\cdot10^6$ А/м (штрихпунктирная линия с одной точкой); $H = 1,0\cdot10^6$ А/м (штрихпунктирная линия с двумя точками); $H = 1,5\cdot10^6$ А/м (пунктирная линия); $H = 2,0\cdot10^6$ А/м (штриховая линия).

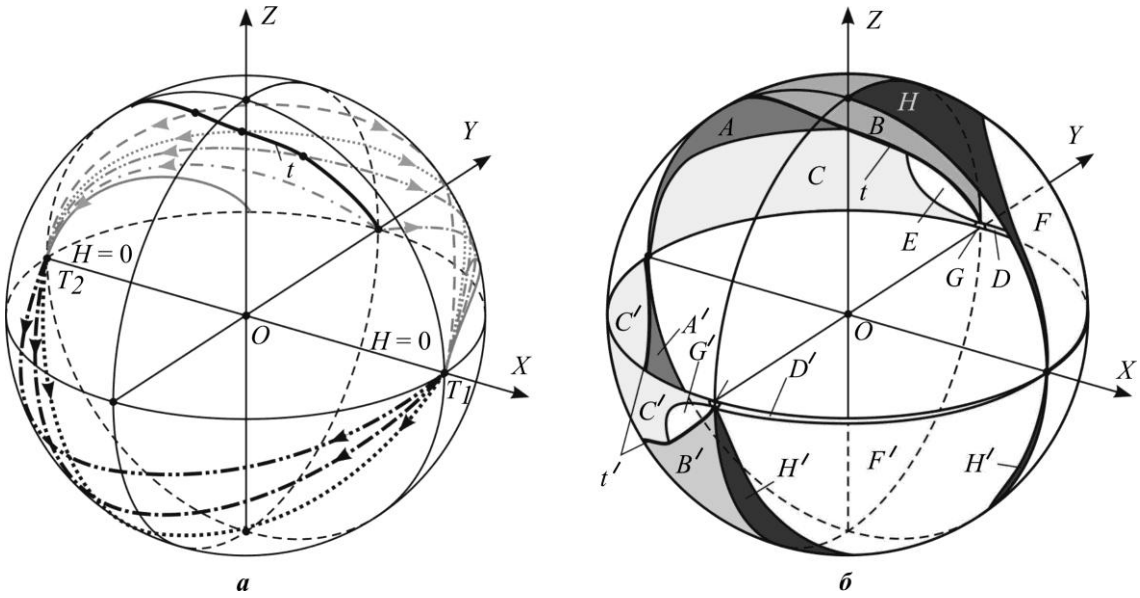


Рис.3. Траектории изменения координат особых точек T_1 и T_2 (*а*) и области смены типа особых точек (*б*)

Fig.3. Tracks of singular points T_1 and T_2 on the unit sphere (*a*) and change of type of singular points T_1 and T_2 (*b*)

При $J = 0$ и $|H| \le \dfrac{2K_a}{M_s \mu_0}$ точки T_1 и T_2 занимают положение на экваторе единичной сферы, соответствующее приложенному магнитному полю. В случае $H > \dfrac{2K_a}{M_s \mu_0}$ при минимальном токе точки T_1 и T_2 расположены на линии t (сплошная черная), которая соответствует линии p на рис.2. При увеличении тока точки T_1 и T_2 смещаются по дуге в сторону координат (1;0;0) и (–1;0;0) соответственно. В случае приложения отрицательного магнитного поля возникают симметричные относительно оси OX траектории в третьей четверти единичной сферы.

При положительных магнитных полях координаты точек T_1 и T_2 находятся в первой четверти, а при отрицательных – в третьей четверти (рис.3,*б*). При этом области смены типа особых точек симметричны относительно оси OX. В областях D и D' особая точка T_1 относится к типу устойчивый фокус (УФ), F и F' – неустойчивый фокус (НФ), H и H' – неустойчивый узел (НУ), B и B' – седло (С). Особая точка T_2 в областях A и A' относится к типу устойчивый узел (УУ), C и C' – УФ, E и E' – НФ. Линии t и t' отделяют области, в которых существует точка T_1, от областей, в которых существует точка T_2.

При изменении тока и поля особые точки T_3, T_4, T_5 и T_6 также изменяют свои координаты. Так как, согласно выражению (4б), компонента m_x вектора намагниченности в этих точках равна нулю, смещение их координат происходит вдоль окружности, плоскость которой перпендикулярна оси OX. В случае ненулевого тока бóльшим токам соответствует смещение точек T_3 и T_4 по часовой стрелке, а точек T_5 и T_6 – против часовой стрелки. Это согласуется с результатами, полученными в работах [10–12]. При приложении магнитного поля и последующем его увеличении точки T_3 и T_5 смещаются против часовой стрелки, а T_4 и T_6 – по часовой стрелке.

На рис.4,*а* изображена бифуркационная диаграмма с областями смены типа особых точек для положительных магнитных полей. Диаграмма рассчитана в программной среде MatLab. Соответствие между номерами областей на рис.2 и 4, а также типами особых точек, существующих в этих областях, показано в табл.1.

Линии бифуркации l, o, u получены из выражения (4а), а линии f, g, i – из (4б). При переходе через линию l точка T_1 меняет свой тип на НУ – суперкритическая бифуркация (области 2–4, 17, 22, 24). В областях 10, 12, 19–21, ограниченных линиями o и d, точка T_1 меняет свой тип на С – субкритическая бифуркация. При переходе через линию f точка T_3 меняет свой тип на НУ (области 16,17). В областях 10–12, ограниченных линиями g и d, точка T_5 меняет свой тип на С (см. рис.4,*а*,*б*). Точки T_4 и T_6 существуют только в областях, ограниченных линией q (1, 2, 13, 14, 23–29). При этом они имеют тип НФ и С соответственно (см. рис.4,*а*,*в*,*г*).

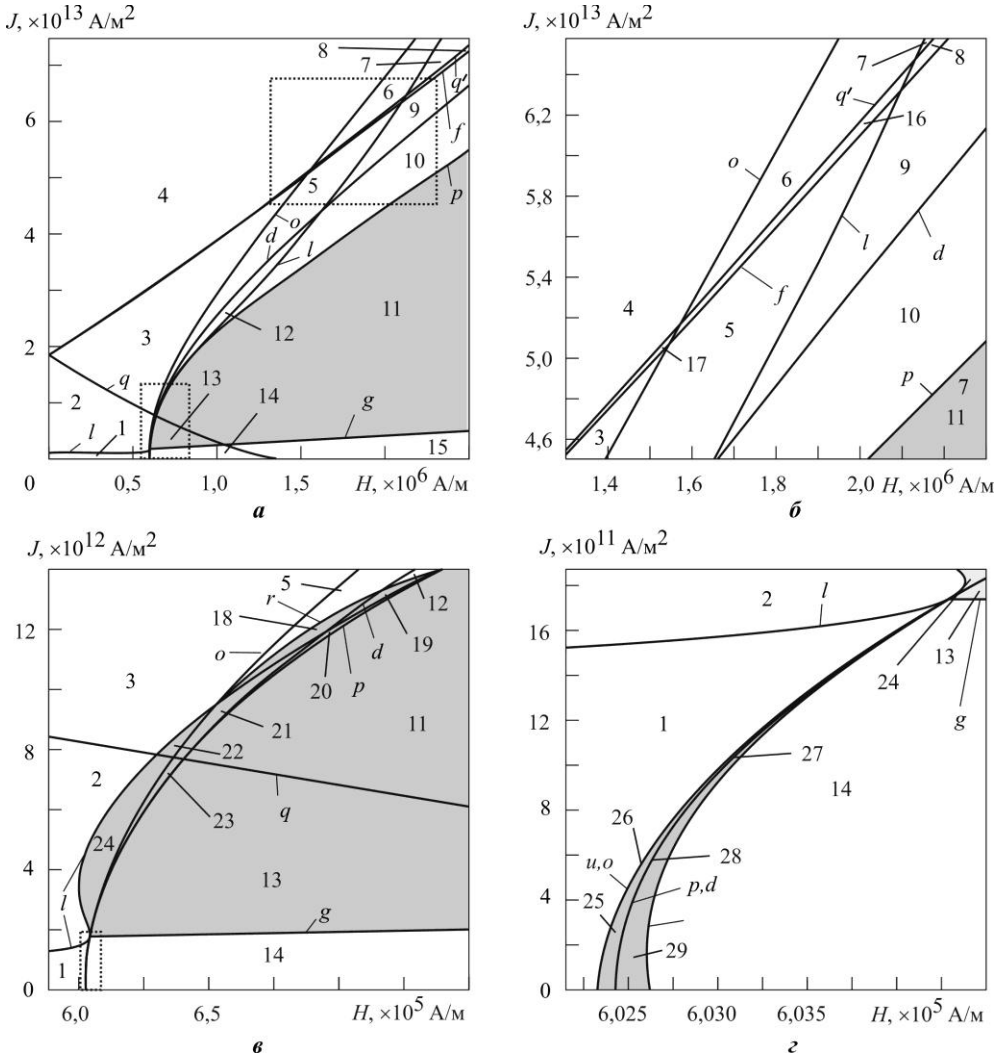


Рис.4. Бифуркационная диаграмма с областями смены типа особых точек (*а*): *б*, *в*, *г* – области, ограниченные пунктиром на рис.4,*а*,*в* соответственно

Fig.4. Bifurcation diagrams for types of singularities (*a*): *b*, *c*, *d* – the areas bounded by the dotted lines in fig.4,*a*,*c* respectively

Таблица 1

Соответствие между номерами областей и типами особых точек, существующих в этих областях

Table 1

The correspondence between the area numbers and the types of special points that exist in these areas

Номер области		Тип особых точек					
см. рис.2	см. рис.4	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
I	1	УФ	УФ	НФ	НФ	С	С
I	2	НФ	УФ	НФ	НФ	С	С
I	23	НУ	НФ	НФ	НФ	С	С
I	24	НФ	НФ	НФ	НФ	С	С
I	25	УУ	УУ	НФ	НФ	С	С
I	26	УФ	УУ	НФ	НФ	С	С
I	27	УФ	С	НФ	НФ	УУ	С
I	28	С	УУ	НФ	НФ	УУ	С
II	13	-	-	НФ	НФ	НФ	С
II	14	-	-	НФ	НФ	УФ	С
II	29	-	-	НФ	НФ	УУ	С
III	11	-	-	НФ	-	НФ	-
III	15	-	-	НФ	-	УФ	-
IV	3	НФ	УФ	НФ	-	С	-
IV	5	НУ	УФ	НФ	-	С	-
IV	8	НУ	УУ	НУ	-	С	-
IV	9	НУ	УУ	НФ	-	С	-
IV	10	С	УУ	НФ	-	НФ	-
IV	12	С	УФ	НФ	-	НФ	-
IV	16	НУ	УФ	НУ	-	С	-
IV	17	НФ	УФ	НУ	-	С	-
IV	18	НУ	УФ	НФ	-	С	-
IV	19	С	УФ	НФ	-	НФ	-
IV	20	С	НФ	НФ	-	НФ	-
IV	21	С	НФ	НФ	-	НУ	-
IV	22	НФ	НФ	НФ	-	С	-
V	4	НФ	УФ	-	-	-	-
V	6	НУ	УФ	-	-	-	-
V	7	НУ	УУ	-	-	-	-

Линии u и i исходят из точки пересечения линий p, d, g, o и касания линии l (см. рис.4,*г*). При пересечении линии u точка T_1 меняет тип УФ (область 1) на УУ (области 25, 26). При этом в узкой области 26, заключенной между линиями u и o, точка T_2 имеет тип УФ, но при переходе через линию o точка T_2 меняет свой тип на УУ (области 7–10, 25). При многократном пересечении линий d и p образуются узкие области 27 и 28 (см. рис.4,*г*).

Динамика вектора намагниченности в положительных магнитных полях. На рис.5 представлена классификация типов динамики вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля в положительных полях и токах. Траектории конца вектора намагниченности рассчитаны с помощью метода Рунге – Кутты.

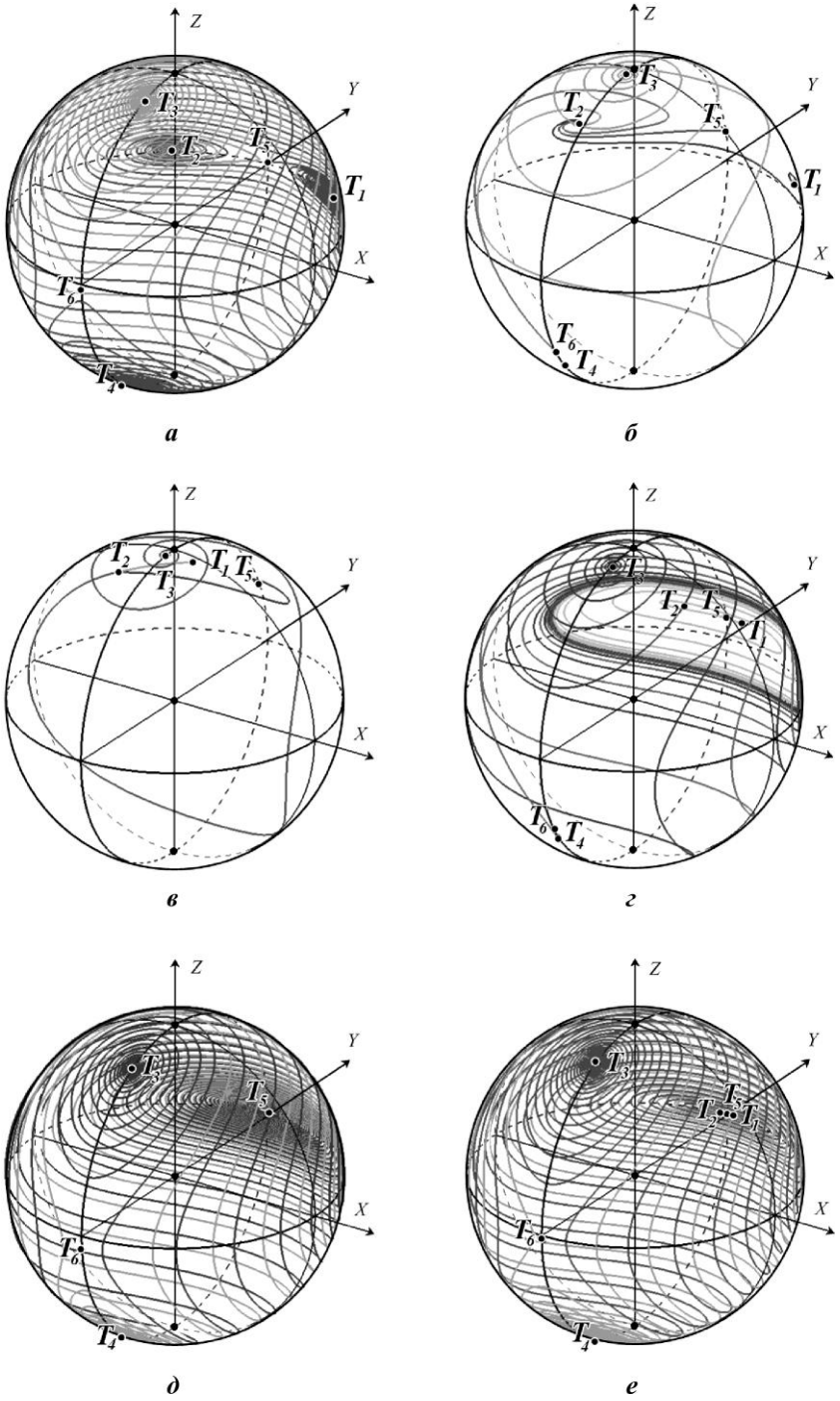


Рис.5. Динамика вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля в положительных полях и токах: *а* – переключение с двумя равновероятными исходами; *б* – переключение в УФ T_2; *в* – переключение в УУ T_2; *г* – переключение в УФ T_5; *д* – устойчивый предельный цикл; *е* – неустойчивый предельный цикл

Fig.5. Dynamics of the magnetization vector of the free layer of the spin valve in positive fields and currents: *a* – switching dynamics with two equally probable outcomes; *b* – switching dynamics to the stable focus T_2; *c* – switching dynamics to the stable node T_2; *d* – switching dynamics to the stable focus T_5; *e* – dynamics with the stable limit cycle; *f* – dynamics with the unstable limit cycle

На рис.5,*а–г* показаны переключательные режимы спинового вентиля. При малых токах и полях (см. рис.4,*а*,*в*,*г*, область 1) имеет место переключение спинового вентиля с двумя равновероятными исходами (см. рис.5,*а*). Так как в этом случае точки T_3 и T_4 являются НФ, а точки T_5 и T_6 – С, то переключение может происходить равновероятно в УФ T_1 и T_2. На рис.5,*б* показано переключение спинового вентиля из нескольких неустойчивых положений равновесия в УФ T_2 (см. рис.4, области 2–6, 12, 16, 17,). При этом чем ближе координаты точек T_1 и T_2 к (0;1;0), тем больше витков имеет траектория вектора намагниченности. На рис.5,*в* точка T_2 является УУ (см. рис.4,*а*,*б*, области 7–10), поэтому тип динамики вектора намагниченности отличается от показанного на рис.5,*б* только отсутствием искривлений траектории при приближении к этой точке. На рис.5,*г* показано переключение спинового вентиля из нескольких неустойчивых положений равновесия в УФ T_5 (см. рис.4, области 14, 15).

На рис.5,*д*,*е* приведены типы динамики вектора намагниченности с предельными циклами. Области на рис.4, в которых наблюдаются предельные циклы, закрашены серым цветом. Тип динамики вектора намагниченности с устойчивым предельным циклом, показанный на рис.5,*д*, возникает в областях, где нет ни одной устойчивой точки (11, 13, 20–24), или в областях, ограниченных линиями *r* и *o* (см. рис.4,*в*, области 18, 19), где УФ T_2 приближается достаточно близко к точке T_1. Линия *r* получена численным методом с помощью моделирования динамики вектора намагниченности. Она исходит из точки пересечения линий *l* и *o*, а заканчивается в точке пересечения *l* и *p*. Отметим, что при увеличении магнитного поля из-за смещения точки T_5 по часовой стрелке предельный цикл расширяется по оси *OZ*.

При малых токах ($J < 1{,}6 \cdot 10^{11}$ А/м^2) и положительных магнитных полях, приближенных к $H = \dfrac{2K_a}{M_s \mu_0}$ (см. рис.4,*г*, области 25–29), координаты точек T_1, T_2 и T_5 находятся в трапециевидной области G (см. рис.3,*б*). В этом случае вокруг этих точек возникает неустойчивый предельный цикл (рис.5,*е*).

Для реализации PSL больше всего подходит режим переключения с двумя равновероятными исходами (см. рис.5,*а*). Данный тип динамики намагниченности спинового вентиля характерен для диапазонов магнитного поля и тока $H \in [-0{,}6;\ 0) \cap (0;\ 0{,}6] \cdot 10^6$ А/м, $J \in (0;\ 0{,}1] \cdot 10^{13}$ А/м^2.

Для работы MRAM лучшим является переключательный режим, при котором переключение происходит из точки T_1 в точку T_2 (см. рис.5,*б*,*в*). При этом координата точки T_2 должна находиться в бассейне притяжения точки (–1;0;0), которая станет стационарной при нулевом токе и поле. На бифуркационной диаграмме это соответствует области управляющих параметров в небольших магнитных полях и токах (см. рис.4), что способствует уменьшению энергозатратности. Этим критериям больше всего отвечает область 2 на рис.4,*а*,*в*,*г* в диапазонах тока и поля $H \in [-0{,}5;\ 0{,}5] \cdot 10^6$ А/м, $J \in [0{,}12;\ 2{,}00] \cdot 10^{13}$ А/м^2. Отметим, что при тех же значениях поля переключательный ток в рассматриваемом случае больше, чем в случае поля, параллельного оси анизотропии [10–12].

Для наноосцилляторов важны те режимы с прецессией, в которых проекция вектора намагниченности на ось анизотропии периодически существенно изменяется. Это

приводит к периодическому изменению магнитосопротивления структуры, что вызывает колебания тока и напряжения во внешней цепи. Тип динамики намагниченности с устойчивым предельным циклом, показанный на рис.5,*д*, соответствует этим критериям.

Для увеличения амплитуды осцилляций намагниченности $M_{x\max}$ подходит режим работы спинового вентиля с предельным циклом, максимально растянутым по оси OX. Частота прецессии ν_T вокруг особой точки T выражается мнимой частью $\mathrm{Im}\,\lambda_T$ собственных чисел матрицы линеаризации динамической системы вблизи этой особой точки. В табл.2 приведены частоты и амплитуды осцилляций для областей, в которых имеются устойчивые предельные циклы. Наибольшие значения синхронизированной частоты ν на предельных циклах наблюдаются в областях 11 и 13, где точки T_1 и T_2 не существуют. Это обусловлено тем, что частота прецессии вокруг этих точек очень мала. Таким образом, можно выбрать оптимальные диапазоны токов и полей, соответствующие наибольшим значениям частоты ν и амплитуды $M_{x\max}$: $J \in [0,38; 0,60]\cdot 10^{13}$ А/м^2, $H \in [-0,91; -0,63] \cap [0,63; 0,91]\cdot 10^6$ А/м. При этом диапазон частоты ν и амплитуды $M_{x\max}$ будет следующим: $\nu \in [3,5; 7,1]$ ГГц, $M_{x\max} \in [0,715; 0,878]\cdot M_s$ А/м.

Таблица 2

Значения параметров осцилляций для областей с устойчивыми предельными циклами

Table 2

Values of oscillation parameters for areas with stable limit cycles

Область (см. рис.4)	*H*, А/м	*J*, А/м	Частота, ГГц						$M_{x\max}/M_s$	ν, ГГц
			ν_{T_1}	ν_{T_2}	ν_{T_3}	ν_{T_4}	ν_{T_5}	ν_{T_6}		
20	$6,93\cdot10^5$	$1,17\cdot10^{13}$	0	3,09	60,59	-	2,51	-	0,875	2,76
24	$6,30\cdot10^5$	$7,73\cdot10^{12}$	4,53	8,45	59,73	9,74	0	0	0,885	3,20
21	$6,47\cdot10^5$	$8,44\cdot10^{12}$	0	3,28	59,95	-	0	-	0,890	3,27
23	$6,26\cdot10^5$	$6,33\cdot10^{12}$	0	3,37	59,11	33,76	0	0	0,880	3,38
23	$6,26\cdot10^5$	$6,19\cdot10^{12}$	0	1,52	59,04	34,61	0	0	0,879	3,39
13	$6,44\cdot10^5$	$7,48\cdot10^{12}$	-	-	59,60	15,99	0	3,78	0,890	3,45
13	$7,00\cdot10^5$	$3,74\cdot10^{12}$	-	-	56,45	41,15	0	15,24	0,799	4,00
11	$7,00\cdot10^5$	$7,48\cdot10^{12}$	-	-	59,42	-	12,66	-	0,900	4,04
11	$9,10\cdot10^5$	$5,98\cdot10^{12}$	-	-	56,48	-	28,58	-	0,887	5,73

Заключение. Бифуркационный анализ системы уравнений, описывающей динамику вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля, позволил выявить особенности процессов переключения и прецессии вектора намагниченности. Выделены следующие типы динамики вектора намагниченности: переключение вектора намагниченности с двумя равновероятными исходами, переключение из нескольких неустойчивых положений в единственное устойчивое, а также режимы с устойчивым и неустойчивым предельными циклами.

Исследование динамики вектора намагниченности показало, что для реализации вероятностной спиновой логики основной режим работы спинового вентиля – пере-

ключение с двумя равновероятными исходами, для которого рассчитаны соответствующие диапазоны токов и полей. Наилучшим типом динамики вектора намагниченности для работы ячейки MRAM является переключательный режим в устойчивый фокус T_2. Значения магнитных полей и токов, соответствующих режиму переключения спинового вентиля в магнитном поле, параллельном оси анизотропии, полученные в работах [10–12], ниже, чем для переключательного режима.

Оптимальным режимом работы спинового вентиля в качестве STNO является тип динамики намагниченности с устойчивым предельным циклом. Результаты расчета диапазонов токов и магнитных полей, соответствующих максимальной амплитуде и частоте, показали, что предельные токи и магнитные поля, в которых происходит образование предельных циклов, в данной модели в два раза ниже, чем в модели с планарной анизотропией и полем, приложенным параллельно оси анизотропии [10–12]. Это обстоятельство дает основание предполагать, что структура с планарной анизотропией, помещенная в поле, перпендикулярное оси анизотропии, с точки зрения ее применения в качестве STNO будет предпочтительней.

Литература

1. Dependence of voltage and size on write error rates in spin-transfer torque magnetic random-access memory / ***J.J. Nowak, R.P. Robertazzi, J.Z. Sun et al.*** // IEEE Magnetics Letters. – 2016. – Vol. 7. – P. 3102604

2. ***Sutton B., Camsari K.Y., Behin-Aein B., Datta S.*** Intrinsic optimization using stochastic nanomagnets // Scientific Reports. – 2017. – Vol.7. – No. 1. – P. 1–9.

3. ***Behin-Aein B., Diep V., Datta S.*** A building block for hardware belief networks // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6. – No. 1. – P. 1–10.

4. ***Shim Y., Jaiswal A., Roy K.*** Ising computation based combinatorial optimization using spin-Hall effect (SHE) induced stochastic magnetization reversal // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 193902.

5. ***Faria R., Camsari K.Y., Datta S.*** Low barrier nanomagnets as p-bits for spin logic // IEEE Magnetics Letters. – 2017. – Vol. 8. – P. 2685358.

6. ***Camsari K.Y., Faria R., Sutton B.M., Datta S.*** Stochastic p-bits for invertible logic // Phys. Rev. – 2017. – X. – Vol. 7. – No. 3. – P. 031014.

7. Low-energy deep belief networks using intrinsic sigmoidal spintronic-based probabilistic neurons / ***R. Zand, K.Y. Camsari, S.D. Pyle et al.*** // in Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI (ACM, 2018). – 2018. – P. 15–20.

8. ***You Ch.Y.*** Spin torque nano-oscillator with an exchange-biased free rotating layer // Journal of Magnetics. – 2009. – Vol. 14(4). – P. 168–171.

9. ***Slonczewski J.C.*** Current-driven excitation of magnetic multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1996. – Vol. 159. – P. L1–L7.

10. ***Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A.*** Bifurcations in the dynamical system for three-layered magnetic valve // Solid State Phenomena. – 2015. – Vols. 233-234. – P. 431–434.

11. ***Островская Н.В., Скиданов В.А., Юсипова Ю.А.*** Классификация динамических режимов переключения намагниченности в трехслойной ферромагнитной структуре в зависимости от спин-поляризованного тока инжекции и внешнего магнитного поля. I. Продольная анизотропия // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – №4. – Т. 8. – С. 605–620.

12. ***Юсипова Ю.А.*** Анализ характеристик переключения ячеек памяти MRAM на основе материалов с одноосной анизотропией // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №5. – С. 421–432.

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.; после доработки 16.11.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Юсипова Юлия Александровна – инженер кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), инженер-проектировщик отдела проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3), linda_nike@mail.ru

References

1. Nowak J.J., Robertazzi R.P., Sun J.Z. et. al. Dependence of voltage and size on write error rates in spin-transfer torque magnetic random-access memory. *IEEE Magnetics Letters*, 2016, vol. 7, p. 3102604

2. Sutton B., Camsari K.Y., Behin-Aein B., Datta S. Intrinsic optimization using stochastic nanomagnets. *Scientific Reports*, 2017, vol.7, no. 1, pp. 1–9.

3. Behin-Aein B., Diep V., Datta S. A building block for hardware belief networks. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–10.

4. Shim Y., Jaiswal A., Roy K. Ising computation based combinatorial optimization using spin-Hall effect (SHE) induced stochastic magnetization reversal. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, p.193902.

5. Faria R., Camsari K.Y., Datta S. Low barrier nanomagnets as p-bits for spin logic. *IEEE Magnetics Letters*, 2017, vol. 8, p. 2685358.

6. Camsari K.Y., Faria R., Sutton B.M., Datta S. Stochastic p-bits for invertible logic. *Phys. Rev. X*, 2017, vol. 7, no. 3, p. 031014.

7. Zand R., Camsari K.Y., Pyle S.D., Ahmed I., Kim C.H., DeMara R.F. Low-energy deep belief networks using intrinsic sigmoidal spintronic-based probabilistic neurons. *Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI (ACM, 2018)*. 2018, pp. 15–20.

8. You Ch.Y. Spin Torque Nano-Oscillator with an Exchange-Biased Free Rotating Layer. *Journal of Magnetics*, 2009, 14(4), pp. 168–171.

9. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 159, pp. L1–L7.

10. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A. Bifurcations in the dynamical system for three-layered magnetic valve. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 233–234, pp. 431–434

11. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A., Classification of dynamical switching regimes in a three-layered ferromagnetic nanopillar governed by spin-polarized injection current and external magnetic field I – Longitudinal anisotropy. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye = Computer Research and Modeling*, 2016, no. 4, vol. 8, pp. 605–620. (in Russian).

12. Iusipova Iu.A. Comparison of the critical switching characteristics of the basic MRAM cells made of various materials and alloys with uniaxial anisotropy *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 421–432. (in Russian).

Received 16.11.2018; Revised 16.11.2018; Accepted 22.01.2019.

Information about the author:

Iuliia A. Iusipova – Engineer of the General Physics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Design Engineer of the Department of Design of Microelectronic Components for Nanotechnology, Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), linda_nike@mail.ru

Уважаемые авторы!

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

УДК 621.382.32 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур

К.О. Петросянц[1,2], М.Р. Исмаил-Заде[1], Л.М. Самбурский[1,2]

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

kpetrosyants@hse.ru

Компактные модели JFET-транзисторов, используемые в коммерческих версиях SPICE-подобных программ, ориентированы только на стандартный диапазон температур от –60 до +150 °С и не пригодны для расчета электронных схем в диапазоне криогенных температур (ниже –120 °С). В работе представлена Low-T SPICE-модель JFET для расчета схем в расширенном диапазоне температур, в том числе криогенных (от –200 до +110 °С). Модель учитывает изменения ВАХ, обусловленные влиянием сверхнизкой температуры: увеличение напряжения насыщения $V_{D\ sat}$, снижение тока отсечки I_p и крутизны *BETA*, отрицательный наклон *LAMBDA* выходных ВАХ, увеличение сопротивления сток–исток *RD* за счет эффекта «вымораживания» и др. С этой целью в модель дополнительно введены зависимости перечисленных параметров от температуры. Разработана процедура экстракции SPICE-параметров Low-T SPICE-модели JFET согласно результатам измерений стандартного набора ВАХ в диапазоне криогенных температур. Погрешность расчета ВАХ не превышает 10–15 % в диапазоне температур от –200 до +110 °С.

Ключевые слова: низкотемпературная электроника; криогенная температура; JFET-транзисторы; компактные SPICE-модели; SPICE-моделирование; экстракция параметров модели

Для цитирования: Петросянц К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

© К.О. Петросянц, М.Р. Исмаил-Заде, Л.М. Самбурский, 2019

Highlights of JFET I-V Characteristics Simulation in Cryogenic Temperature Range

K.O. Petrosyants[1,2], M.R. Ismail-Zade[1], L.M. Sambursky[1,2]

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

kpetrosyants@hse.ru

Abstract: The JFET compact models used in commercial versions of SPICE-like software tools are oriented only to the standard range of –60 °C…+150 °C and are not suitable for simulation the electronic circuits in the range of cryogenic temperatures (below –120 °C). In the work the JEFT Low-T model, suitable for calculation of circuits in an extended temperature range, including the cryogenic ones (–200…+110 °C) has been developed. The model takes into account the changes in the I-V-characteristics due to the effect of the ultra-low temperature: an increase in the saturation voltage *VDsat*, a decrease in the pinch-off current I_p and the transconductance *BETA*, a negative slope *LAMBDA* on the output I-V-characteristics, an increase in the drain-source resistance *RD* due to the freeze-out effect, etc. For this purpose, the dependencies of the listed parameters on temperature have been additionally introduced. A procedure has been developed for extracting the SPICE-parameters of the JFET Low-T model from the results of measurements of a standard set of I-V-characteristics in the cryogenic temperature range. The error in simulation of the I-V-characteristics does not exceed 10–15% in the –200…+110 °C temperature range.

Keywords: low temperature electronics; cryogenic temperature; JFET transistors; compact SPICE models; SPICE simulation; model parameters extraction

For citation: Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Sambursky L.M. Highlights of JFET I-V characteristics simulation in cryogenic temperature range. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

Введение. Полевой транзистор с управляющим *p–n*-переходом (Junction Field Effect Transistor – JFET) благодаря высоким входному сопротивлению и усилению, низкому уровню собственных шумов и совместимостью с БиКМОП-технологией широко используется во входных и последующих каскадах малошумящих операционных усилителей, компараторов, вторичных источников питания, стабилизаторов и других аналоговых микросхем низкотемпературной электроники [1, 2]. На рис.1 показана типовая структура интегрального [3] и дискретного [4] JFET-транзисторов.

Публикаций, посвященных моделированию JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур, очень мало, и они в основном ориентированы на исследование шумовых характеристик в малосигнальном режиме [5–7]. Работы по моделированию статических ВАХ практически отсутствуют.

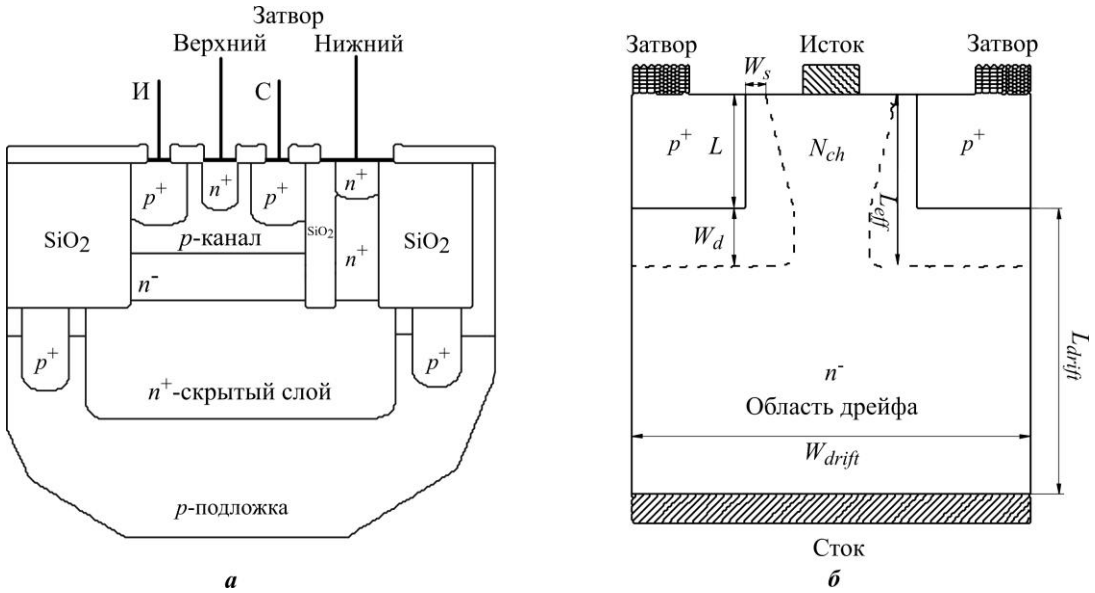


Рис.1. Типовые структуры JFET-транзисторов: *а* – интегральный с горизонтальным *p*-каналом; *б* – дискретный с вертикальным *n*-каналом (L – длина канала, W_{drift} и L_{drift} – ширина и длина области дрейфа, L_{eff} – эффективная длина канала, N_{ch} – концентрация примеси в канале, W_d – ширина области обеднения между затвором и стоком, W_s – ширина области обеднения между затвором и истоком)

Fig.1. Typical structures of JFET transistors: *a* – integrated with a horizontal *p*-channel; *b* – discrete with vertical *n*-channel (L – length of channel, W_{drift} and L_{drift} – width and length of drift region, L_{eff} – effective length of channel, N_{ch} – doping density in channel region, W_d – width of depletion region between gate and drain, W_s – depletion width between gate and source)

Стандартная и модифицированная SPICE-модель JFET. В большинстве программ схемотехнического анализа для описания статических ВАХ JFET-транзисторов с учетом воздействия температуры используются стандартные SPICE-модели JFET уровня 1 (модель Шихмана – Ходжеса [8]) и уровня 3 (модель Статза [9]). Температурная зависимость основных параметров этих моделей описывается встроенными математическими выражениями, которые справедливы для диапазона температур от –100 до +125 °С. Однако при расчетах схем в криогенном температурном диапазоне эти модели дают очень существенную погрешность.

Моделирование тестового *p*-JFET-транзистора проведено с использованием стандартной SPICE-модели JFET уровня 1 (*level* = 1) с имеющимися в ней температурными зависимостями основных параметров модели. В частности, коэффициент *VTOTC* задает зависимость порогового напряжения от температуры, *BETATCE* – зависимость крутизны от температуры.

На рис.2,*а* представлены измеренные и смоделированные с использованием стандартной SPICE-модели JFET уровня 1 выходные характеристики *p*-JFET-транзистора из состава АБМК-1.3 [3], изготовленного ОАО «Интеграл» на кремниевой эпитаксиальной пластине со скрытым слоем ($L_{\min}$ = 1,2 мкм), в диапазоне температур от –200 до +110 °С. На рис.2,*б* приведена зависимость погрешности моделирования выходных ВАХ от температуры. Аналогичные результаты получены при использовании стандартной версии SPICE-модели JFET уровня 3. Таким образом, стандартные SPICE-модели JFET уровня 1 и 3 справедливы лишь в диапазоне низких температур (–110...–120 °С). Их использование для температур ниже этого уровня приводит к большим погрешностям моделирования (см. рис.2,*б*).

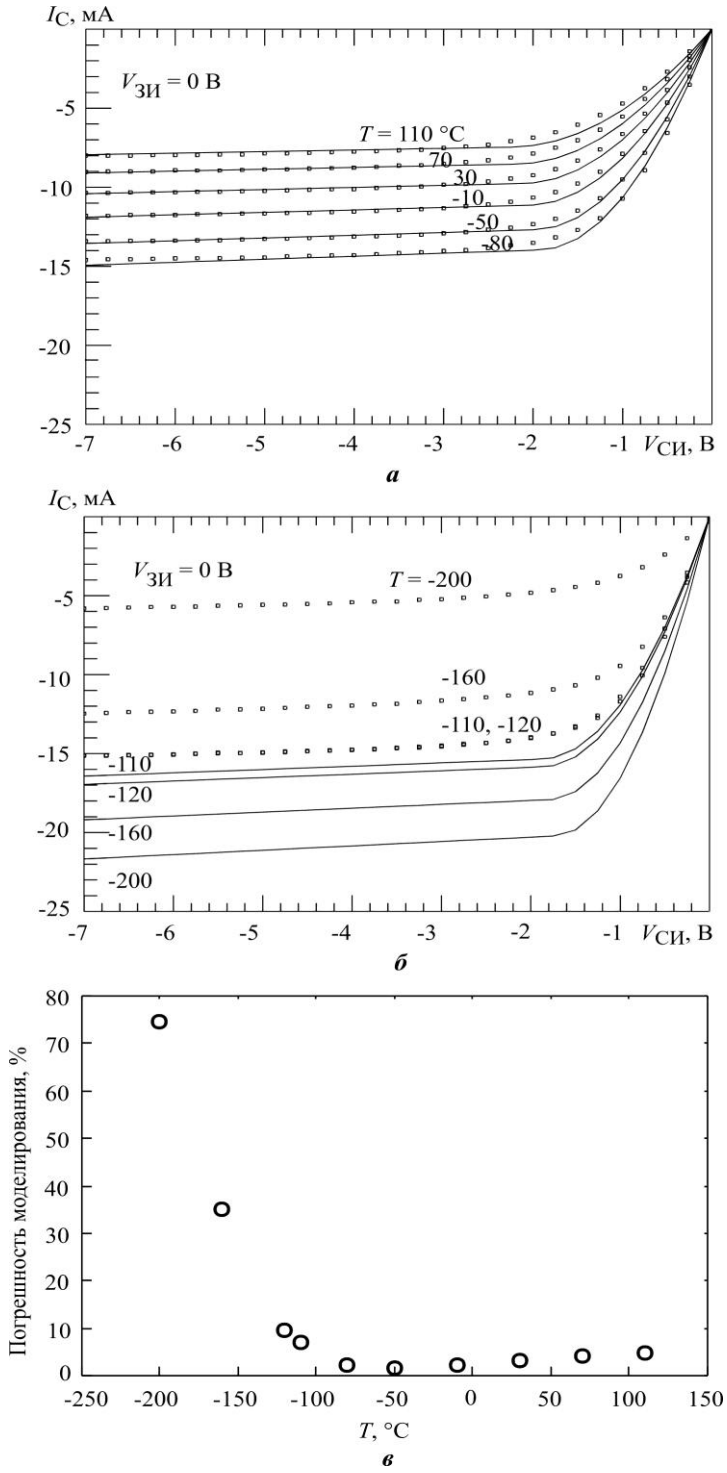


Рис.2. Измеренные (символы) и смоделированные (сплошные линии) выходные ВАХ JFET-транзистора в диапазоне температур от –200 до +110 °С с использованием стандартной модели уровня 1 (*а*, *б*) и зависимость погрешности моделирования от температуры (*в*)

Fig.2. Comparison of measured and simulated output I-V characteristics of JFET in the temperature range –200...+110 °C using the standard model level 1 (symbols – measurements, lines – simulation) (*a*, *b*); dependence of simulation error of JFET output I-V-characteristics vs. temperature (*c*)

В работах [10, 11] описана модифицированная версия SPICE-модели JFET Шихмана – Ходжеса для расчетов в диапазоне сверхнизких температур. В описание модели дополнительно введена эмпирическая функция, учитывающая зависимость крутизны *BETA* от температуры. Предложенная модель обеспечивает достаточную для практических расчетов точность (погрешность менее 10 %) в диапазоне температур до –200 °С для JFET-транзисторов, в которых не проявляется эффект саморазогрева (рис.3). Температурные зависимости параметров *VTO* и *BETA* приведены на рис.4.

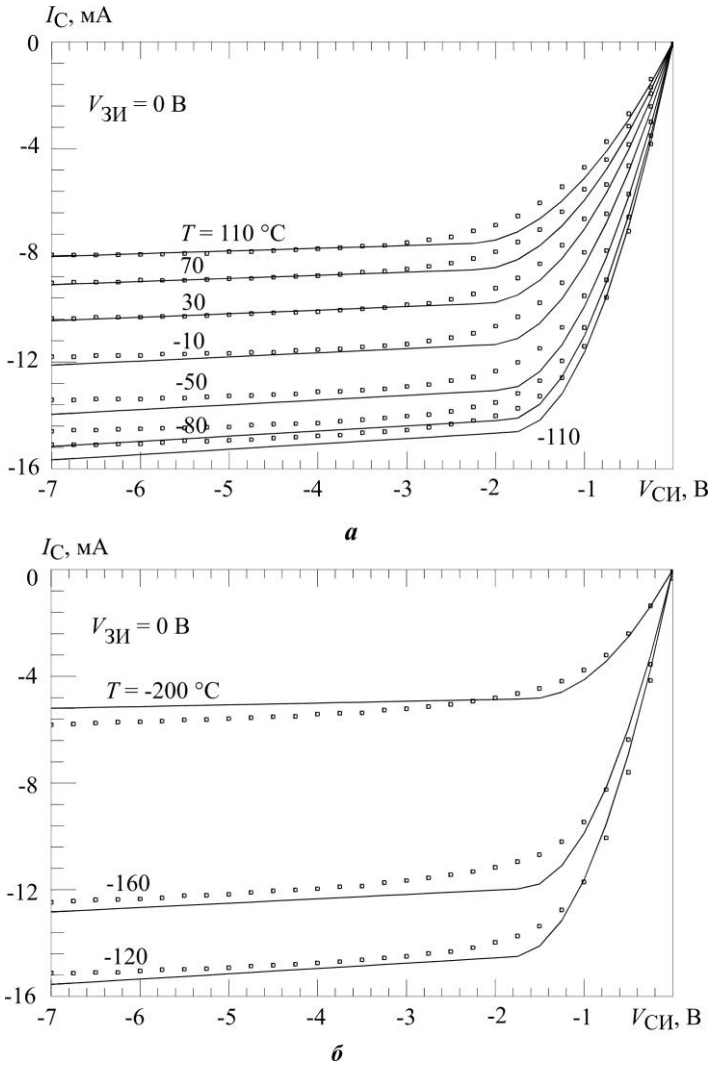


Рис.3. Измеренные [10] (символы) и смоделированные (сплошные линии) выходные ВАХ *p*-JFET-транзистора из состава АБМК-1.3 с L_{min} = 1,2 мкм в разных диапазонах температур: от –110 до +110 °С (*а*); от –120 до –200 °С (*б*)

Fig.3. Measured and simulated output I-V-characteristics of p-JFET from analog sea of gates ABMK-1.3 with L_{min} = 1.2 μm in the temperature range –110…+110 °C (*a*) and –120…–200 °C (*b*) (symbols – measurements [10], lines – simulation)

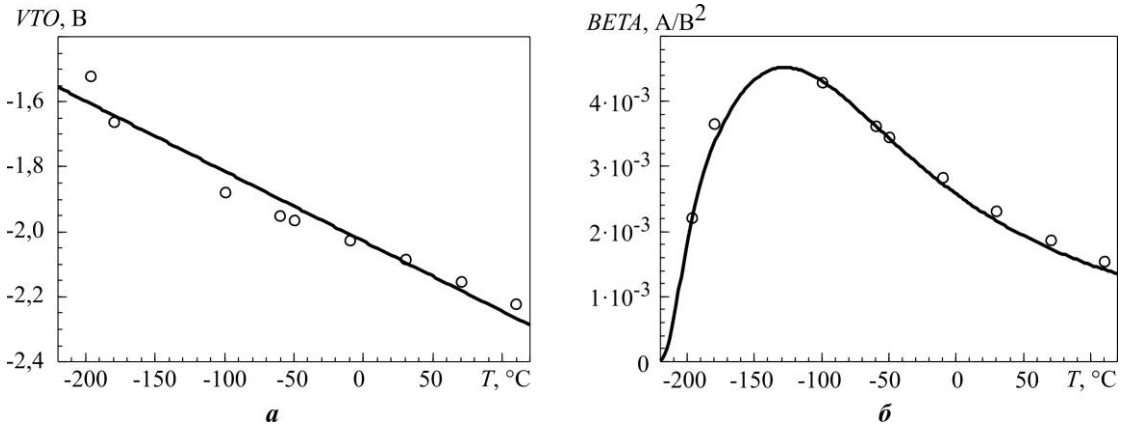


Рис.4. Зависимости порогового напряжения *VTO* (*а*) и крутизны *BETA* (*б*) SPICE-модели *p*-JFET от температуры (символы – вычисления по измеренным данным, сплошные линии – аппроксимация)
Fig.4. Dependence of *p*-JFET model parameters in the temperature range down to –200°C: *a* – threshold voltage *VTO*; *b* – transconductance *BETA* (symbols – calculations based on measured data, solid lines – approximation)

Анализ экспериментальных работ показывает, что при температурах ниже –173 °С (100 К) для ряда JFET-транзисторов поведение ВАХ существенным образом отличается от обычного. С понижением температуры от 150 до 100 К крутизна и ток стока возрастают, что обусловлено главным образом увеличением подвижности носителей в канале при низких температурах [12]. При дальнейшем понижении температуры от 70 до 40 К наблюдается следующее: увеличивается напряжение насыщения $V_{D\ sat}$; снижается ток отсечки I_p, что приводит к уменьшению крутизны и может быть вызвано эффектом вымораживания носителей, который маскирует эффект изменения подвижности с температурой [13]; в некоторых типах JFET-транзисторов наблюдается эффект саморазогрева, вследствие чего область насыщения выходных характеристик имеет отрицательный коэффициент наклона (рис.5) [14]. Для таких приборов предложенная в [10, 11] SPICE-модель JFET для сверхнизкой температуры оказывается непригодной.

Модель Si JFET с учетом низкой температуры. В SPICE-программах-симуляторах модель Шихмана – Ходжеса является стандартной SPICE-моделью JFET уровня 1 (*level* = 1), статические ВАХ которой описываются следующими выражениями [15]:

$$I_C = \begin{cases} 0 \ \text{ при } V_{\text{ЗИ}} - VTO \le 0 \text{ (область отсечки)}, \\ BETA(V_{\text{ЗИ}} - VTO)^2 (1 + LAMBDA \cdot V_{\text{СИ}}) \\ \text{при } 0 < V_{\text{ЗИ}} - VTO \le V_{\text{СИ}} \text{ (область насыщения)}, \\ BETA \cdot V_{\text{СИ}} [2(V_{\text{ЗИ}} - VTO) - V_{\text{СИ}}](1 + LAMBDA \cdot V_{\text{СИ}}) \\ \text{при } 0 < V_{\text{СИ}} < V_{\text{ЗИ}} - VTO \text{ (линейная область)}, \end{cases} \quad (1)$$

где *VTO* – пороговое напряжение; *BETA* – крутизна; *LAMBDA* – коэффициент модуляции длины канала.

Модель является простой для вычислений и подходит для транзисторов, в которых не проявляется эффект саморазогрева. Модель уровня 1 неадекватно учитывает переходной участок между крутой и пологой областью ВАХ. Для адекватного учета особенностей поведения ВАХ ряда JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур предлагается более точная модель на основе стандартной SPICE-модели JFET уровня 3 (*level* = 3) [9]. В данной модели зависимость тока стока от приложенных напряжений на затворе и стоке имеет вид

$$I_{\text{С}} = BETA\left(V_{\text{ЗИ}} - VTO - GAMMA \cdot V_{\text{СИ}}\right)^{VGEXP}\left(1 + LAMBDA \cdot V_{\text{СИ}}\right) \times \times \left[1 - \left(1 - ALPHA\frac{V_{\text{СИ}}}{3}\right)^3\right], \quad (2)$$

где *GAMMA* – коэффициент снижения порогового напряжения; *VGEXP* – показатель степени напряжения затвора; *ALPHA* – коэффициент насыщения.

По сравнению с другими данная модель учитывает отрицательный наклон на выходных характеристиках в области насыщения, а также нелинейное изменение сопротивления стока, возникающее вследствие низкотемпературных эффектов при температуре ниже 100 К. Температурно-зависимыми в диапазоне температур от 100 до 40 К являются параметры модели, отвечающие за пороговое напряжение *VTO*, крутизну *BETA*, модуляцию длины канала *LAMBDA*, коэффициент насыщения *ALPHA* и сопротивление стока *RD*. При изменении температуры от 300 до 40 К параметры *VTO*, *BETA* и *ALPHA* меняются в соответствии с полиномиальными функциями вида

$$p(T) = p_0 + p_1 \times \Delta T + \ldots + p_n \times \Delta T^n. \quad (3)$$

В выражении (3) для параметра *VTO* степень многочлена равна 2, для параметров *ALPHA* и *BETA* степени многочленов равны 3.

Для учета особенностей поведения *LAMBDA* и *RD* при низких температурах в модель введены новые аналитические зависимости, которые дают гораздо меньшую погрешность в низкотемпературном диапазоне, чем зависимости, применяемые ранее:

$$LAMBDA(T) = \frac{LAMBDA(T_{nom})}{a_0 + a_1\Delta T + \ldots + a_2\left(\Delta T\right)^2}, \quad (4)$$

$$RD\left(T\right) = RD\left(T_{nom}\right) + b_0 + b_1\left(\frac{T_{nom}}{T}\right) + b_2\left(\frac{T_{nom}}{T}\right)^2, \quad (5)$$

где $p_0,\ldots,p_n$; $a_0,\ldots,a_2$; $b_0,\ldots,b_2$ – подгоночные коэффициенты; T – температура, К; T_{nom} – нормальная температура, К. Встроенные температурные коэффициенты базовой модели должны быть обнулены.

Возможности модели по точности описания ВАХ в диапазоне температур от 300 до 40 К проиллюстрированы на рис.5 для симметричного Si *n*-JFET-транзистора с *W/L*=10/10 мкм, изготовленного по планарно-эпитаксиальной технологии с напряжением питания 25 В [14]. Погрешность моделирования ВАХ составляет не более 10 %.

Экстракция параметров SPICE-модели JFET для диапазона криогенных температур. Для определения набора параметров разработанной SPICE-модели JFET в расширенном диапазоне температур используется промышленный пакет экстракции параметров SPICE-моделей IC-CAP. Исходными данными являются наборы ВАХ JFET-приборов, полученные в результате измерения или приборно-технологического моделирования при различных значениях температуры и передаваемые в IC-CAP с помощью собственного программного интерфейса [10].

Процедура экстракции позволяет получить набор параметров модели для любых промежуточных значений температуры и включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Определяется полный набор параметров SPICE-модели JFET (*level* = 3) на основе данных измерений, полученных при комнатной температуре. Используемый при этом метод идентификации параметров включает в себя сочетание аналитических и оптимизационных процедур.

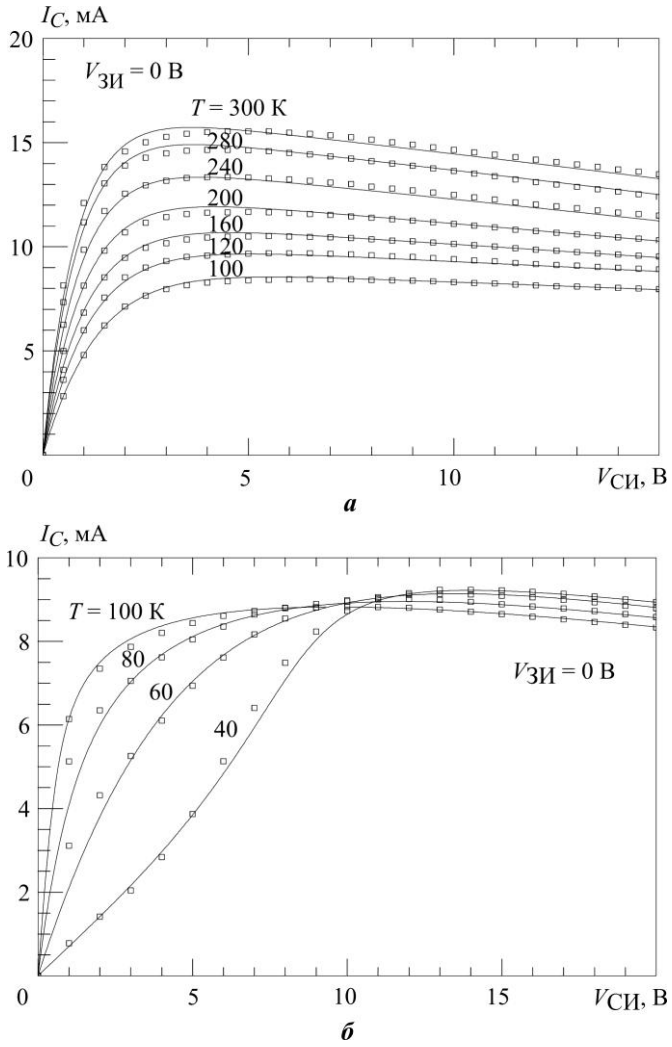


Рис.5. Выходные ВАХ Si *n*-JFET-транзистора с *W*/*L*=10/10 мкм в разном диапазоне температур: *а* – от 100 до 300 К; *б* – от 40 до 100 К (символы – измерения [14], сплошные линии – моделирование)

Fig.5. Output *I*-*V* characteristics of Si *n*-JFET with *W*/*L* = 10/10 μm in the temperature range 100...300 K (*a*) and 40...100 K (*b*) (symbols – measurements [14], lines – simulation)

Шаг 2. Из полного набора параметров выбирается перечень основных температурно-зависимых параметров: *VTO, BETA, LAMBDA, ALPHA, RD*.

Шаг 3. Для каждого значения температуры T_i на основании результатов измерений определяются соответствующие значения выбранных параметров $\{VTO, BETA, LAMBDA, ALPHA, RD\}_i$. Данная процедура повторяется для всех запланированных дискретных значений температуры T_i: $i = 1,\ldots,n$.

Шаг 4. Полученные на шаге 3 табличные зависимости параметров модели от температуры аппроксимируются аналитическими функциями вида (3)–(5). Коэффициенты таких функций составляют набор дополнительных температурных параметров SPICE-модели JFET. Точная подстройка значений температурных параметров проводится с использованием глобальной оптимизации, т.е. по всем имеющимся экспериментальным характеристикам. Примеры температурных зависимостей параметров *VTO, LAMBDA, ALPHA, RD* приведены на рис.6.

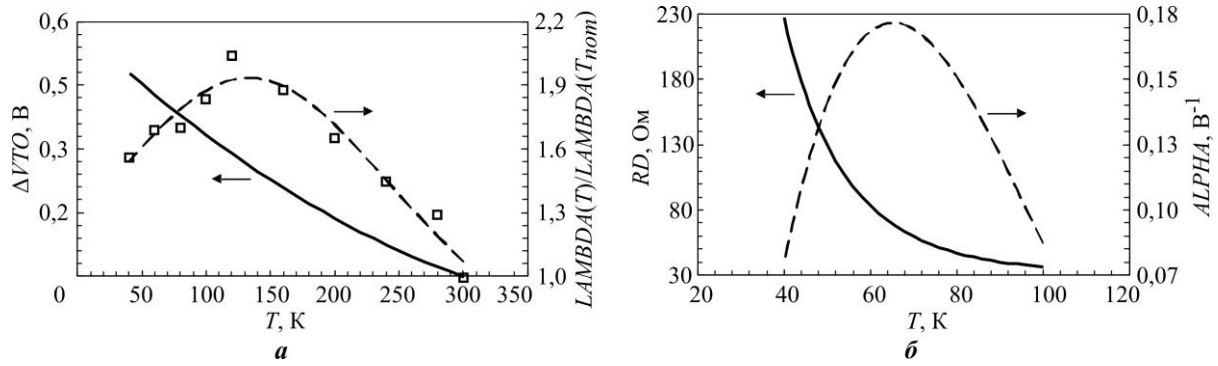


Рис.6. Зависимости относительного изменения *LAMBDA*, абсолютного сдвига порогового напряжения *VTO* (*а*) и параметров *RD* и *ALPHA* (*б*) SPICE-модели Si JFET от температуры (символы – вычисления по измеренным данным [14], сплошные линии – аппроксимация)

Fig.6. Temperature-induced shifts of Si JFET model parameters in the temperature range down to 40 K: *a* – the relative change in *LAMBDA* and the absolute shift of the threshold voltage *VTO*; *b* – the dependence of the parameters *RD* and *ALPHA* in the range T = 100 ... 40 K (symbols – calculations based on measured data [14], solid lines – approximation)

Шаг 5. Аналитические выражения для параметров (см. рис.6), полученные на шаге 4, вместе с коэффициентами встраиваются в описание SPICE-модели JFET.

Заключение. На основе стандартной SPICE-модели JFET уровня 3 разработана ее версия Low-T для криогенных температур в диапазоне от –200 до +110 °C для расчета приборов с различной физической структурой. Модель учитывает изменения ВАХ, обусловленные влиянием сверхнизкой температуры: увеличение напряжения насыщения $V_{D\,sat}$, снижение тока отсечки I_p и крутизны *BETA*, отрицательный наклон выходных ВАХ. Учет этих эффектов осуществлен за счет введения в уравнения стандартной модели дополнительных аналитических выражений для описания температурно-зависимых параметров. Погрешность расчета ВАХ не превышает 10–15 % в диапазоне температур от –200 до +110 °C.

Разработанная процедура экстракции SPICE-параметров Low-T SPICE-модели JFET согласно результатам измерений ВАХ позволяет получить набор параметров в диапазоне криогенных температур.

Low-T SPICE-модель JFET включена в библиотеки моделей коммерческих версий SPICE-подобных программ: HSPICE, LTSPICE, ELDO, SPECTRE и др.

Литература

1. ***Cressler J.D., Mantooth H.A.*** (Eds.). Extreme environment electronics. – CRC Press, 2017. – 976 p.

2. ***Patterson R.L.*** Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions // Cryogenics. – 2006. – Vol. 46. – N. 2–3. – P. 231–236.

3. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники / ***Н.Н. Прокопенко, С.Г. Крутчинский, Е.И. Старченко и др.*** – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 479 с.

4. ***Kostopoulos K., Bucher M., Kayambaki M., Zekentes K.*** A compact model for silicon carbide JFET // Proc. of the 2nd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET'12). – 2012. – P. 1–4.

5. Design and performance of a modular low-radioactivity readout system for cryogenic detectors in the CDMS experiment / ***Akerib D.S., P.D. Barnes, P.L. Brink et al.*** // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2008. – Vol. 591. – N. 3. – P. 476–489.

6. Cryogenic performance of a low-noise JFET-CMOS preamplifier for HPGe detectors / ***A. Pullia, F. Zocca, S. Riboldi et al.*** // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2010. – Vol. 57(2). – P. 737–742.

7. ***Arnaboldi C., Fascilla A., Lund M.W., Pessina G.*** Temperature characterization of deep and shallow defect centers of low noise silicon JFETs // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2004. – Vol. 517. – N. 1–3.– P. 313–336.

8. ***Shichman H., Hodges D.A.*** Modeling and simulation of insulatedgate field-effect transistor switching circuits // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1968. – Vol. 3. – N. 3. – P. 285–289.

9. GaAs FET Device and Circuit Simulatin in Spice / ***H. Statz, P. Newman, I. Smith et al.*** // IEEE Trans. Electron Devices. – 1987. – Vol. ED-34. – P. 160–169.

10. Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the −200…+110°C temperature range/ ***K.O. Petrosyants, M.R. Ismail-zade, L.M. Sambursky et al.*** // Proc. of Electronic and Networking Technologies (MWENT) / IEEE. – Moscow, 2018. – P. 1–5.

11. The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors. / ***Dvornikov O. V., Dziatlau V. L., Prokopenko et al.*** // In Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on / IEEE. – 2017. – P. 1–6.

12. ***Sze S.M.*** Physics of semiconductor devices. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1981. – 868 p.

13. ***Gutierrez-D E.A., Dean J., Claeys C.*** (Eds.). Low temperature electronics: physics, devices, circuits, and applications. – Academic Press, 2000. – 964 p.

14. ***Sreelakshmi K., Satyam M.*** Estimation of low temperature characteristics of JFETs from their room-temperature characteristics // Cryogenics. – 1996. – Vol. 36. – N. 5. – P. 325–331.

15. ***Antognetti P., Massobrio G.*** Semiconductor device modeling with SPICE. – Second Edition. – McGraw-Hill, Inc., 1993. – 479 p.

Поступила в редакцию 27.11.2018 г., после доработки 27.11.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Петросянц Константин Орестович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллинская ул., д. 34), главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3), kpetrosyants@hse.ru

Исмаил-Заде Мамед Рашидович – аспирант департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллинская ул., д. 34), mismailzade@hse.ru

Самбурский Лев Михайлович – кандидат технических наук, доцент департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 123458, г. Москва, Таллинская ул., д. 34), научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3), lsambursky@hse.ru

References

1. Cressler J. D., Mantooth H. A. (ed.). *Extreme environment electronics*. CRC Press, 2017. 976 p.

2. Patterson R.L. Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 2–3, pp. 231–236.

3. Prokopenko N.N., Krutchinsky S.G., Starchenko E.I. et al. *Developments Catalog of the Russian-Belarusian center of analog microcircuitry.* Shakhty, SRSUES Publ., 2010. 479 p. (in Russian).

4. Kostopoulos K., Bucher M., Kayambaki M., Zekentes K. A Compact model for silicon carbide JFET. *Proc. of the 2nd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET'12)*, 2012, pp. 1–4.

5. Akerib D.S., Barnes P.D., Brink P.L. et al. Design and performance of a modular low-radioactivity readout system for cryogenic detectors in the CDMS experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, vol. 591, no. 3, pp. 476–489.

6. Pullia A., Zocca F., Riboldi S., Budjas D., D'Andragora A., Cattadori C. Cryogenic performance of a low-noise JFET-CMOS preamplifier for HPGe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, vol. 57(2), pp. 737–742.

7. Arnaboldi C., Fascilla A., Lund M. W., Pessina G. Temperature characterization of deep and shallow defect centers of low noise silicon JFETs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, vol. 517, no. 1–3, pp. 313–336.

8. Shichman H., Hodges D. A. Modeling and simulation of insulatedgate field-effect transistor switching circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1968, vol. 3, no. 3, pp. 285–289.

9. Statz H., Newman P., Smith I., Pucel R., Haus H. GaAs FET device and circuit simulatin in spice. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1987, vol. ED-34, pp. 160–169.

10. Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L M., Dvornikov O.V., Lvov B.G., Kharitonov I. A. Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the −200…+110°C temperature range. *Proc. of Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow Workshop on 2018. IEEE*. Moscow, 2018, pp. 1–5.

11. Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosyants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors. *In Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. IEEE*, 2017, pp. 1–6.

12. Sze S.M. *Physics of semiconductor devices*. New York, J. Whiley and Sons, 1981. 868 p.

13. Gutierrez-D E.A., Deen J., Claeys C. *Low temperature electronics: physics, devices, circuits, and applications*. Academic Press, 2000. 964 p.

14. Sreelakshmi K., Satyam M. Estimation of low temperature characteristics of JFETs from their room-temperature characteristics. *Cryogenics*, 1996, vol. 36, no. 5, pp. 325–331.

15. Antognetti P., Massobrio G. *Semiconductor device modeling with SPICE*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1993. 479 p.

Received 27.11.2018; Revised 27.11.2018; Accepted 22.01.2019.

Information about the authors:

Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya str. 34), Chief Scientist of the Institute for Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st. 3), kpetrosyants@hse.ru

Mamed R. Ismail-Zade – PhD student of the Electronic Engineering Department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya st. 34), mismailzade@hse.ru

Lev M. Sambursky – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electronic Engineering Department of the Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya str. 34), Research Scientist, Institute for Design Problems of Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st. 3), lsambursky@hse.ru

УДК 621.3.038 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-185-196

Синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров

Д.В. Озеркин[1], В.В. Бабешко[2]

[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
[2]АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск, Россия

ozerkin.denis@yandex.ru

Процесс проектирования бортовой космической радиоаппаратуры обязательно включает этап схемотехнического моделирования электронной части аппаратуры. При этом возникает проблема разработки математических моделей электронной компонентной базы специального применения, адекватно описывающих поведение прототипов в широком температурном диапазоне. В работе представлена методология синтеза математической модели твердотельного МОП-реле 249КП4АТ отечественного производства для последующего SPICE-моделирования. Для достижения поставленной цели решалось несколько задач: получение экспериментальных зависимостей параметров; разработка обобщенной математической модели МОП-реле; экстракция измеренных экспериментальных параметров и их преобразование в параметры SPICE-модели; тестовое испытание разработанной SPICE-модели. Для исследования отобрана партия из пяти однотипных твердотельных МОП-реле. Показано, что образцы твердотельных МОП-реле одной партии поставки отличаются технологическим разбросом параметров. Предложена оригинальная методология синтеза твердотельных МОП-реле, основанная на измерении электрических параметров образцов при разных температурах. Результаты измерения в конечном итоге преобразуются во множество, состоящее из 16 параметров в каждом канале. При этом синтез аналогичных твердотельных МОП-реле из семейства 249КП4 заключается в нахождении числовых значений этого множества. Апробация разработанной методологии осуществлена в процессе тестирования SPICE-модели в среде Cadence OrCAD. В ходе тестового моделирования установлено, что относительная погрешность в расчете характерных точек имитационным способом составляет не более 7 % по сравнению с измерениями в физическом эксперименте.

***Ключевые слова*:** бортовая космическая радиоэлектронная аппаратура; твердотельное МОП-реле; температурная стабильность; температурная зависимость выходного сопротивления; квадратичная аппроксимация; SPICE-модель; Cadence OrCAD

***Для цитирования*:** Озеркин Д.В., Бабешко В.В. Синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 185–196. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-185-196

© Д.В. Озеркин, В.В. Бабешко, 2019

Synthesis of 249KP4AT MOS-Relay SPICE-Model with the Temperature Dependence of Parameters

D.V. Ozerkin[1], V.V. Babeshko[2]

[1]Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russia
[2]JSC «Polyus» Research and Production Center, Tomsk, Russia

ozerkin.denis@yandex.ru

Abstract: The process of designing the board space equipment includes the stage of circuit simulation of the electronic part of the equipment. In this case there is a problem in the development of mathematical models of the electronic component base in special applications, which adequately describe the behavior of the prototypes in a wide temperature range. In the work the methodology of synthesizing the mathematical model of the domestic-produced solid state MOS-relay 249KP4AT for further SPICE modeling has been developed. To achieve this goal, several tasks, such as obtaining the experimental dependencies of parameters; the development of a generalized mathematical model of the MOS relay; the extraction of the measured experimental parameters and its conversion into the parameters of the SPICE model and testing the SPICE-model have been solved. For the study a batch of five of the same type solid-state MOS relays, produced by JSC «Proton» has been selected. It has been shown that the samples of solid-state MOS relays of the same batch of delivery are distinguished by the technological variation of the parameters. The measurement results ultimately are converted into a set of 16 parameters in each channel. In this case, the synthesis of similar solid-state MOS relays from the 249KP4 family consists in finding the numerical values of this set. The testing of the developed methodology has been carried out in the form of testing a SPICE model in the Cadence OrCad environment. During the test simulation it has been found that the relative error in the calculation of the characteristic points by the imitation method does not exceed 7% compared with the measurement in a physical experiment.

Keywords: board radio-equipment; solid-state MOS relay; temperature stability; current-voltage characteristic; temperature dependence of output resistance; quadratic approximation; SPICE model; Cadence OrCAD

For citation: Ozerkin D.V., Babeshko V.V. Synthesis of 249KP4AT MOS-relay SPICE-model with the temperature dependence of parameters. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 185–196. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-185-196

Введение. Современный процесс проектирования бортовой космической радиоаппаратуры (БКРА) обязательно включает этап схемотехнического моделирования электронной части БКРА. При этом используются распространенные средства моделирования – программные комплексы, включающие SPICE-симулятор [1–3]. Важным дополнительным условием при синтезе SPICE-моделей часто является учет температурной зависимости параметров электрорадиоизделий, поскольку условия эксплуатации БКРА колеблются в широком температурном диапазоне (от –60 до 125 °С).

Вопросы применения твердотельных реле в интегральном исполнении для БКРА находят отражение в отечественной и зарубежной печати [4–11]. Анализ публикаций показал следующее. Индустрия производства твердотельных реле стремительно развивается, однако методологические основы синтеза адекватных математических моделей твердотельных реле, пригодных для схемотехнического моделирования на ранних этапах проектирования БКРА, пока проработаны недостаточно.

Цель настоящей работы – синтез SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ с учетом температурной зависимости параметров, пригодной для схемотехнического моделирования электронных средств БКРА. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи [12]: получение экспериментальных зависимостей параметров для образцов прототипов МОП-реле; разработка обобщенной математической модели МОП-реле; экстракция измеренных экспериментальных параметров и их преобразование в параметры SPICE-модели; тестовое испытание разработанной SPICE-модели.

Методология синтеза SPICE-модели интегральной микросхемы с термозависимыми параметрами. В номенклатуре электрорадиоизделий, применяемой в отечественных разработках БКРА, распространено МОП-реле 249КП4АТ [13]. Для исследования отобрана партия из пяти однотипных твердотельных сдвоенных герметичных МОП-реле 249КП4АТ производства АО «Протон» (г. Орёл) [14], изготовленных по АЕЯР.431160 ТУ. Для получения экспериментальных зависимостей параметров использовалась измерительная установка, состоящая из двух основных частей: комплекса для температурных испытаний электрорадиоизделий Thermostream TP04310A [15] и тестера полупроводниковых приборов Formula TT [16].

На координатных плоскостях (рис.1,*а–в*) представлены экспериментальные входные ВАХ при температуре окружающей среды, равной –60, 25 и 125°С. Поскольку

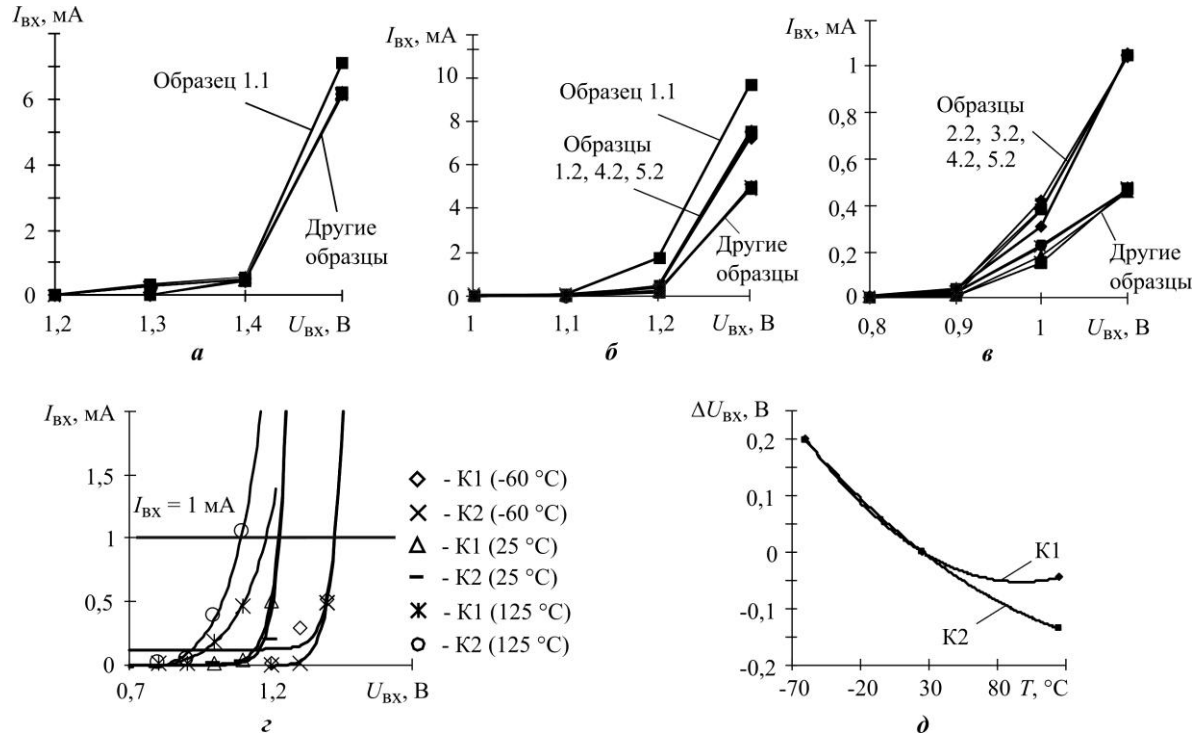


Рис.1. Входные ВАХ при T = –60 °С (*а*), 25 °С (*б*), 125 °С (*в*), усредненные значения отсчетов ВАХ (*г*) и температурная зависимость входного напряжения (*д*)
Fig.1. Input *I–V* curve at T = –60 °C (*a*), 25 °C (*b*), 125 °C (*c*), the averaged values of the *I–V* indications (*d*) and the temperature dependence of the input voltage (*e*)

микросхема 249КП4АТ имеет два независимых канала, то для пяти исследуемых образцов в общей сложности выполнено десять измерений. Конкретная экспериментальная характеристика обозначается на графиках по типу «Образец *x.y*», где *x* – номер образца; *y* – номер канала. Координатная плоскость на рис. 1, *г* демонстрирует усредненные значения отсчетов ВАХ отдельно для каждого канала (К1 и К2) для определенных температур. Усредненные значения входного тока аппроксимированы экспоненциальной зависимостью вида $a1 \cdot \exp(a2) + a3$.

Температурная зависимость входного напряжения представлена в аддитивном виде (рис.1,*д*). Пусть исходная рабочая точка для каждой ВАХ имеет координаты входного тока $I_{вх} = 1$ мА и температура окружающей среды $T = 25$ °С. Взяты три отсчета температуры: –60, 25, 125 °С. Разность входного напряжения вычисляется как

$$\Delta U_{вхjk} = (U_{вхjk} - U_{вхj0})|_{I_{вх} = 1\ мА},$$

где *j* – номер канала; *k* – номер отсчета температуры.

Полученные значения разности входного напряжения аппроксимированы полиномом второго порядка:

$$\Delta U_{вх} = 1{,}029 \cdot 10^{-5} T^2 - 1{,}993 \cdot 10^{-3} T + 0{,}043 \quad \text{для К1}, \tag{1}$$

$$\Delta U_{вх} = 5{,}113 \cdot 10^{-6} T^2 - 2{,}127 \cdot 10^{-3} T + 0{,}05 \quad \text{для К2}. \tag{2}$$

Температурные зависимости каналов имеют точку пересечения в координате $T_{0j} = 25$ °С, $\Delta U_{вхj0} = 0$ В (см. рис.1,*д*).

Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от температуры окружающей среды показана на рис.2,*а*. Измерения проведены при входном токе $I_{вх} = 1$ мА и токе коммутации $I_{ком} = 30$ мА. Усредненные экспериментальные значения выходного сопротивления нанесены на новую координатную плоскость (рис.2,*б*), а затем проведена аппроксимация полиномом второго порядка:

$$R_{вых} = 3 \cdot 10^{-4} T^2 + 0{,}0834 T + 12{,}368. \tag{3}$$

Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от входного тока измерена при токе коммутации $I_{ком} = 30$ мА (рис.3,*а*). Учитывая свойства семейства характеристик, на рис.3,*б* путем кусочно-линейной аппроксимации построена упрощенная передаточная характеристика выходного сопротивления от входного тока. Частотные характеристики получены с помощью генератора сигналов Agilent 33220A, осциллографа Tektronix TDS2024B, источника питания SPS-606 и измерителя Gwinstek LCR-821.

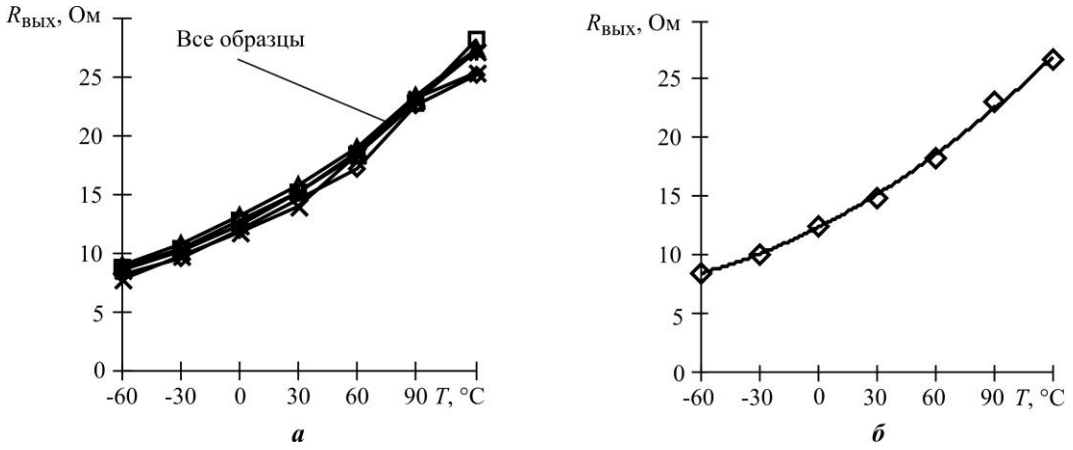


Рис.2. Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от температуры (*а*) и его усредненные экспериментальные значения (*б*)

Fig.2. The dependence of the output resistance in the open state on the temperature (*a*) and its averaged experimental values (*b*)

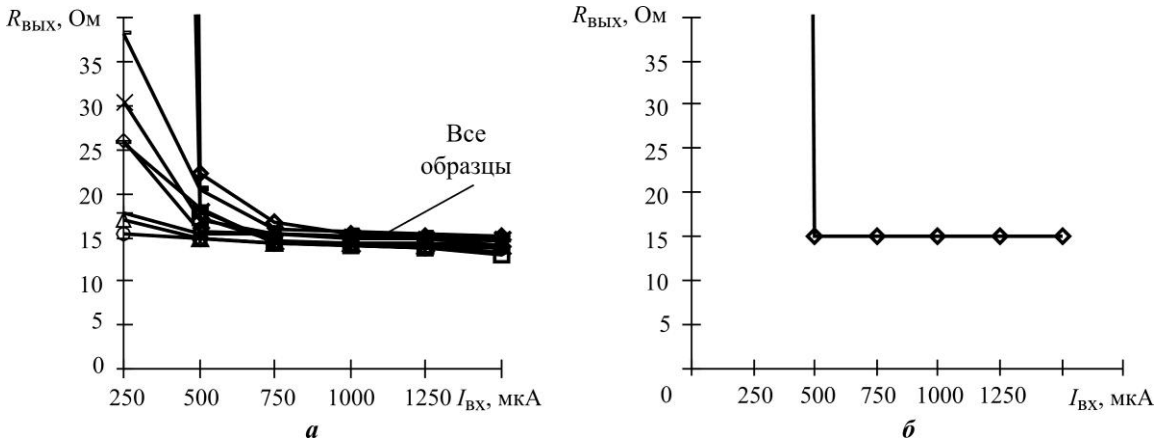


Рис.3. Зависимость выходного сопротивления в открытом состоянии от входного тока (*а*) и аппроксимация этой зависимости (*б*)
Fig.3. Dependence of the output resistance in the open state on the input current (*a*) and approximation (*b*)

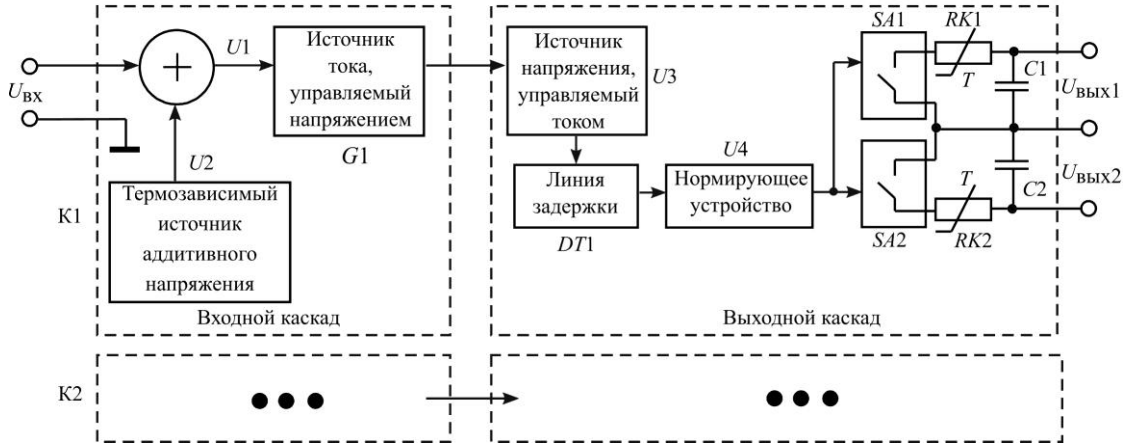


Рис.4. Структуризация модели МОП-реле 249КП4АТ
Fig.4. Structuring the 249KP4AT MOS-relay model

Для синтеза будущей математической модели МОП-реле предлагается структурная схема, состоящая из двух основных блоков: входной каскад и выходной каскад (рис.4). Внутреннее наполнение каскадов соответствует наблюдаемым процессам на предыдущем этапе исследования. Канал К2 на рис. 4 в явном виде не показан, его структурное наполнение полностью идентично каналу К1.

Структурная проработка МОП-реле позволяет предложить компактную математическую модель. Сделаем это для канала К1. Пусть входной ток МОП-реле есть функция двух аргументов – входного напряжения $U_{вх}$ и температуры окружающей среды T:

$$I_{вх} = f_1(U_{вх}, T). \quad (4)$$

Проведем декомпозицию функции (4) путем фиксации температуры на определенном уровне. Тогда получим частную функцию $i_{вх} = f'_1(U_{вх})$, зависящую только от входного напряжения и аппроксимируемую экспоненциальной функцией (см. рис.1,*г*)

$$i_{вх} = f_1(U_{вх}, T)|_{T=25°C} = f'_1(U_{вх}) = a1 \cdot \exp(a2 \cdot U_{вх}) + a3. \quad (5)$$

Аддитивная составляющая нелинейности входной ВАХ $\Delta U_{вх}$, зависящая от температуры окружающей среды, есть разность аргументов функций (4) и (5) при фиксированном значении входного тока $I_{вх}$:

$$\Delta U_{вх} = f_2(T) = f_1(U_{вх}, T)|_{I_{вх}=\text{const}} - f'_1(U_{вх})|_{I_{вх}=\text{const}} = b1\cdot T^2 + b2\cdot T + b3. \quad (6)$$

Суммарный сигнал входного тока $I_{вх}$ есть композиция функций (5) и (6):

$$I_{вх} = a1\cdot\exp\{a2\cdot[U_{вх} - (b1\cdot T^2 + b2\cdot T + b3)]\} + a3. \quad (7)$$

Сопротивление прямой передачи МОП-реле представляет собой ступенчатую функцию, принимающую постоянное значение после достижения порогового значения $I_{пор}$ входным током $I_{вх}$:

$$R_{пр.п} = \begin{cases} \infty, & I_{вх} < I_{пор}; \\ \text{const}, & I_{вх} \ge I_{пор}. \end{cases} \quad (8)$$

Введем дополнительный внутренний параметр для разрабатываемой математической модели – напряжение замыкания ключей $U_{пор}$. Пусть $U_{пор}$ = 1 В. Тогда источник напряжения $U3$, управляемый током, должен иметь передаточную характеристику

$$U3(I_{вх}) = k\cdot I_{вх}, \quad (9)$$

где $k = \dfrac{U_{пор}}{I_{пор}} = \dfrac{1}{I_{пор}}$.

Нормирующее устройство $U4$ ограничивает диапазон управляющих напряжений на входе ключей так, чтобы максимальное значение совпадало с напряжением замыкания ключей:

$$U4 = \begin{cases} U3, & U3 < 1; \\ 1, & U3 \ge 1. \end{cases} \quad (10)$$

Сопротивление ключей $SA1$ и $SA2$, управляемых нормирующим устройством, равно

$$R_{SA1} = R_{SA2} = \begin{cases} R_{выкл}, & U4 < 1; \\ R_{вкл}, & U4 \ge 1, \end{cases} \quad (11)$$

где $R_{выкл}$ и $R_{вкл}$ – сопротивления ключей в разомкнутом и замкнутом состоянии соответственно, причем $R_{выкл} >> R_{вкл}$.

Подставим в (11) сначала (10), а затем (9). В результате получим

$$R_{SA1} = R_{SA2} = \begin{cases} R_{выкл}, & I_{вх} < I_{пор}; \\ R_{вкл}, & I_{вх} \ge I_{пор}. \end{cases} \quad (12)$$

В замкнутом состоянии ключей $SA1$, $SA2$ и при наличии нагрузки на выходах образуются контуры с токами нагрузки $I_{н1}$, $I_{н2}$ и выходным напряжением

$$U_{вых1} = \begin{cases} 0, & I_{вх} < I_{пор}; \\ I_{н1}\left(R_{вкл} + R_{вых1} + R_{н1}\right), & I_{вх} \ge I_{пор}, \end{cases} \quad (13)$$

$$U_{\text{вых2}} = \begin{cases} 0, & I_{\text{вх}} < I_{\text{пор}}; \\ I_{\text{н2}}\left(R_{\text{вкл}} + R_{\text{вых2}} + R_{\text{н2}}\right), & I_{\text{вх}} \geq I_{\text{пор}}, \end{cases} \tag{14}$$

где $R_{\text{вых1}}$, $R_{\text{вых2}}$ – выходные термозависимые сопротивления; $R_{\text{н1}}$, $R_{\text{н2}}$ – активные сопротивления нагрузки.

Величины $R_{\text{вых1}}$, $R_{\text{вых2}}$ – функции от температуры окружающей среды (см. рис.2,*б*) – аппроксимируются полиномами второго порядка:

$$R_{\text{вых1}} = c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3, \tag{15}$$

$$R_{\text{вых2}} = c4 \cdot T^2 + c5 \cdot T + c6. \tag{16}$$

Подставим в формулы для выходного напряжения (13) и (14) выражения (15), (16) и (7). В результате получим окончательные выражения для выходного напряжения для канала К1 по постоянному току:

$$U_{\text{вых1}} = \begin{cases} 0, & I_{\text{пор}} > \left(a1 \cdot \exp\left\{a2\left[U_{\text{вх}} - \left(b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3\right)\right]\right\} + a3\right); \\ I_{\text{н1}} \cdot \left(R_{\text{вкл}} + c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3 + R_{\text{н1}}\right), & \\ & I_{\text{пор}} \leq \left(a1 \cdot \exp\left\{a2\left[U_{\text{вх}} - \left(b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3\right)\right]\right\} + a3\right), \end{cases} \tag{17}$$

$$U_{\text{вых2}} = \begin{cases} 0, & I_{\text{пор}} > \left(a1 \cdot \exp\left\{a2\left[U_{\text{вх}} - \left(b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3\right)\right]\right\} + a3\right); \\ I_{\text{н2}} \cdot \left(R_{\text{вкл}} + c1 \cdot T^2 + c2 \cdot T + c3 + R_{\text{н2}}\right), & \\ & I_{\text{пор}} \leq \left(a1 \cdot \exp\left\{a2\left[U_{\text{вх}} - \left(b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3\right)\right]\right\} + a3\right). \end{cases} \tag{18}$$

Аналогичным образом можно получить выражение $U_{\text{вых3}}$, $U_{\text{вых4}}$ для выходного напряжения для канала К2 по постоянному току.

Частотные характеристики идеальной линии задержки *DT*1 получим с помощью соотношения

$$U_{DT1}(t) = U_{\text{з}}(t - t_{\text{з1}}),$$

где $t_{\text{з1}}$ – среднее время включения-выключения МОП-реле для канала К1.

Полагая воздействие на вход линии задержки гармоническим, запишем его в комплексной форме:

$$\dot{U}_{\text{з}}(t) = \dot{U}_{\text{з}} \cdot e^{j\omega t},$$

где $\dot{U}_{\text{з}} = U_{\text{з}} \cdot e^{j\Phi 1}$ – комплексная амплитуда колебания.

В результате имеем

$$\dot{U}_{DT1}(t) = \dot{U}_{\text{з}} \cdot e^{j\omega(t - t_{\text{з1}})} = \dot{U}_{\text{з}}(t) \cdot e^{-j\omega t_{\text{з1}}}.$$

Отсюда комплексный коэффициент передачи идеальной линии задержки *DT*1 равен

$$\dot{K}_{DT1}(\omega) = \frac{\dot{U}_{DT1}}{\dot{U}_{\text{з}}} = 1 \cdot e^{-j\omega t_{\text{з1}}}, \tag{19}$$

где $\left|\dot{K}_{DT1}(\omega)\right|=1$ – амплитудно-частотная характеристика; $\Phi1(\omega) = -\omega t_{з1}$ – фазочастотная характеристика.

Две симметричные цепи выходного каскада представляют собой интегрирующие звенья, образованные структурами R_{SA1}–$RK1$–$C1$ и R_{SA2}–$RK2$–$C2$. Комплексная передаточная функция выходного напряжения (на примере выхода $U_{вых1}$) имеет вид

$$\dot{K}1(\omega)=\frac{\dot{U}_{вых1}}{\dot{U}_{SA1}}=\frac{1}{\left(1+j\omega\left(R_{SA1}+RK1\right)C1\right)}. \qquad (20)$$

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики принимают вид

$$\left|\dot{K}1\right|=\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}},\quad \Phi2(\omega) = -\text{arctg}(\omega\tau).$$

Аналогичным образом может быть представлена комплексная передаточная функция выходного напряжения $U_{вых2}$.

Многообразие конкретных реализаций математической модели МОП-реле задано множеством **M**, содержащим значения параметров в уравнениях (17)–(20):

$$\mathbf{M}=\left\{a1\quad a2\quad a3\quad b1\quad b2\quad b3\quad I_{пор1}\quad t_{з1}\quad \begin{Bmatrix}c1\\c4\end{Bmatrix}\quad \begin{Bmatrix}c2\\c5\end{Bmatrix}\quad \begin{Bmatrix}c3\\c6\end{Bmatrix}\quad \begin{Bmatrix}C1\\C2\end{Bmatrix}\right\}. \qquad (21)$$

Применение параметрических и/или табличных данных способствует ускорению SPICE-моделирования [17].

На основе структурной схемы (см. рис.4) и с учетом математической модели (17)–(20) разработана макромодель (рис.5) для SPICE-симуляторов [1–3]. Номера внешних выводов макромодели соответствуют номерам выводов прототипа: 2, 7 – катоды излучающих диодов каналов К1 и К2; 3, 6 – аноды излучающих диодов каналов К1 и К2; 14, 9 – вторые выходы каналов К1 и К2; 16, 11 – первые выходы каналов К1 и К2; 15, 10 – общие выходы каналов К1 и К2. Макромодель содержит два идентичных канала по 12 элементов в каждом.

Экстракция параметров прототипа МОП-реле заключается:

- в установлении коэффициентов полиномов первого и второго порядков для функциональных зависимостей входной ВАХ, выходного сопротивления;

- усреднении точечных оценок для статистических величин времени включения-выключения, выходной емкости, зависимости выходного сопротивления от входного тока.

Дальнейшее моделирование происходит в схемотехническом модуле PSPICE AD, входящем в программный комплекс Cadence OrCAD [1]. На поле чертежа в схемном редакторе OrCAD Capture макромодель МОП-реле представлена в виде условного графического обозначения аналоговой микросхемы $DA1$. Ко входам микросхемы в каналы К1 и К2 подключены два импульсных источника напряжения $E1$ и $E2$. Параметры импульсного сигнала заранее не фиксируются, они устанавливаются для каждого вида тестового эксперимента отдельно. Нагрузкой микросхемы служат резисторы $R_{н1} = R_{н2} = 200$ Ом и последовательно соединенные с ними источники синусоидального напряжения $E3$ и $E4$. Основные параметры источников $E3$ и $E4$: амплитуда 10 В, частота 100 кГц.

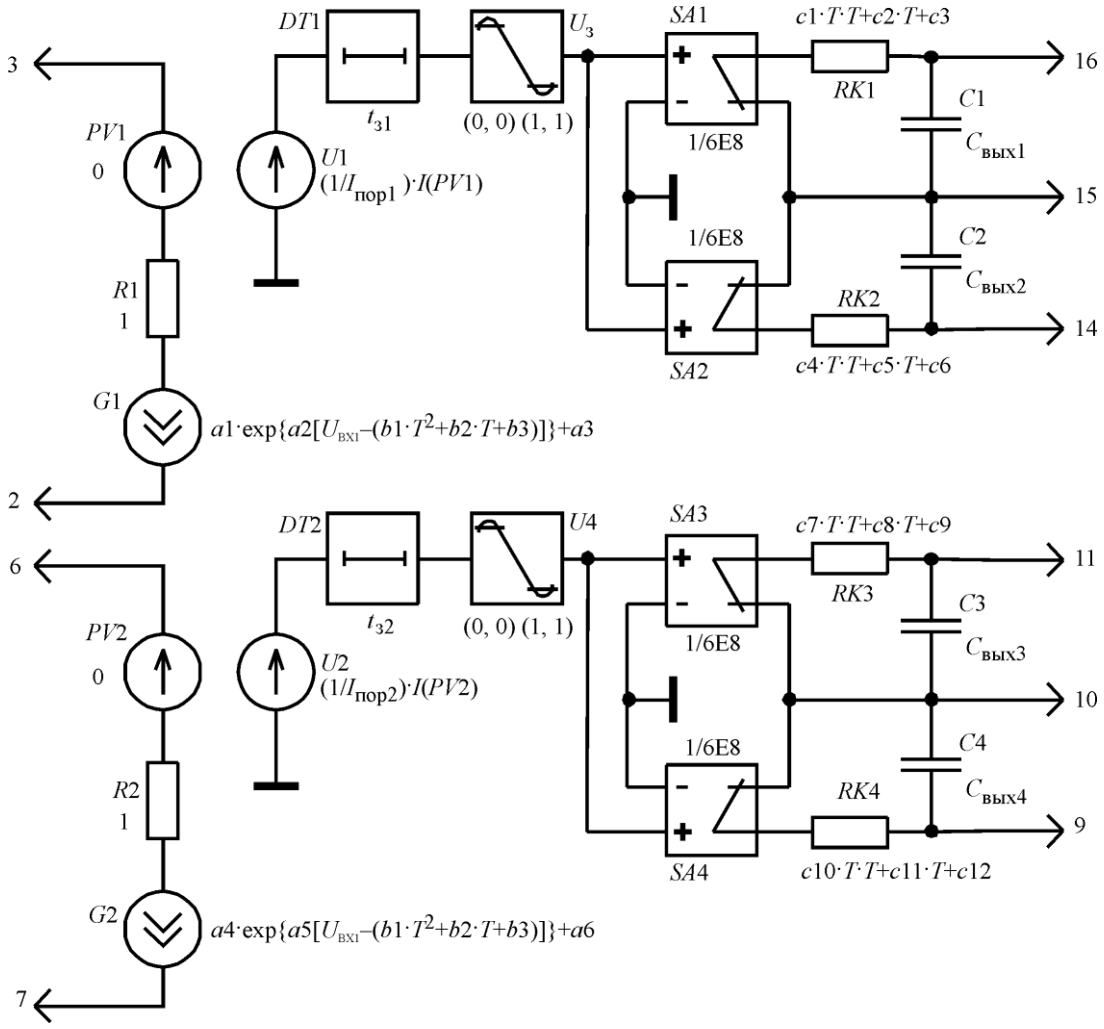


Рис.5. Макромодель МОП-реле 249КП4АТ
Fig.5. Macromodel of 249KP4AT MOS-relay

Сравнительный анализ результатов физического эксперимента проводится путем сопоставления соответствующих функциональных зависимостей с результатами SPICE-моделирования. Для удобства восприятия результаты физического эксперимента и моделирования сведены на общие координатные плоскости: температурная зависимость ухода входного напряжения (рис.6,*а*) и температурная зависимость выходного сопротивления (рис.6,*б*). На графиках результаты моделирования представлены в виде сплошных линий, результаты физического эксперимента показаны в виде маркеров в координатах, соответствующих измеренным значениям. С качественной точки зрения можно видеть хорошее совпадение экспериментальных и имитационных ВАХ. Количественная оценка проведена как вычисление относительной погрешности результатов моделирования по сравнению с физическим экспериментом относительно экспериментальных точек. Максимальное значение относительной погрешности температурной зависимости ухода входного напряжения для К1 равно 6,7 %, для К2 – 4,4 %. Максимальная относительная погрешность температурной зависимости выходного сопротивления равна 5,3 %. Тестирование синтезированной модели МОП-реле проведено в среде OrCAD PSPICE (рис.7).

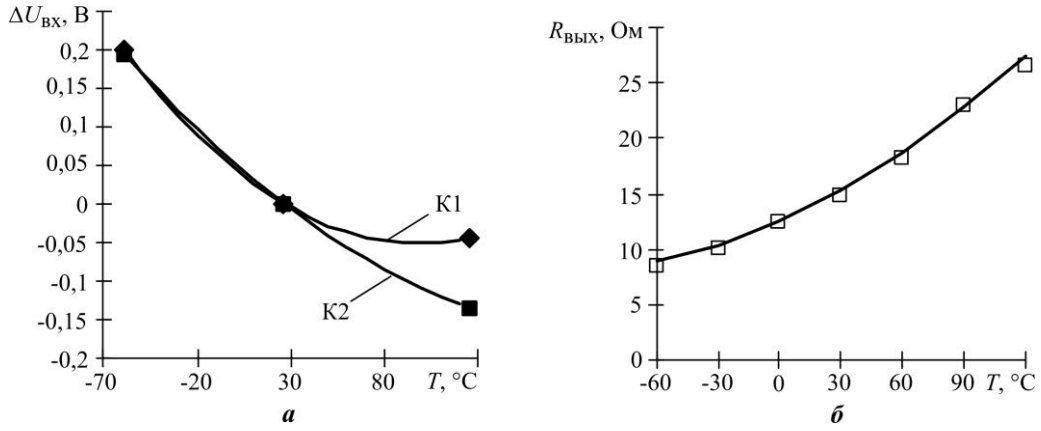


Рис.6. Температурные зависимости ухода входного напряжения (*а*) и выходного сопротивления (*б*)
Fig.6. Temperature dependence of input voltage difference (*a*) and output resistance (*b*)

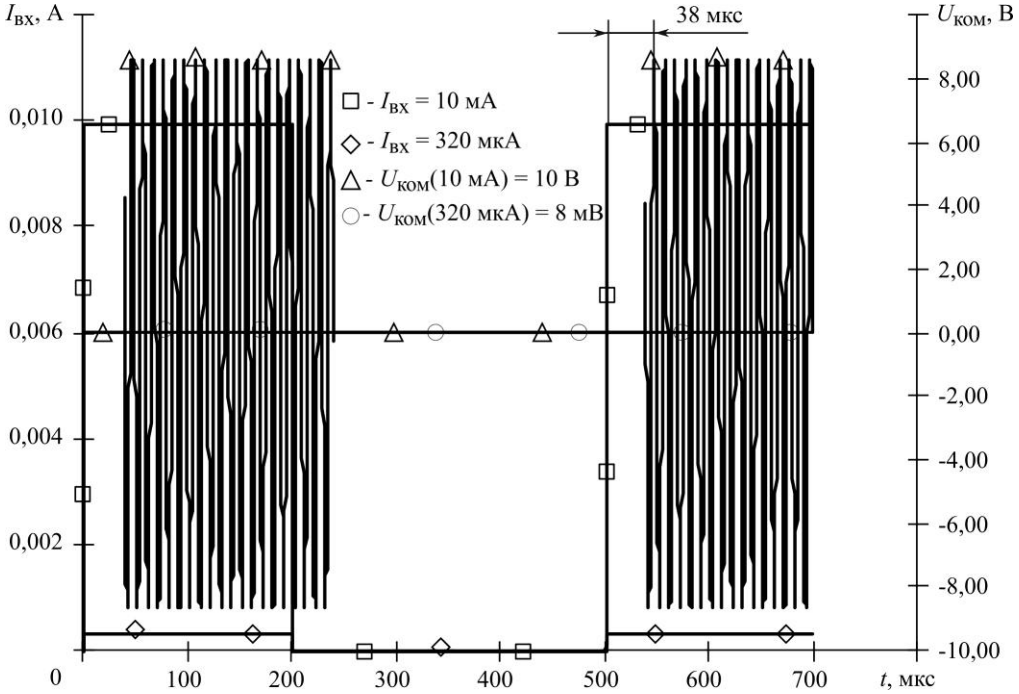


Рис.7. Результаты моделирования во временной области
Fig.7. The simulation results in the time domain

Заключение. Предложенная методология моделирования твердотельных МОП-реле с учетом температурных зависимостей параметров позволяет создавать SPICE-модели конкретных отечественных прототипов. Относительная погрешность моделирования температурных зависимостей входных и выходных характеристик для полученной SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ не превышает 7 % по сравнению с результатами физического эксперимента.

Преимущество предложенной методологии моделирования заключается в параметрическом представлении окончательной математической модели МОП-реле. Следовательно, синтез других подобных моделей твердотельных МОП-реле будет сводиться к нахождению числовых значений для множества (21). Недостатком представленной SPICE-модели МОП-реле 249КП4АТ является точечная оценка частотных и временных характеристик. Это дает совпадение величин в физическом и имитационном эксперименте только в фиксированных точках рабочих режимов.

Литература

1. SPICE Circuit Simulator & Analog Circuit Design // OrCAD Cadence Solutions: сайт. – URL: https://www.orcad.com/products/orcad-pspice-designer/overview (дата обращения: 25.11.2018).

2. Mixed Simulation // PCB Design Software: Innovation For PCB Design: Altium: сайт. – URL: https://www.altium.com/products/extensions/platform-extensions/mixed-simulation (дата обращения: 25.11.2018).

3. Micro-Cap 12 // Spectrum Software – Micro-Cap 12. Analog simulation, mixed mode simulation, and digital simulation: сайт. – URL: http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm (дата обращения: 25.11.2018).

4. ***Хан Джамшед Н.*** Применение герметичных оптронов в военной и космической электронике // Компоненты и технологии. – 2010. – № 6 (107). – С. 82–86.

5. ***Волошин С.*** Твердотельные реле для коммутации цепей постоянного тока // Компоненты и технологии. – 2005. – №7 (51). – С. 138–140.

6. ***Шитиков А.*** Мощные полупроводниковые приборы компании International Rectifier // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1997. – №3–4 (9–10). – С. 43–45.

7. ***Эдгардт А.*** Твердотельные реле компании International Rectifier // Компоненты и технологии. – 2002. – №5 (22). – С. 34–37.

8. ***Исламгазина Л.*** Силовые полупроводниковые приборы ЗАО «Протон-Импульс» // Компоненты и технологии. – 2004. – №8 (43). – С. 74–76.

9. ***Абрамова Н.*** Основные параметры и особенности применения твердотельных реле ЗАО «Протон-Импульс» // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6 (50). – С. 154–162.

10. Влияние электрического режима на уровень радиационной стойкости оптоэлектронного коммутатора 249КП5Р / ***С.А. Авдюшкин, И.А. Максимов, В.В. Иванов и др.*** // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2014. – №3. – С. 19–21.

11. ***Исламгазина Л.*** Применение различных материалов, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. – 2005. – №5. – С. 96–99.

12. ***Озеркин Д.В., Русановский С.А.*** Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 90–97.

13. Микросхемы интегральные. Микросхемы серии К224 .. КР514: справочник / ***Сост. Н.П. Розен.*** – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Электронстандарт, 1993. – 232 с.

14. Оптроны и твердотельные реле // Продукция АО «Протон»: сайт. – URL: http://www.proton-orel.ru/catalog/optrony-i-tverdotelnye-rele/ (дата обращения: 25.11.2018).

15. TP04310A. Mobile Temperature System for Testing Components, Hybrids, Parts, Modules, Subassemblies and Printed Circuit Boards at Precise Temperature // Advanced Test Equipment Rentals: сайт. – URL: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Temptronic-TP04310A_Datasheet.pdf (дата обращения: 26.11.2018).

16. Тестер полупроводников Formula TT3 // Тестеры Formula. Автоматизированные средства измерений электронных компонентов: сайт. – URL: http://form.ru/products/semiconductor/FTT/ (дата обращения: 26.11.2018).

17. ***Бачманов В.А., Заболотнов И.В., Лапин А.В.*** Применение табличных моделей туннельных эффектов для ускорения SPICE-моделирования нанометровых МОП-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №6. – С. 616–624.

Поступила в редакцию 07.12.2018 г.; после доработки 07.12.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Озеркин Денис Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры и кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 40), ozerkin.denis@yandex.ru

Бабешко Владислав Вадимович – измеритель электрических параметров радиодеталей Испытательного технического центра АО «Научно-производственный центр «Полюс» (Россия, 634050, г. Томск, пр. Кирова 56в), info@polus-tomsk.ru

References

1. *SPICE Circuit Simulator & Analog Circuit Design*. Available at: https://www.orcad.com/products/orcad-pspice-designer/overview (accessed: 25.11.2018).

2. *Mixed Simulation.* Available at: https://www.altium.com/products/extensions/platform-extensions/mixed-simulation (accessed: 25.11.2018).

3. *Micro-Cap 12*. Available at: http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm (accessed: 25.11.2018).

4. Khan J.N. The use of sealed optocouplers in military and space electronics. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2010, no. 6 (107), pp. 82–86. (In Russian).

5. Voloshin S. Solid state relays for switching DC circuits. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2005, no. 7 (51), pp. 138–140. (In Russian).

6. Shitikov A. International Rectifier high-power semiconductors. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: science, technology, business*, 1997, no. 3–4 (9–10), pp. 43–45. (In Russian).

7. Edgardt A. Solid State Relays by International Rectifier. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2002, no. 5 (22), pp. 34–37. (In Russian).

8. Islamgazina L. Power semiconductor devices of JSC «Proton-Impulse». *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2004, no. 8 (43), pp. 74–76. (In Russian).

9. Abramova N. The main parameters and features of the use of solid-state relays Proton-Impuls. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2005, no. 6 (50), pp. 154–162. (In Russian).

10. Avdyushkin S.A., Maksimov I.A., Ivanov V.V., Kochura S.G., Kondyan S.S., Rubanov P.V., Kas'kov T.N. Influence of the electric mode on the level of radiation resistance of an optoelectronic switch 249КП5Р. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu = Questions of atomic science and technics. Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2014, no. 3, pp. 19–21. (In Russian).

11. Islamgazina L. The use of various materials to ensure optimal thermal conditions of power semiconductor devices, including modules and solid-state relays. *Silovaya elektronika = Power electronics*, 2005, no. 5, pp. 96–99. (In Russian).

12. Ozerkin D.V., Rusanovskiy S. A. Methodology for modeling the temperature stability of the B19K resistor blocks in SPICE simulators. *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Uninervsiteta Sistem Upravleniya i Radioelektroniki = Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 90–97. (In Russian).

13. *Integrated microcircuits. Microcircuits of the K224 .. KR514 series: a reference book*. St. Petersburg, Elektronstandart Publ., 1993. 232 p. (in Russian).

14. *Optocouplers and solid-state relays*. Available at: http://www.proton-orel.ru/catalog/optrony-i-tverdotelnye-rele/ (accessed: 25.11.2018).

15. *TP04310A. Mobile Temperature System for Testing Components, Hybrids, Parts, Modules, Subassemblies and Printed Circuit Boards at Precise Temperature*. Available at: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Temptronic-TP04310A_Datasheet.pdf (accessed: 26.11.2018).

16. *Semiconductor Tester Formula TT3*. Available at: http://form.ru/products/semiconductor/FTT/ (accessed: 26.11.2018). (In Russian).

17. Bachmanov V. A., Zabolotnov I. V., Lapin A. V. Implementation of Table Models of Tunneling Effects for Acceleration SPICE-Simulation of Nanometer MOSFET Transistors. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 616–624. (In Russian).

Received 07.12.2018; Revised 07.12.2018; Accepted 22.01.2019.

Information about the authors:

Denis V. Ozerkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Design and Production of Radio Equipment Department and Radioelectronic Technologies and Ecological Monitoring Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, 634050, Tomsk, Lenin Av. 40), ozerkin.denis@yandex.ru

Vladislav V. Babeshko – Meter electrical parameters of radio components of the Testing Technical Center of JSC «Polyus» Research and Production Center (Russia, 634050, Tomsk, Kirov Av. 56v), info@polus-tomsk.ru

УДК 004.315.2 DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-197-207

Исследование и модификация многоразрядного параллельно-префиксного сумматора

А.Н. Якунин, Аунг Мьо Сан

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

yakunin.alexey@gmail.com

Проектирование эффективных двоичных сумматоров – актуальная задача, от решения которой зависит производительность действующих устройств. В настоящее время параллельно-префиксная структура сумматора считается эффективной для выполнения операции сложения двух многоразрядных двоичных чисел. Существует несколько вариантов сумматоров с различными характеристиками по быстродействию и аппаратным затратам. В работе исследован модифицированный вариант параллельно-префиксного сумматора и проведено сравнение его параметров с сумматорами Sklansky, Kogge-Stone, Brent-Kung и Lander-Fischer. Моделирование сумматоров выполнено в среде САПР Quartus II. Проведен сравнительный анализ сумматоров по аппаратным и временным затратам. Анализ результатов моделирования показал, что при выполнении сложения 32-разрядных двоичных чисел предложенный сумматор имеет лучшее быстродействие по сравнению с другими сумматорами, а также дает снижение сложности на 26 % по сравнению с сумматором Kogge-Stone.

Ключевые слова: параллельно-префиксный сумматор (ППС); сумматоры Sklansky, Kogge-Stone; Brent-Kung; Lander-Fischer; схематичные узлы; префиксное дерево; логический элемент; сложность по Квайну; задержка

Для цитирования: Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан. Исследование и модификация многоразрядного параллельно-префиксного сумматора // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 197–207. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-197-207

© А.Н. Якунин, Аунг Мьо Сан, 2019

Research and Modification of a Multi-Bit Parallel-Prefix Adder

A.N. Yakunin, Aung Myo San

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

yakunin.alexey@gmail.com

Abstract: The binary adders are the combinational nodes for performing the addition of the binary numbers in the arithmetic logic units included in many processors. Therefore, the design of an efficient binary adder is an actual task, which solution depends on the performance of existing device. Currently, a parallel-prefix adder is considered as effective for performing an addition of the two multi-bit binary numbers. There are several variants of the adder with different performance characteristics and hardware costs. In the work a modified variant of the parallel-prefix has been studied and the comparison of its parameters with Sklansky, Kogge-Stone, Brent-Kung and Lander-Fischer adders has been performed. The modeling of the adders has been made in the CAD Quartus II, and the comparative analysis of the adders has been executed by the hardware and time costs. The analysis of the simulation results shows that when the addition o 32-bit binary numbers is performed, the proposed adder has better performance compared to other adders considered, and, also, has 26%less complexity compared to the Kogge-Stone adder.

Keywords: parallel-prefix adder (PPA); Sklansky, Kogge-Stone, Btent-Kung, Lander-Fischer adress; schematic nodes; prefix tree; logical element; Quine complexity; delay

For citation: Yakunin A.N., Aung Myo San. Research and modification of a multi-bit parallel-prefix adder. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 197–207. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-197-207

Введение. Аппаратная реализация арифметических операций над двоичными числами является важным архитектурным элементом в микропроцессорах, цифровых сигнальных процессорах, математических сопроцессорах и других устройствах. Многие арифметические операции опираются на сложение. Поэтому, имея аппаратную структуру сумматора, становится возможным реализовать умножение посредством повторного сложения, вычитание – логического отрицания одного операнда и деление – повторенного вычитания.

Сумматор – комбинационное логическое устройство, выполняющее операцию сложения двух многоразрядных двоичных чисел [1]. Сумматоры входят в состав более сложных цифровых устройств, например умножителя двоичных чисел и арифметико-логических устройств [1]. Поэтому аппаратная реализация эффективного высокоскоростного двоичного сумматора необходима для повышения быстродействия арифметико-логических устройств и, следовательно, процессора в целом. При схемной реализации для выполнения операции сложения чем меньше время задержки поступления данных на выход комбинационного сумматора, тем выше его быстродействие. Для сокращения времени задержки распространения переносов практически во всех современных компьютерах в критических путях используются параллельно-префиксные сумматоры (ППС), так как в настоящее время быстродействие является одним из важнейших показателей [2].

Цель настоящей работы – разработка модифицированного варианта ППС для быстрого арифметического сложения двух многоразрядных двоичных чисел с фиксированной запятой.

Архитектура ППС. Параллельно-префиксный сумматор – многоразрядный параллельный сумматор с распространяющимся переносом, использующийся для одновременного суммирования двух многоразрядных чисел и имеющий лучшие характеристики по задержке распространения переноса по сравнению с другими типами двоичных параллельных сумматоров. Перспективную архитектуру ППС можно представить в виде трех каскадов (рис.1): предвычисления; формирования префиксного дерева; формирования результата [3–5].

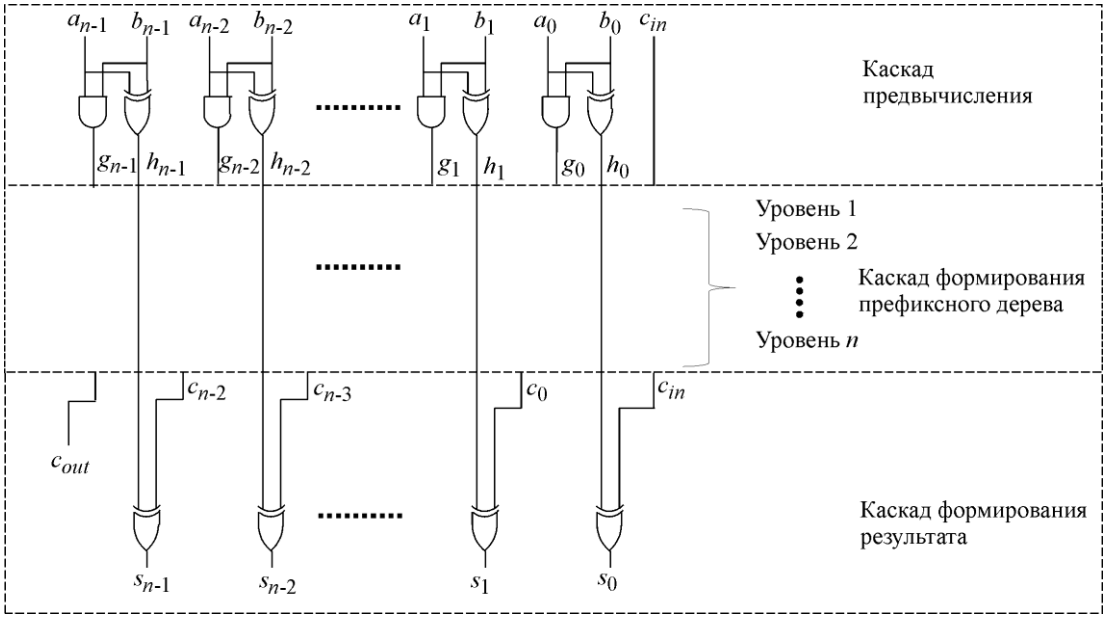


Рис.1. Перспективная архитектура для построения различных ППС
Fig.1. Perspective architecture for construction of various PPA

На каскаде предвычисления формируются значения функций генерации сигналов переноса g_i и распространения переноса h_i. Для каждой пары битов входных операндов a_i и b_i соответствующие логические уравнения имеют вид

$$g_i = a_i \cdot b_i, \quad i = 0, 1, 2, ..., n-1,$$
$$h_i = a_i \oplus b_i, \quad i = 0, 1, 2, ..., n-1.$$

На каскаде формирования префиксного дерева переносов группа сигналов генерации переноса $G_{i:k}$ и распространения переноса $H_{i:k}$ вычисляется для каждого бита по следующим уравнениям:

$$G_{[i:k]} = \begin{Bmatrix} g_i, & \text{если} \quad i = k, \\ G_{[i:j]} + H_{[i:j]} \cdot G_{[j-1:k]} & \text{в противном случае} \end{Bmatrix},$$
$$H_{[i:k]} = \begin{Bmatrix} h_i, & \text{если} \quad i = k, \\ H_{[i:j]} \cdot H_{[j-1:k]} & \text{в противном случае} \end{Bmatrix}.$$

На каскаде формирования результата определяются биты выходного результата и переноса согласно формулам

$$c_i = G_{[i:0]},$$
$$s_i = h_i \oplus c_{i-1}.$$

Таким образом, с помощью полученных уравнений каждого каскада ППС реализуются следующие схематичные узлы: черный; белый; овал; треугольник (рис.2). В настоящей работе схематичные узлы используются для большей наглядности рассматриваемых архитектур при построении различных ППС.

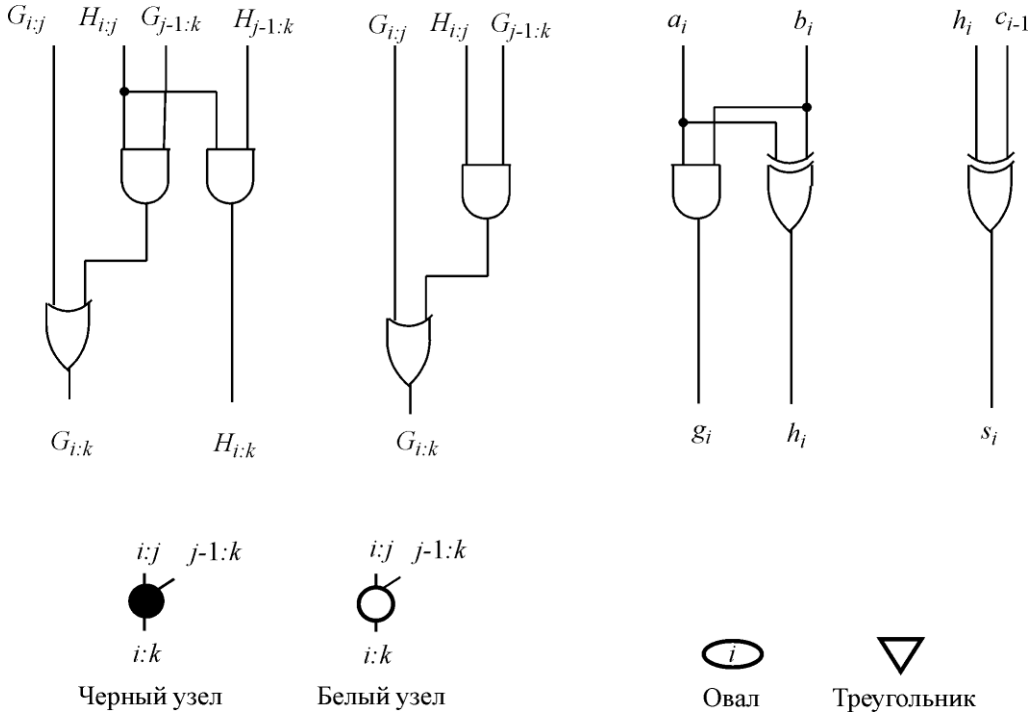


Рис.2. Базовые схематичные узлы
Fig.2. Basic schematic nodes

Для оценки аппаратных затрат оборудования применяются такие критерии оценок, как количество используемых логических элементов и сложность по Квайну, определяемая числом входов всех логических элементов. Оценим сложности по Квайну черного узла q_{black}, белого узла q_{white}, овала q_{oval} и треугольника $q_{triangle}$. Обозначим количество используемых логических в них элементов как k_{black}, k_{white}, k_{oval} и $k_{triangle}$. В черном узле располагаются три двухвходовых логических элемента: два И и один ИЛИ, поэтому $q_{black} = 6$ и $k_{black} = 3$. Белый узел содержит два двухвходовых логических элемента: один И и один ИЛИ, поэтому $q_{white} = 4$ и $k_{white} = 2$. Овал состоит тоже из двух двухвходовых элементов: И и *XOR*, поэтому $q_{oval} = 4$ и $k_{oval} = 2$. Треугольник имеет только один двухвходовый элемент *XOR*, поэтому $q_{triangle} = 2$ и $k_{triangle} = 1$.

На каскадах предвычисления и формирования результата каждый ППС имеет одинаковые структуры для их создания, а на каскаде формирования дерева переносов сиг-

налы генерации и распространения переноса могут быть сгруппированы различными методами, на основе которых созданы разные типы ППС. По схемной реализации различают несколько вариантов ППС: Sklansky [6–8], Kogge-Stone [8], Brent-Kung [9], Ladner-Fischer [10]. Принцип работы таких сумматоров заключается в том, что в первую очередь вычисляются значения g_i и h_i для разрядов первого каскада, далее – сигналы $G_{i:k}$ и $H_{i:k}$ для схематичных узлов из каскада формирования префиксного дерева, пока сигнал c_i не будет известен для каждого разряда. После этого результат s_i операции сложения вычисляется вместе с c_i в последнем каскаде. Время задержки таких ППС пропорционально количеству уровней на каскаде формирования префиксного дерева. На рис.3 и 4 представлены схемы сумматоров для 8- и 32-разрядных операндов.

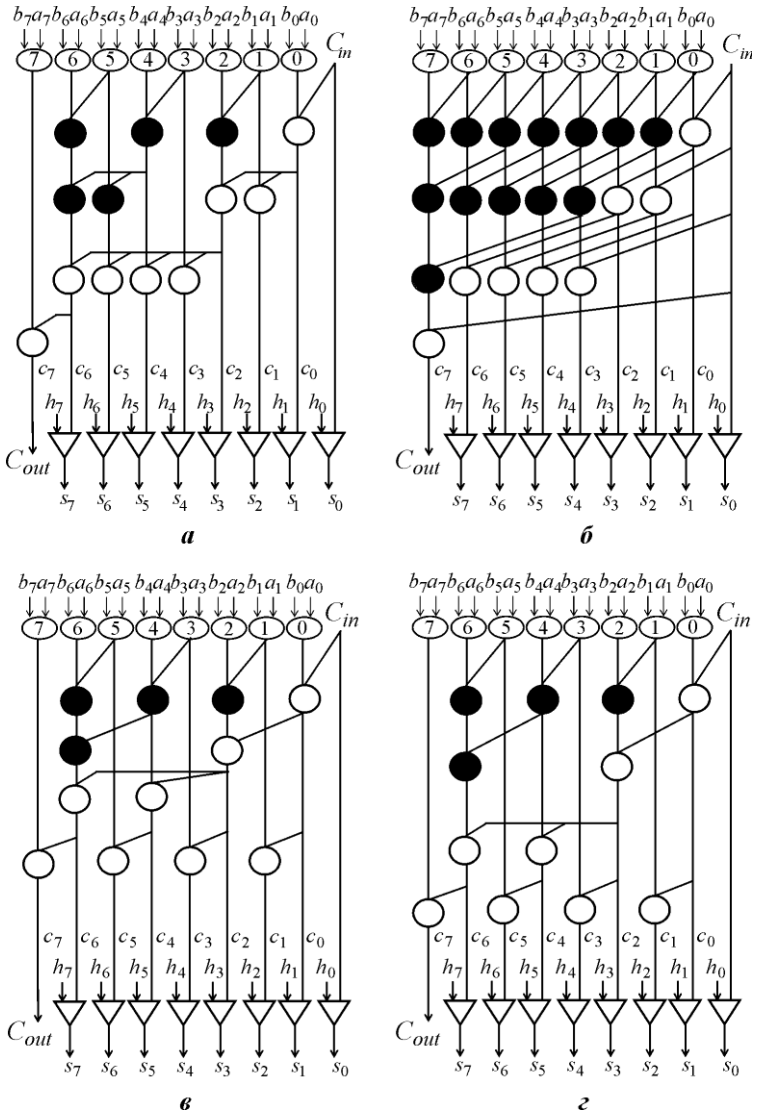
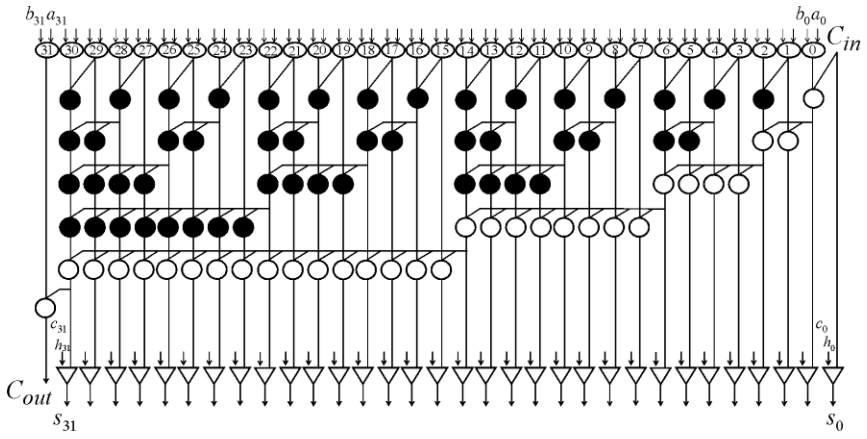
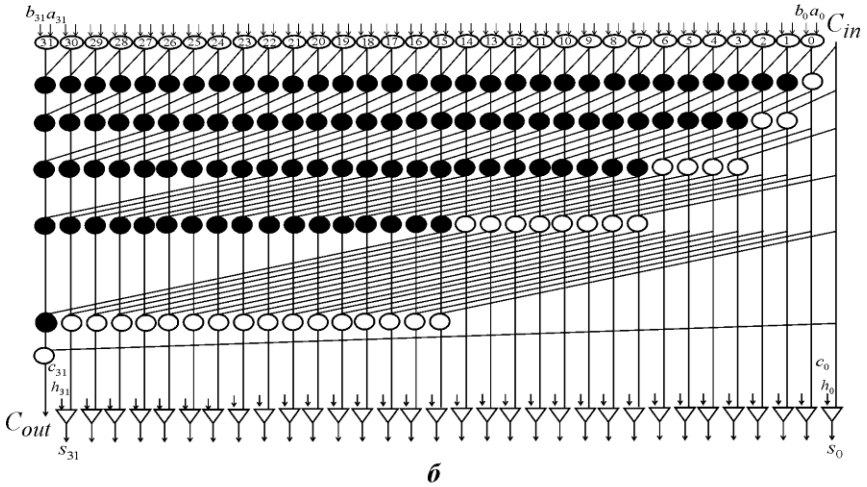


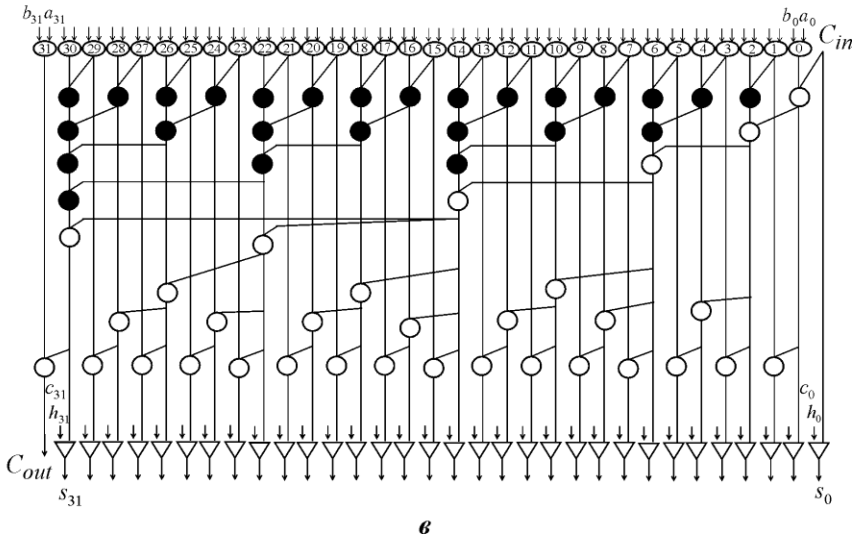
Рис.3. 8-разрядные ППС: *а* – Sklansky; *б* – Kogge-Stone; *в* – Brent-Kung; *г* – Ladner-Fischer
Fig.3. 8-bit parallel-prefix adders: *a* – Sklansky; *b* – Kogge-Stone; *c* – Brent-Kung; *d* – Ladner-Fischer



а

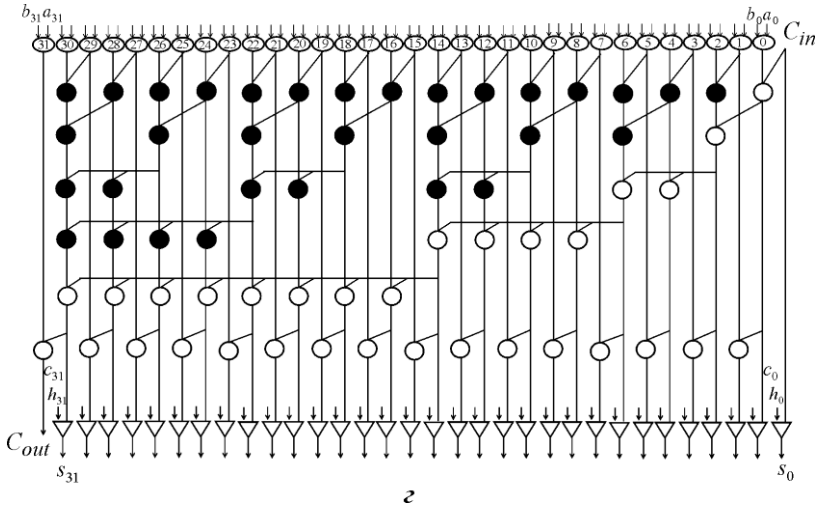


б



в

Рис.4. 32-разрядные ППС: *а* – Sklansky; *б* – Kogge-Stone; *в* – Brent-Kung
Fig.4. 32-bit parallel-prefix adders: *a* – Sklansky; *b* – Kogge-Stone; *c* – Brent-Kung



г

Рис.4 (окончание). 32-разрядные ППС: *г* – Ladner-Fischer
Fig.4 (end). 32-bit parallel-prefix adders: *d* – Ladner-Fischer

Модифицированный ППС. Для разработки модифицированного ППС предлагается вариант сумматора, в котором используется своя структура дерева сигналов генерации $G_{i:k}$ и распространения переноса $H_{i:k}$. На рис.5 показаны схемы многоразрядного модифицированного ППС. Видно, что построение первого уровня префиксного дерева этого сумматора аналогично построению Kogge-Stone сумматора. Основная структурная разница начинается со второго уровня префиксного дерева, где формируются группы из двух схематичных узлов. На третьем уровне группы составляют четыре узла схемы, на четвертом – восемь узлов и т.д. В этом сумматоре сначала вычисляются сигналы g_i и h_i для пар входных разрядов, далее – сигналы $G_{i:k}$ и $H_{i:k}$ для схематичных узлов префиксного дерева из второго каскада, пока не будет известен окончательный сигнал переноса c_i для каждого столбца. На последнем каскаде вычисляется результат сложения s_i вместе с генерируемыми сигналами, полученными на предыдущем каскаде префиксного дерева.

Проанализировав предлагаемую структуру сумматора, можно получить, что количество уровней схематичных узлов на втором каскаде соответствует $l = \log_2 n + 1$, где n – разрядность входных операндов ППС. Количество схематичных узлов составляет $((\frac{n}{2}\log_2 n - 2) + \frac{n}{2} + 3)$. Количество используемых логических элементов $k_{\text{мод}}$, сложность по Квайну $q_{\text{мод}}$ и время задержки $t_{\text{мод}}$ модифицированного сумматора вычисляются с использованием следующих уравнений:

$$k_{\text{мод}} = (\frac{3n}{2}(\log_2 n + 1) + 2n + 3),$$
$$q_{\text{мод}} = (3n(\log_2 n + 1) + 4n + 6).$$

Предположим, что время задержки любого логического элемента равно $t_{\text{л.э}}$. Тогда

$$t_{\text{мод}} = 2(\log_2 n + 1)t_{\text{л.э}}.$$

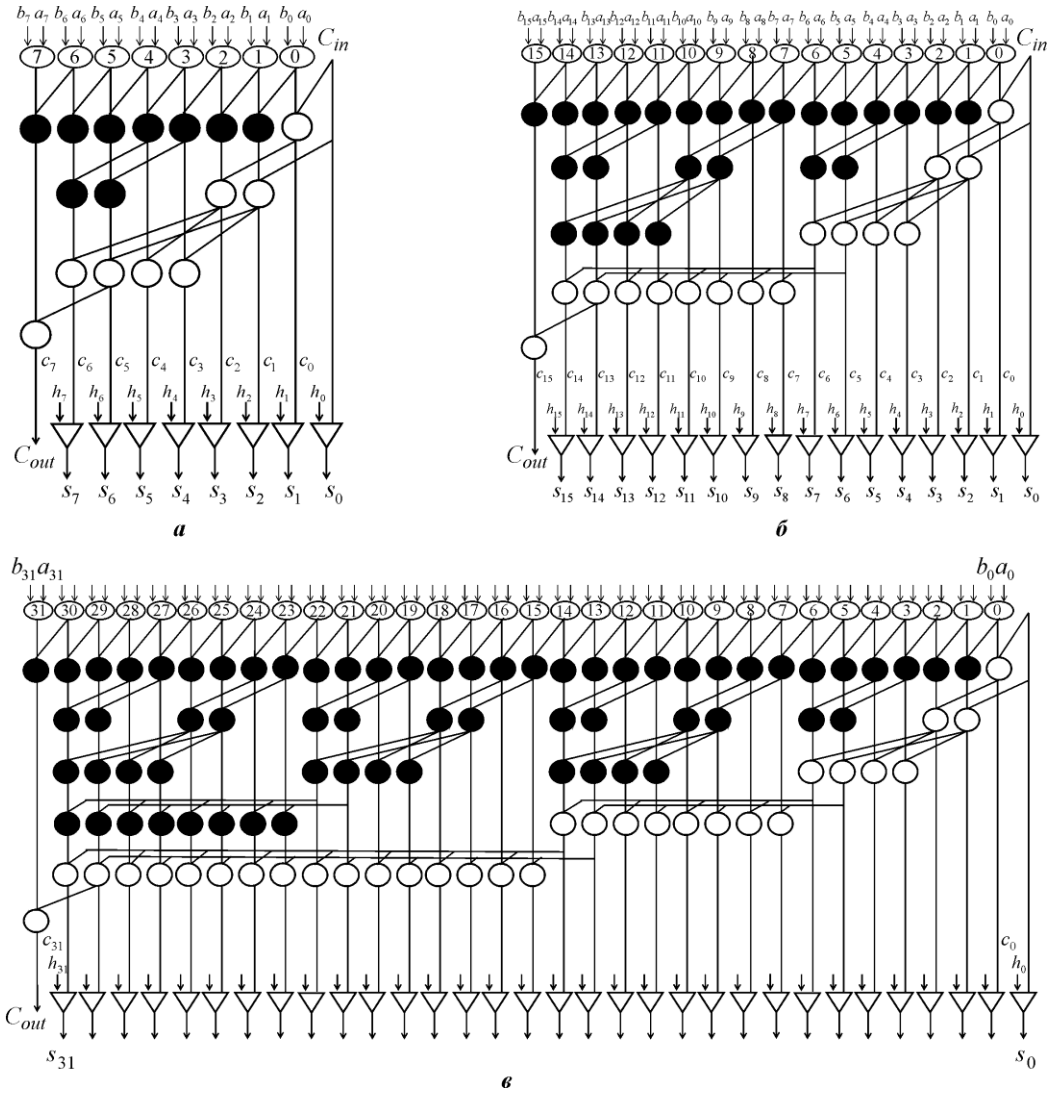


Рис.5. Модифицированные ППС: *а* – 8-разрядный; *б* – 16-разрядный; *в* – 32-разрядный
Fig.5. Modified parallel-prefix adders: *a* – 8-bit; *b* – 16-bit; *c* – 32-bit

Теоретический анализ параметров ППС. Оценим аппаратные и временные затраты Sklansky, Kogge-Stone, Brent-Kung, Ladner-Fischer сумматоров по следующих параметрам: количество используемых логических элементов $k_{ППС}$; сложность по Квайну $q_{ППС}$; время работы $t_{ППС}$. Для вычисления времени работы сумматоров рассматривается наихудший (самый длинный) путь, по которому проходит сигнал, и складывается время задержки всех логических элементов на этом пути. В ходе выполнения работ проведен анализ схемной реализации с увеличением разрядности входных операндов для вывода формул при оценке аппаратных и временных параметров. В табл.1 представлены формулы для вычисления количества используемых логических элементов, сложности по Квайну и времени задержки логических элементов ППС. Результаты теоретического расчета аппаратных и временных параметров ППС приведены в табл.2.

Таким образом, сумматор Brent-Kung имеет наихудшее время работы, для схемной реализации он характеризуется меньшим количеством используемых логических элементов и сложностью по Квайну.

Таблица 1

Формулы для вычисления аппаратных и временных параметров ППС

Table 1

Formulas for calculating the hardware and timing parameters of the presented PPA

Тип ППС	Количество используемых логических элементов	Сложность по Квайну	Время задержки $t_{л.э}$
Sklansky	$\frac{3n}{2}\log_2 n + 2n + 3$	$3n\log_2 n + 4n + 6$	$2\log_2 n + 2$
Kogge-Stone	$(3n+3)\log_2 n - n + 6$	$(6n+6)\log_2 n - 2n + 12$	$2\log_2 n + 2$
Brent-Kung	$8n - 3 - 3\log_2 n$	$16n - 6 - 6\log_2 n$	$4(\log_2 n - 2) + 6$
Lander-Fischer	$\frac{3n}{4}\log_2 n + \frac{17n}{4}$	$\frac{3n}{2}\log_2 n + \frac{17n}{2}$	$2\log_2 n + 4$
Модифициро-ванный	$\frac{3n}{2}(\log_2 n + 1) + 2n + 3$	$3n(\log_2 n + 1) + 4n + 6$	$2\log_2 n + 2$

Таблица 2

Аппаратные и временные параметры ППС

Table 2

Comparison of hardware and timing parameters of presented PPA

Тип ППС	8 бит			16 бит			32 бит		
	$k_{ППС}$	$q_{ППС}$	$t_{ППС}$	$k_{ППС}$	$q_{ППС}$	$t_{ППС}$	$k_{ППС}$	$q_{ППС}$	$t_{ППС}$
Sklansky	55	110	$8t_{л.э}$	131	262	$10t_{л.э}$	307	614	$12t_{л.э}$
Kogge-Stone	79	156	$8t_{л.э}$	194	388	$10t_{л.э}$	469	936	$12t_{л.э}$
Brent-Kung	52	104	$10t_{л.э}$	113	226	$14t_{л.э}$	238	476	$18t_{л.э}$
Lander-Fischer	52	104	$10t_{л.э}$	116	232	$12t_{л.э}$	256	512	$14t_{л.э}$
Модифицированный	67	134	$8t_{л.э}$	155	310	$10t_{л.э}$	355	710	$12t_{л.э}$

Моделирование ППС. Моделирование сумматоров проводилось в среде САПР Altera Quartus-II с использованием семейства ПЛИС «Cyclone-II-EP2C20F256C6». Для симуляции в среде Quartus II выбран режим функционального моделирования, в ходе которого получены значения аппаратных и временных параметров сумматоров в отчете о компиляциях. В табл.3 в столбце «TCLE в ПЛИС» указано общее количество логических элементов (И, ИЛИ, *XOR* в соответствии с рис.2–4), в столбце «Worst-case tpd» – максимальное время распространения сигнала от входов к выходам, которое представляет собой общую задержку логических элементов (total cell delay), включая задержку межсоединений между ними (total interconnect delay).

Результаты моделирования показали, что при реализации 32-разрядного сумматора модифицированный сумматор дает снижение общего количества комбинационных логических элементов на 26 % по сравнению с сумматором Kogge-Stone. По параметру быстродействия предложенный ППС имеет меньшую задержку на 17,5 % по сравнению с сумматором Sklansky, на 3,5 % – с сумматором Kogge-Stone, на 22 % – с сумматором Brent-Kung и на 17,5 % – с сумматором Ladner-Fischer.

Достоверность выполнения операции 32-разрядного сложения модифицированного сумматора подтверждена результатами моделирования, полученными в среде САПР Quartus II. Фрагмент диаграммы представлен на рис.6.

Таблица 3

Оценка результатов моделирования ППС в среде САПР Quartus-II

Table 3

Evaluation of simulation results of PPA in Quartus-II CAD environment

Тип ППС	8 бит		16 бит		32 бит	
	TCLE в ПЛИС	Worst-case tpd, нс	TCLE в ПЛИС	Worst-case tpd, нс	TCLE в ПЛИС	Worst-case tpd, нс
Sklansky	26	12,1	59	14,5	136	23,4
Kogge-Stone	31	12,8	87	16,2	227	20
Brent-Kung	24	12,9	51	15,1	117	24,9
Lander-Fischer	24	12,9	54	15,1	115	23,5
Модифицированный	30	12,6	72	16,1	167	19,3

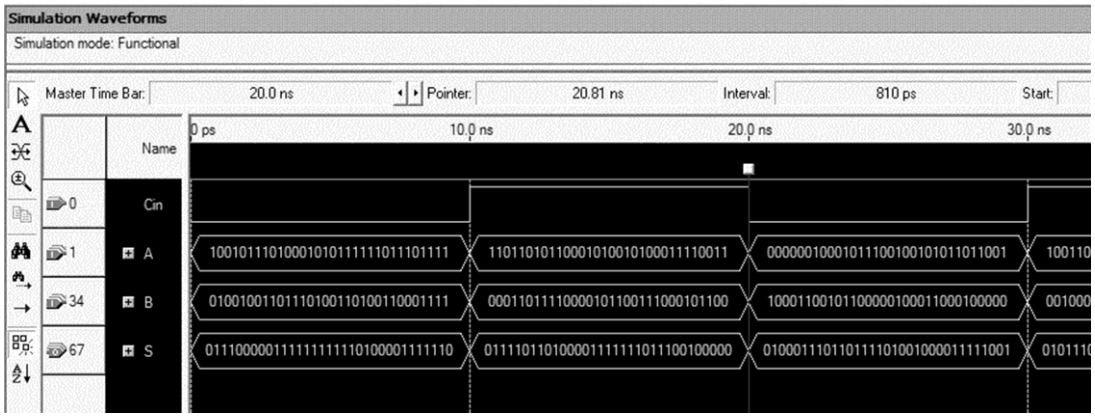


Рис.6. Временная диаграмма результатов моделирования операции сложения двух 32-разрядных двоичных чисел

Fig.6. Timing diagram of simulation results of the addition of two 32-bit binary numbers

Заключение. В результате проведенных исследований выявлено, что предложенный модифицированный ППС имеет преимущество по времени работы по сравнению с некоторыми известными структурами. При выполнении сложения 32-разрядных двоичных чисел предложенный сумматор имеет лучшее быстродействие по сравнению с другими сумматорами, а также дает снижение сложности на 26 % по сравнению с сумматором Kogge-Stone. Достоверность выполнения операции сложения подтверждена результатами моделирования временными диаграммами с различным диапазоном аргументов и сравнением результатов с эталонными значениями.

Дальнейшим направлением работы является исследование возможности применения многоразрядного высокоскоростного ППС для модулярной арифметики.

Литература

1. ***Червяков Н.И., Ляхов П.А., Валуева М.В., Криволапова О.В.*** Сравнительный анализ аппаратной реализации сумматоров на FPGA // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – №4. – С. 99–108.

2. ***Дэвид Д.Х., Сара Л.Х.*** Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. – 2-е изд. – Нью-Йорк, 2013. – С. 609–610.

3. ***Aung Myo San, Yakunin A.N.*** Reduction of the hardware complexity of a parallel prefix adder // Intern. Conf. ElConRus-2019 (Saint-Petersburg, Moscow, 28–31 Jan 2019). – Moscow: MIET, 2019. – P. 1348–1349.

4. ***Mohanraj M., Nethaji B., Nithya S., Nivetha N.*** Design of low-power parallel prefix adder Kogge-Stone for high-speed computing // International Journal of Advanced Information Sciences and Technology (IJAIST). – 2014. – Vol. 27. – No. 27. – P. 132–135.

5. ***Sunil M., Ankith R.D., Manjunatha G.D., Premananda B.S.*** Design and implementation of faster parallel prefix Kogge-Stone adder // International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Communications. – 2014. – Vol. 3. – No. 1. – P. 116–118.

6. ***Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан.*** Повышение скорости работы многоразрядного двоичного умножителя // Сб. тр. VII Всероссийской науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2018 (МЭС-2018)». – 2018. – Вып. II. – С. 149–155. – DOI: 10.31114/2078-7707-2018-2-149-155.

7. ***Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан.*** Сравнительный анализ характеристик двоичных многоразрядных параллельных сумматоров // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – №3. – С. 293–303. – DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-293-303.

8. ***Kowsalya P., Malathi M., Ramanathan P.*** Low power parallel prefix adder // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 573. – P. 197.

9. ***Neha Tyagi, Neeraj Kumar Sharma.*** Differentiate different methodology for design of vedic multiplier // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2017. – Vol. 5. – Iss. VI. –P. 1353.

10. ***Chaitanya Kumara P., Nagendra R.*** Design of 32 bit parallel prefix adders // IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE). – 2013. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 3–4.

Поступила в редакцию 05.06.2018 г.; после доработки 18.12.2018 г.; принята к публикации 22.01.2019 г.

Якунин Алексей Николаевич – доктор технических наук, доцент Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), yakunin.alexey@gmail.com

Аунг Мьо Сан – аспирант Института микроприборов и систем управления Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), aungmyosan61028@gmail.com

References

1. Chervyakov N.I., Lyakhov P.A., Valueva M.V., Krivolapova OV. Comparative analysis of the hardware implementation of adders on the FPGA. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii = Science. Innovation. Technology*, 2016, no. 4, pp. 99–108. (in Russian).

2. David Money Harris., Sarah L. Harris. *Digital Design and Computer Architecture*. 2nd Edition. Avenue South, New York, 2013, pp. 609–610. (in Russian).

3. Aung Myo San, Yakunin A.N. Reduction of the hardware complexity of a parallel prefix adder. *International Conference EIConRus-2019*. Moscow, MIET Publ. 2019, pp. 1348–1349.

4. Mohanraj M., Nethaji B., Nithya S., Nivetha N. Design of low-power parallel prefix adder Kogge-Stone for high-speed computing. *International Journal of Advanced Information Sciences and Technology*, 2014, vol. 27, no.27, pp. 132–135.

5. Sunil M., Ankith R.D., Manjunatha G.D., Premananda B.S. Design and implementation of faster parallel prefix Kogge-Stone adder. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Communications*, 2014, vol-3, no. 1, pp. 116–118.

6. Yakunin A.N., Aung Myo San. Increasing the speed of the multi-bit binary multiplier. *VII All-Russian Scientific and Technical Conference «Problems of development of promising micro-and nanoelectronic systems - 2018 (MES-2018)». Collection of papers.* 2018, iss. II, pp. 149–155. DOI: 10.31114 / 2078-7707-2018-2-149-155.

7. Yakunin A.N., Aung Myo San. Comparative analysis of the characteristics of binary multi-bit parallel adders. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol.23, no.3, pp. 293–301. (in Russian). DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-293-303.

8. Kowsalya P., Malathi M., Ramanathan P. Low power parallel prefix adder. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 573, p. 197.

9. Neha Tyagi, Neeraj Kumar Sharma. Differentiate Different Methodology for Design of Vedic Multiplier. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2017, vol. 5, iss. VI, p. 1353.

10. Chaitanya Kumara P., Nagendra R. Design of 32 bit Parallel Prefix Adders. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2013, vol. 6, iss. 1, pp. 3–4.

Received 05.06.2018; Revised 18.12.2018; Accepted 22.01.2019.

Information about the authors:

Alexey N. Yakunin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer, Microwave and Control System Engineering Institute, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yakunin.alexey@gmail.com

Aung Myo San – PhD student of the Computer, Microwave and Control System Engineering Institute, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aungmyosan61028@gmail.com

Памяти Жореса Ивановича Алфёрова



15.03.1930 – 01.03.2019

«Будущее России – наука и технологии...»
(Ж. Алфёров)

1 марта 2019 г. ушел из жизни выдающийся советский и российский ученый, академик РАН, лауреат Нобелевской премии по физике Жорес Иванович Алфёров.

Ж.И. Алфёров родился 15 марта 1930 г. в г. Витебске. В 1948 г. он окончил с золотой медалью мужскую среднюю школу № 42 в Минске и стал студентом Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) им. В.И. Ульянова-Ленина. В 1953 г. Жорес Иванович принят на работу в Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. При участии Ж.И. Алфёрова были разработаны первые отечественные плоскостные транзисторы и силовые германиевые приборы. За комплекс проведенных работ в 1959 г. Ж.И. Алфёров получил первую государственную награду – орден «Знак Почета». В 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию.

В те годы возникла идея использовать гетеропереходы в полупроводниковой технике. Создание приборов на их основе могло привести к качественному скачку в физике и технике. Ж.И. Алфёров с сотрудниками получили широко известную теперь гетеропару GaAs/AlGaAs и создали на ее основе первый в мире полупроводниковый гетеролазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Открытие Ж.И. Алфёровым идеальных гетеропереходов и новых физических явлений – «суперинжекции», электронного и оптического ограничения в гетероструктурах – позволило кардинально улучшить параметры известных полупроводниковых приборов и создать принципиально новые, перспективные для применения в оптической и квантовой электронике. Новый этап исследований гетеропереходов в полупроводниках Жорес Иванович обобщил в докторской диссертации, которую успешно защитил в 1970 г. В 1972 г. Ж.И. Алфёров стал профессором, в 1973 г. – заведующим базовой кафедрой оптоэлектроники ЛЭТИ. В 1987–2003 гг. он директор, в 2003–2006 гг. – научный руководитель Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Работы Ж.И. Алфёрова по заслугам оценила международная и отечественная научная общественность. В 1971 г. Франклиновский институт (США) присудил ему престижную медаль Баллантайна, называемую «малой Нобелевской премией» и учреждённую для награждения за лучшие работы в об-

ласти физики. Затем следует престижная премия СССР – Ленинская (1972 г.). С использованием разработанной Ж.И. Алфёровым в 1970-х гг. технологии высокоэффективных радиационно стойких солнечных элементов на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs в России (впервые в мире) было организовано крупномасштабное производство солнечных элементов для космических батарей. На основе предложенных в 1970 г. Ж.И. Алфёровым и его сотрудниками идеальных переходов в четверных твердых растворах InGaAsP созданы полупроводниковые лазеры, работающие в существенно более широкой спектральной области, чем лазеры на основе GaAs/AlGaAs. Они нашли широкое применение в качестве источников излучения в волоконно-оптических линиях связи повышенной дальности.

С начала 1990-х гг. Ж.И. Алфёров занимался исследованием свойств наноструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек. В 1995 г. Ж.И. Алфёров со своими сотрудниками впервые демонстрирует инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре. Принципиально важным стало расширение спектрального диапазона лазеров с использованием квантовых точек на подложках GaAs. Таким образом, исследования Ж.И. Алфёрова заложили основы новой электроники на основе гетероструктур с очень широким диапазоном применения, известной сегодня как «зонная инженерия».

Присуждение в 2000 г. Ж.И. Алфёрову Нобелевской премии по физике за разработку полупроводниковых гетероструктур и создание сверхбыстрых опто- и микроэлектронных компонентов стало всемирным признанием его выдающихся научных заслуг.

В 2009 г. Ж.И. Алфёров создал и возглавил Санкт-Петербургский Академический университет (с 2015 г. – Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН) – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, в котором оставался до последнего дня.

Сегодня в России успешно работает Фонд поддержки образования и науки (Алфёровский фонд). Его основу составила та самая Нобелевская премия.

Уход из жизни Жореса Ивановича Алферова – это большая утрата не только для России, но и для всего мирового научного сообщества. Светлая память о Жоресе Ивановиче навсегда останется в сердцах миэтовцев, которым посчастливилось общаться и работать с этим выдающимся человеком.

Ректорат МИЭТ
Редколлегия



Ж.И. Алфёров выступает на встрече со студентами и преподавателями МИЭТ с лекцией «2015 год – Год Света. Эффективное преобразование и генерация света»
(ДК МИЭТ 18 ноября 2015 г.)



Жоресу Ивановичу присвоено звание «Почетный профессор МИЭТ»

ЮБИЛЕИ

Лабунову Владимиру Архиповичу – 80 лет



Известный ученый в области микро- и наноэлектроники Владимир Архипович Лабунов родился 16 марта 1939 г. в г. Орша Витебской области. В 1961 г. окончил Белорусский политехнический институт, два года работал на Минском электромеханическом заводе инженером-конструктором радиоэлектронных систем. В 1966 г. В.А. Лабунов защитил кандидатскую диссертацию по тематике взаимодействия ультразвуковых колебаний с твердым телом и был распределен в Минский радиотехнический институт (МРТИ) на кафедру микроэлектроники (сегодня – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)). В 1971 г. Владимир Архипович защитил докторскую диссертацию, в 1977 г. утвержден в ученом звании профессора.

В 1967–1968 гг. В.А. Лабунов проходил научную стажировку в Университете Брауна (США) по направлению микроэлектроники. В 1973–1974 гг. работал в Институте фундаментальной электроники Парижского университета (Франция). В течение 1976 г. занимался научной работой в Копенгагенском университете (Дания).

В.А. Лабунов начал свою профессиональную деятельность в области микроэлектроники с момента зарождения этой отрасли в СССР. Вся его научная деятельность была направлена на решение практических вопросов развития микроэлектроники, прежде всего в НПО «Интеграл» (г. Минск) – одном из флагманов советской микроэлектроники. В то же время он взаимодействовал с основными микроэлектронными предприятиями г. Зеленограда: НПО «Микрон», НПО «Ангстрем», НИИ точного машиностроения и др.

С 1975 по 1994 г. В.А. Лабунов заведовал кафедрой микроэлектроники БГУИР, которая выпустила тысячи специалистов высокой квалификации, составивших костяк таких передовых предприятий электронной промышленности Республики Беларусь и России, как НПО «Интеграл», НПО «Планар» и десятки других. В 1975 г. на базе кафедры микроэлектроники решением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике была открыта первая в СССР в области микроэлектроники Проблемная лаборатория «Электрохимические и плазменные процессы в микроэлектронике». Эта тематика и стала основным направлением исследований В.А. Лабунова. Работы, проводимые под руководством В.А. Лабунова, в своем большинстве являлись пионерскими. Результаты научных исследований В.А. Лабунова по данной тематике изложены в более 400 научных публикациях и защищены 500 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР. Под руководством В.А. Лабунова подготовлено 78 кандидатов и 12 докторов наук, создана научная школа в БГУИР, получившая широкую известность и международное признание.

В.А. Лабунов проводил большую организационно-производственную работу госу-

дарственного масштаба. Впервые в мировой практике на 15 лет раньше, чем на Западе, были запатентованы и продемонстрированы интегрированные системы производства ИС в одной вакуумной камере цилиндрического типа. В настоящее время мировая микроэлектроника работает на подобном оборудовании, которое называют кластерным. Владимир Архипович осуществлял научное руководство проектом «Основа» по разработке интегрированных систем линейного типа производства ИС, практическую реализацию которых выполняли более 10 предприятий электронной промышленности СССР. Используя свои научные знания и организационный опыт в области микроэлектроники, В.А. Лабунов реорганизовал кафедру микроэлектроники в кафедру микро- и наноэлектроники, принимал участие в создании ряда лабораторий, определив им новую тематику исследований в различных областях, относящихся к наноэлектронике.

Активная и плодотворная научно-педагогическая и общественно-политическая деятельность В.А. Лабунова высоко оценена научным сообществом и государством: 1978 г. – присуждена 1-я премия Президиума Академии наук СССР «За лучшую фундаментальную разработку в области микроэлектроники», 1981 г. – награжден орденом Трудового Красного Знамени, 1986 г. – орденом Октябрьской Революции, присвоено звание «Заслуженный изобретатель Белорусской ССР», 1992 г. – присвоено звание лауреата Государственной премии Республики Беларусь за цикл работ «Создание и промышленная реализация высокоэффективной системной технологии массового производства сверхбольших интегральных схем».

В 1982 г. Владимир Архипович избран членом-корреспондентом Академии наук Белорусской ССР (АН БССР) по специальности «Микроэлектроника», в 1986 г. – действительным членом АН БССР, с 1987 по 1989 г. – академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики АН БССР. В.А. Лабунов дважды избирался членом Президиума АН БССР (1987–1992 гг.) и Национальной академии наук Беларуси (2002–2009 гг.).

В 1989 г. В.А. Лабунов был избран в Верховный Совет СССР и осуществлял свою депутатскую деятельность на постоянной основе в г. Москве в должности заместителя председателя Комитета по науке и технологиям (до 1991 г.).

С 1991 по 1994 г. профессор В.А. Лабунов продолжил работу в должности заведующего кафедрой микроэлектроники БГУИР.

С 1994 по 2001 г. В.А. Лабунов – чрезвычайный и полномочный посол Республики Беларусь в странах Западной Европы – Бельгии, Нидерландах и Люксембурге; Постоянный представитель при Европейском союзе и НАТО.

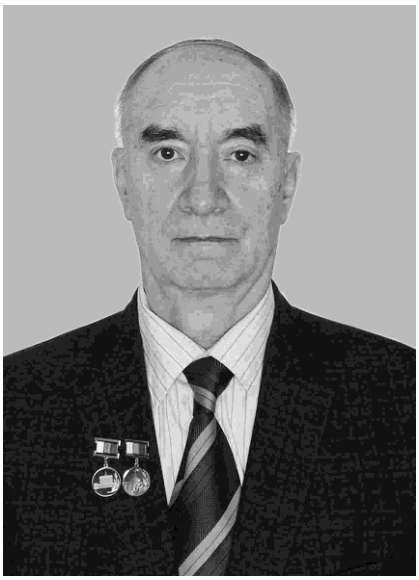
С 2001 г. по настоящее время В.А. Лабунов – заведующий лабораторией «Интегрированные микро- и наносистемы» БГУИР. Работы, проводимые в БГУИР непосредственно под руководством Лабунова В.А., посвящены разработке и исследованию наноэлектронных компонентов для нового поколения информационных и коммуникационных систем. За последние 5 лет В.А. Лабуновым совместно с сотрудниками БГУИР опубликовано более 150 научных работ.

Учитывая результаты совместных с российскими учеными работ в области микро- и наноэлектроники, В.А. Лабунов в 2012 г. избран почетным членом Нанотехнологического общества России, в 2016 г. – иностранным членом Российской академии наук.

Сердечно поздравляем дорогого коллегу Владимира Архиповича Лабунова с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья и творческого долголетия!

Редколлегия

Петросянцу Константину Орестовичу – 75 лет



9 апреля 2019 г. исполнилось 75 лет Константину Орестовичу Петросянцу, профессору, доктору технических наук, дважды лауреату Премии Правительства РФ в области науки и техники (1999 г.) и в области образования (2016 г.).

К.О. Петросянц окончил Московский государственный институт электронного машиностроения в 1968 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1985 г. – докторскую. С 1968 по 1972 г. работал в ОНИЛ микроэлектроники МЭП при МИЭМ инженером, младшим научным сотрудником. С 1972 по 1993 г. – на кафедре микроэлектроники ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, профессором, с 1993 по 2012 г. – заведующим кафедрой электроники и электротехники и деканом факультета автоматики и вычислительной техники МИЭМ. С 2012 г. работает в МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики» заведующим кафедрой электроники и наноэлектроники, с 2014 г. – ординарный профессор НИУ «Высшая школа экономики», научный руководитель Академического департамента электронной инженерии.

К.О. Петросянц – ведущий отечественный специалист в области моделирования приборов и технологических процессов полупроводниковой электроники. Разработанные им приборно-технологические и схемотехнические модели полупроводниковых приборов и элементов ИС, учитывающие высокочастотные, тепловые и радиационные эффекты, использовались для создания микросхем и электронной аппаратуры на предприятиях СССР и РФ. Константин Орестович внес значительный вклад в подготовку инженеров в области электроники и вычислительной техники для предприятий МЭП, МРП, МПСС, Росатома, Роскосмоса, Минобороны СССР и РФ.

К.О. Петросянц – руководитель сформированной им научно-педагогической школы. Подготовил 16 кандидатов и 4 докторов наук. Организовал и руководит тремя учебно-научными центрами: с корпорацией Motorola (США) по электронным компонентам; фирмой Mentor Graphics (США) по САПР печатных плат, мультичипов и БИС; фирмой Synopsys (США/Швейцария) по моделированию полупроводниковых приборов.

К.О. Петросянц автор более 300 научных трудов, из них 5 монографий и 18 авторских свидетельств и патентов.

К.О. Петросянц широко известен за рубежом, регулярно выступал и выступает на крупных зарубежных конференциях и симпозиумах, приглашался для научных консультаций и чтения лекций в ведущие технические университеты и научные центры Германии, Испании, Финляндии, Индии, Венгрии, Чехии. Он является сопредседателем оргкомитетов и членом программных комитетов нескольких международных научно-технических конференций под эгидой IEEE.

К.О. Петросянц награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

Константин Орестович – член редколлегий журналов «Известия высших учебных заведений. Электроника» и «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы».

В настоящее время К.О. Петросянц руководит комплексом работ по приборно-технологическому и схемотехническому проектированию радиационно- и температурностойкой электронной компонентной базы для предприятий Роскосмоса и Росатома.

Поздравляем Константина Орестовича с юбилеем, желаем крепкого здоровья и активной творческой деятельности!

Редколлегия

ПОДПИСКА 2019

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 каталогу АО «МК-Периодика»: www.periodicals.ru; info@periodicals.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.dlib.eastview.com



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