СПЕЦВЫПУСК

NANOINDUSTRY

НАНОИНДУСТРИЯ

СПЕЦВЫПУСК 96 2020

На двух языках

ISSN 1993-8578
ISSN 2687-0282 (online)
DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3S

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА-2019

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ «Микроэлектроника-2019»

Часть I

5-я Международная научная конференция
«Электронная компонентная база
и микроэлектронные модули»
Сборник докладов

Республика Крым,
г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019 г.

ТЕХНОСФЕРА

НАНОИНДУСТРИЯ. СПЕЦВЫПУСК 2020 (96)
Научно-технический журнал

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Plenary reports 9 **Пленарные доклады**

Prospects of development and requirements for radar systems components
A. I. Sinani
9 Перспективы развития и требования к компонентной базе радиолокационных систем
А. И. Синани

Navigationally connected VLSIs and modules 12 **Навигационно-связные СБИС и модули**

Tasks of practical implementation of local navigation systems
I. L. Korneev
V. V. Egorov
12 Задачи практического применения локальных систем навигации
И. Л. Корнеев
В. В. Егоров

Design principles of geodetic grade GNSS receiver based on MC149.01 module
M. Yu. Klimenko
S. V. Landyshev
18 Принципы построения геодезического навигационного приемника на базе модуля МС149.01
М. Ю. Клименко
С. В. Ландышев

VLSI of digital processor for generating and processing noise-like signals used in communication systems based on NeuroMatrix® NMC3 processor core
D. E. Kosorukov
V. Yu. Zaletov
V. V. Sevrukov
V. V. Gordeev
A. A. Komlev
21 СБИС цифрового процессора для формирования и обработки шумоподобных сигналов в системах связи на базе ядра NMC3
Д. Е. Косоруков
В. Ю. Залетов
В. В. Севрюков
В. В. Гордеев
А. А. Комлев

Methodology of building radio channels with noise-like signals to control an unmanned aerial vehicle
A. R. Popov
28 Методология построения каналов радиосвязи с шумоподобными сигналами для управления беспилотным летательным аппаратом
А. Р. Попов

High-performance computation systems 31 **Высокопроизводительные вычислительные системы**

Practice of using sockets for test benches and sorting processors
A. A. Vinogradov
A. S. Vorobiev
A. S. Gladkikh
31 Практика применения сокетов для стендов тестирования и разбраковки процессоров
А. А. Виноградов
А. С. Воробьев
А. С. Гладких

Analysis of technologies for manufacturing a multi-core processor package
A. S. Vorobiev
40 Анализ технологий для изготовления корпуса многоядерного процессора
А. С. Воробьев

Increasing the reliability of a die power distribution network
V. S. Generalov
E. A. Krasnuykov
45 Повышение устойчивости распределенной системы питания кристалла
В. С. Генералов
Е. А. Краснюков

Description and hardware error handling in CAN 2.0
V. R. Dzhafarov
50 Описание и аппаратная обработка ошибок в интерфейсе CAN версии 2.0
В. Р. Джафаров

Выпускается при содействии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования, в базу RSCI на платформе Web of Science и в Перечень ВАК (с 18.03.2016)

Редакционный совет:
И.БЕЛЯЕВ, Ю.БОРИСОВ, С.БУЛЯРСКИЙ, В.БЫКОВ, П.ВЕРНИК, В.КАНЕВСКИЙ, А.ЛАТЫШЕВ, В.ЛУКИЧЕВ, В.ЛУЧИНИН, П.МАЛЬЦЕВ, Ю.ПАРХОМЕНКО, А.РЕЗНЕВ, А.САУРОВ (гл. ред.), А.СИГОВ, В.ТЕЛЕЦ, П.ТОДУА, Ю.ЧАПЛЫГИН, И.ЯМИНСКИЙ

Главный редактор: **А.САУРОВ**
Зам. главного редактора: **А.АЛЕШИН**
Отв. секретарь: **Э.ГАЗИНА** *journal@electronics.ru*
Компьютерная верстка: **ИП Р.АВТУШЕНКО**
Дизайн: **Н.СЕМЯЧКИНА**

Отдел рекламы:
А.ЦАПЛИН *ats71@mail.ru*
О.ЛАВРЕНТЬЕВА *nano@technosphera.ru*
Сбыт: **А.МЕТЛОВ** *sales@electronics.ru*
Подписка: **Е.ЗАЙКОВА** *magazine@technosphera.ru*

Учредитель: АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Генеральный директор: **О.КАЗАНЦЕВА**
НАНОИНДУСТРИЯ ©
Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 7.09.2017 ПИ № ФС77-70992

Журнал издается 8 раз в год с 2012 года
Тираж спецвыпуска 150 экз. Цена договорная
Подписано в печать 15.06.2020, заказ № Т-96

© При перепечатке ссылка на журнал «НАНОИНДУСТРИЯ» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
Рукописи рецензируются, но не возвращаются.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета в типографии АО «Т 8 Издательские Технологии» 109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Адрес редакции:
ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2
Для писем: 125319, Москва, а/я 91
Тел.: +7 (495) 234-0110 доб. 183
Факс: +7 (495) 956-3346
E-mail: journal@electronics.ru
Internet http://www.nanoindustry.su
http://elibrary.ru
www.e.lanbook.ru

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Специальный выпуск
Международный форум
«Микроэлектроника-2019»
5-я Международная научная конференция
«Электронная компонентная база
и микроэлектронные модули».
Сборник докладов. Часть I
Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября –
5 октября 2019 г.

Почетный президент Форума
«Микроэлектроника – ЭКБ и электронные
модули» – руководитель Межведомственного
совета главных конструкторов по электронной
компонентной базе РФ, академик РАН,
доктор технических наук, профессор
Г.Я. Красников

Сопредседатели оргкомитета Форума:
А.Л. Савченко, сопредседатель Оргкомитета
Международного Форума «Микроэлектроника-2019»,
временный генеральный директор
АО «НИИМА «Прогресс»,
К.Ю. Борисов, сопредседатель Оргкомитета
Международного Форума «Микроэлектроника-2019»,
директор по стратегическому развитию
АО «НИИМА «Прогресс»

Заместители председателя оргкомитета Форума:
А.В. Григорьев (АО «НИИМА «Прогресс»)
С.Л. Фоттелер (АО «НИИМА «Прогресс»)

Оргкомитет Форума выражает благодарность
Н.С. Савищеву (АО «НИИМА «Прогресс»)
и Д.А. Шевелевой (АО «НИИМА «Прогресс»)
за большую помощь в подготовке к выпуску
настоящего издания

АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, д. 54
Тел.: +7 (499) 153-0311, 153-0131
Факс: +7 (499) 153-0161
info@mri-progress.ru
niima@mri-progress.ru

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
Ответственный за выпуск С.А. Орлов

Оператор Форума:
Компания «ПрофКонференции»
107392, Россия, Москва, Зельев переулок, д. 11
Телефон/факс: +7 (495) 641-57-17
info@microelectronica.pro

За достоверность и полноту сведений, изложенных
в публикациях, за качество иллюстраций, за точность
библиографии, а также информации по цитируемой
литературе несут ответственность авторы статей.

Storage systems depending on original computer platform
A. G. Zuev
S. S. Makhov
55 Системы хранения данных с учетом аппаратно-программной платформы
А. Г. Зуев
С. С. Махов

Testing servers for control system applications based on original hardware platform
I. N. Bychkov
I. A. Molchanov
60 Тестирование серверов на основе оригинальной платформы с учетом применения в системах управления
И. Н. Бычков
И. А. Молчанов

Packet switching devices for computing systems clustering
A. V. Rutkevich
S. A. Plotko
A. M. Mikhailov
65 Устройства пакетной коммутации для кластеризации вычислительных систем
А. В. Руткевич
С. А. Плотко
А. М. Михайлов

Developing cooling system for module based on multi-core processor
S. M. Sazho
V. V. Vorobushkov
A. S. Gladkikh
S. V. Senchenkov
69 Разработка системы охлаждения для модуля на основе многоядерного процессора
Ш. М. Сажо
В. В. Воробушков
А. С. Гладких
С. В. Сенченков

Operation experience of engineering subsystems in scalable emulation system
S. V. Yurlin
A. A. Ivanov
74 Применение инженерных решений распределенной системы эмуляции
С. В. Юрлин
А. А. Иванов

Information-management systems
82 **Информационно-управляющие системы**

Digital technologies in quality management of radio electronic equipment
V. B. Afanasiev
T. K. Vorobiev
V. A. Mamaev
V. M. Medvedev
K. A. Kolegov
82 Цифровые технологии в управлении качеством радиоэлектронной аппаратуры
В. Б. Афанасьев
Т. К. Воробьёв
В. А. Мамаев
В. М. Медведев
К. А. Колегов

Architectural Features and Main Characteristics of H.264 Hardware Video Codec as a Part of MCom-02 System-on-Chip
A. A. Belyaev
Ya. Ya. Petrichkovich
T. V. Solokhina
I. A. Belyaev
89 Особенности архитектуры и основные характеристики аппаратного видеокодека стандарта H.264 в составе микросхемы 1892ВМ14Я
А. А. Беляев
Я. Я. Петричкович
Т. В. Солохина
И. А. Беляев

On the issue of forming a business climate in the context of the economy digitalization
S. I. Bokov
V. L. Gladyshevsky
U. A. Pestun
97 К вопросу формирования делового климата в условиях цифровизации экономики
С. И. Боков
В. Л. Гладышевский
У. А. Пестун

Phasing and beam steering systems for phased antennas and AESA of airborne and ground-based mobile complexes
S. S. Bushkin
A. I. Sinani
101 Системы фазирования и управления лучом ФАР и АФАР бортовых и наземных мобильных комплексов
С. С. Бушкин
А. И. Синани

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Automated program documentation generation system *M. I. Gerus* *P. N. Mironov*	106	Автоматизированная система генерации программной документации *М. И. Герус* *П. Н. Миронов*
Automating the operation of complex radio information systems based on the prediction of the product functional systems technical condition *A. V. Osipov* *S. S. Matveeva* *A. Yu. Perlov*	111	Автоматизация эксплуатации сложных радиоинформационных комплексов на основе прогнозирования технического состояния функциональных систем изделия *А. В. Осипов* *С. С. Матвеева* *А. Ю. Перлов*
An unified reconfigurable commutation scheme of FFT *P. S. Poperechny* *I. Yu. Poperechnaya*	114	Унифицированная реконфигурируемая схема коммутации БПФ *П. С. Поперечный* *И. Ю. Поперечная*
Domestic VLSI of interfaces multicontroller for information and control systems of wide profile *G. O. Chumachenko* *M. O. Chelyshev* *A. O. Chelyshev* *L. A. Schigorev* *E. S. Vorontsov*	119	Отечественная СБИС мультиконтроллера интерфейсов для информационно-управляющих систем широкого профиля *Г. О. Чумаченко* *М. О. Челышев* *А. О. Челышев* *Л. А. Щигорев* *Е. С. Воронцов*
Russian hardware and software solution for analyzing the emotional state of people for modern smart ecosystems *A. V. Leontyev* *A. V. Shershakov* *E. S. Yanakova*	125	Российское программно-аппаратное решение распознавания эмоционального состояния людей для интеллектуальных экосистем *А. В. Леонтьев* *А. В. Шершаков* *Е. С. Янакова*
Techologies and micro- and nanoelectronics components	**129**	**Технологии и компоненты микро- и наноэлектроники**
Using surface properties of materials in microelectronics *V. P. Bokarev* *G. Ya. Krasnikov* *E. S. Gornev*	129	Использование поверхностных свойств материалов в микроэлектронике *В. П. Бокарев* *Г. Я. Красников* *Е. С. Горнев*
High-voltage normally-off GaN/AlGaN heterostructure transistor with p-type gate *V. I. Egorkin* *A. A. Zaytsev* *V. E. Zemlyakov* *V. V. Kapaev* *O. B. Kukhtyaeva*	133	GaN/AlGaN гетероструктурный транзистор нормально-закрытого типа с p-затвором для высоковольтных приборов *В. И. Егоркин* *А. А. Зайцев* *В. Е. Земляков* *В. В. Капаев* *О. Б. Кухтяева*
Designing a microelectronic analog ECB with improved performance within the synergetic paradigm *A. A. Lebedev* *A. S. Budyakov* *E. M. Savchenko*	137	Проектирование микроэлектронной аналоговой ЭКБ с улучшенными характеристиками в рамках синергетической парадигмы *А. А. Лебедев* *А. С. Будяков* *Е. М. Савченко*

Свежий номер журнала Вы можете приобрести:

Москва:
В редакции журнала «НАНОИНДУСТРИЯ»
г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2
Санкт-Петербург:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
Невский пр-т, д. 44, 5-й этаж, офис 6,
т. (812) 325-7544, 117-6862, 110-4366,
root@zolshar.spb.ru
Екатеринбург:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
ул. Народной воли, д. 25,
т. (343) 212-1810, 212-1331, ф. (343) 212-2314,
zolshar@online.ural.ru, ekp@front.ru
Новосибирск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
пр-т К. Маркса, д. 57, офис 708,
т. (3832) 46-2473, ф. (3832) 27-6380, nbzsh@mail.ru
Минск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ», пл. Казинца, д. 3,
офис 456, т. (10-375-172) 78-0914,
zolshar@integral.minsk.by
Ижевск:
Пред-во «Золотой Шар ТМ»,
ул. Софьи Ковалевской, д. 4а, офис 4,
т. (3412) 42-5241, т./ф. (3412) 42-5472,
office@zolshar.izhnet.ru

Подписка

- по каталогу «Газеты и журналы» агентства «Роспечать», индексы:
  80939 – полугодовой индекс
  48508 – годовой индекс
- АО «МК-Периодика»
- ГК «Урал-Пресс»
- ООО «Информнаука» – зарубежная подписка
- в редакции журнала
  по тел.: +7 (495) 234-0110
  e-mail: magazine@technosphera.ru

Подписаться на электронную версию на сайтах:
www.nanoindustry.su, elibrary.ru, www.e.lanbook.ru

Foreign subscriptions are accepted

- by the Agency "Mezhdunarodnaya Kniga".
  Phone: (007 495) 238-4967, Fax: (007 495) 238–4634
  or by companies cooperating with Mezhkniga
- by the "Rospechat" agency catalogue "Russian Newspapers & Magazines – 2005",
  Phone: (007 495) 195-6677, 195-6418,
  Fax: (007 495) 195-1431, 785-1470,
  E-mail: ovs@rosp.ru, http://www.rosp.ru

Наши представители в Германии

REC Russland Experten Consulting GmbH
Olgastrase 82 89073 Ulm
T +(49) 731 145 344 94
M +(49) 151 156 820 18
n.wenzel@russland-experten.com
www.russland-experten.com

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Simulating Thermoelectric Generator Based on Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 Synthesized by Electrochemical Deposition Method
V. V. Loboda
R. D. Buslaev
S. V. Dzyubanenko
E. M. Bakulin
141 Моделирование термоэлектрического генератора на основе Bi_2Te_3/Sb_2Te_3, синтезированных методом электрохимического осаждения
В. В. Лобода
Р. Д. Буслаев
С. В. Дзюбаненко
Е. М. Бакулин

Forming AlN nucleation transition layer on 3C-SiC/Si(111) virtual substrates by molecular beam epitaxy in ammonia atmosphere
S. D. Fedotov
A. V. Babaev
V. N. Statsenko
K. A. Tsarik
V. K. Nevolin
148 Формирование переходного слоя AlN на темплейтах 3C-SiC/Si(111) методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии
С. Д. Федотов
А. В. Бабаев
В. Н. Стаценко
К. А. Царик
В. К. Неволин

The effect of solid-phase recrystallization in double-implanted mode on the density of structural defects in ultrathin silicon-on-sapphire layers
N. N. Egorov
S. A. Golubkov
S. D. Fedotov
V. N. Statsenko
A. A. Romanov
V. A. Metlov
154 Влияние твердофазной рекристаллизации с двойной имплантацией на плотность структурных дефектов в ультратонких слоях кремния на сапфире
Н. Н. Егоров
С. А. Голубков
С. Д. Федотов
В. Н. Стаценко
А. А. Романов
В. А. Метлов

Micro- and optoelectronics for general and dedicated purposes
160 **Изделия микро- и оптоэлектроники общего и специального назначения**

A High-Temperature Instrumentation Amplifier
E. V. Balashov
N. V. Ivanov
D. B. Ahmetov
A. S. Korotkov
160 Высокотемпературный инструментальный усилитель
Е. В. Балашов
Н. В. Иванов
Д. Б. Ахметов
А. С. Коротков

Current status and development prospects for power semiconductor device engineering in Russia for the electric power converting and pulse technology
E. M. Geyfman
I. V. Grekhov
G. Yu. Kamentsev
A. Yu. Petrov
V. V. Chibirkin
164 Современное состояние и перспективы развития силового полупроводникового приборостроения в России для мощной преобразовательной и импульсной техники
Е. М. Гейфман
И. В. Грехов
Г. Ю. Каменцев
А. Ю. Петров
В. В. Чибиркин

Radiation-hardened CMOS SRAM 16Mbit 1657RY2Y
Yu. M. Gerasimov
N. G. Grigoryev
A. V. Kobylyatskiy
Ya. Ya. Petrichcovich
169 Радиационно стойкое КМОП статическое ОЗУ 16 Мбит 1657РУ2У
Ю. М. Герасимов
Н. Г. Григорьев
А. В. Кобыляцкий
Я. Я. Петричкович

Electrically one time programmable non-volatile memory in standard CMOS technology
I. V. Ermakov
A. Yu. Losevskoy
A. V. Nuykin
175 Электрически однократно программируемая энергонезависимая память на основе стандартной КМОП-технологии
И. В. Ермаков
А. Ю. Лосевской
А. В. Нуйкин

A High-Temperature Delta-Sigma ADC
A. S. Korotkov
D. V. Morozov
M. M. Pilipko
M. S. Yenuchenko
182 Высокотемпературный дельта-сигма-АЦП
А. С. Коротков
Д. В. Морозов
М. М. Пилипко
М. С. Енученко

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Influence of a preliminary gamma ray irradiation on single event upsets in the memory devices arising at 14 MeV neutrons influence
V. P. Shukaylo
O. V. Tkachev
A. S. Kustov
K. D. Koksharova
187 Влияние предварительного облучения гамма-квантами на одиночные сбои в микросхемах памяти, возникающие при воздействии нейтронов энергии 14 МэВ
В. П. Шукайло
О. В. Ткачев
А. С. Кустов
К. Д. Кокшарова

VLSI set for building on-board spacecraft networks based on SpaceWire technology
D. V. Dymov
V. I. Enns
A. V. Enns
D. S. Kazaykin
V. V. Poleshchuk
A. S. Andreev
A. V. Leonova
190 Комплект СБИС для построения бортовых сетей SpaceWire
Д. В. Дымов
В. И. Эннс
А. В. Эннс
Д. С. Казайкин
В. В. Полещук
А. С. Андреев
А. В. Леонова

Algorithms and methods for functional control of FPGA
A. A. Ogurtsov
200 Алгоритмы и методы проведения функционального контроля ПЛИС
А. А. Огурцов

Designing and manufacturing mock-up microwave samples of circuit boards with crystals of vertical emitting lasers at a wavelength of D1 Cs (894.3 nm)
A. M. Ospennikov
A. G. Kuzmenkov
M. V. Petrenko
207 Разработка и изготовление макетных образцов СВЧ-плат с установленными кристаллами вертикально излучающих лазеров на длину волны D1 Cs (894,3 нм)
А. М. Оспенников
А. Г. Кузьменков
М. В. Петренко

Optimization of the mechanism of the requests buffering in the second-level cache memory
S. I. Aryashev
K. S. Bychkov
P. S. Zubkovsky
A. S. Podterebkov
211 Оптимизация механизма буферизации запросов в кеш-памяти второго уровня
С. И. Аряшев
К. С. Бычков
П. С. Зубковский
А. С. Подтеребков

Methods of detecting counterfeit electronic parts signs
I. P. Gorbachev
T. Yu. Korbankova
A. Ya. Koulibaba
A. A. Sashov
216 Способы обнаружения признаков контрафактной ЭКБ
И. П. Горбачев
Т. Ю. Корбанкова
А. Я. Кулибаба
А. А. Сашов

High-speed Heavy-Ion Tolerant CMOS Logic Circuit Design Features
Yu. M. Gerasimov
N. G. Grigoryev
A. V. Kobylyatskiy
Ya. Ya. Petrichcovich
D. K. Sergeev
220 Особенности проектирования сбоеустойчивых сверхбыстродействующих логических цепей КМОП СБИС СнК
Ю. М. Герасимов
Н. Г. Григорьев
А. В. Кобыляцкий
Я. Я. Петричкович
Д. К. Сергеев

Ring oscillators for standard cell certification and radiation tests for nanometer CMOS SoCs
Yu. M. Gerasimov
N. G. Grigoryev
A. V. Kobylyatskiy
Ya. Ya. Petrichcovich
D. K. Sergeev
229 Блоки кольцевых генераторов для исследования радиационных параметров и аттестации библиотек элементов нанометровых КМОП СБИС СнК
Ю. М. Герасимов
Н. Г. Григорьев
А. В. Кобыляцкий
Я. Я. Петричкович
Д. К. Сергеев

Influence of neutrons energy on single event cross section in powerful MOS transistors
V. P. Shukaylo
O. V. Tkachev
S. M. Dubrovskikh
T. V. Kupyrina
A. S. Kustov
O. A. Mingazov
237 Влияние энергии нейтронов на сечение одиночных радиационных эффектов в мощных МОП-транзисторах
В. П. Шукайло
О. В. Ткачев
С. М. Дубровских
Т. В. Купырина
А. С. Кустов
О. А. Мингазов

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Modeling electronic components and systems 241 **Моделирование электронных компонентов и систем**

Achieving transferability of software tests for functional co-verification of System-on-Chip projects
A. V. Andrianov
241 Обеспечение переносимости тестовых сценариев для функционального контроля СБИС «система на кристалле»
А. В. Андрианов

Questions of organizing (structuring) information for knowledge management System of radio-electronic industry
V. V. Alekseev
S. I. Bokov
A. I. Kolyadin
A. A. Chuprinov
246 Вопросы организации (структурирования) информации для системы управления знаниями радиоэлектронной отрасли
В. В. Алексеев
С. И. Боков
А. И. Колядин
А. А. Чупринов

Laboratory set-up for extracting models of electronic component base and developing radio-electronic equipment
A. V. Zaitsev
A. S. Isaev
P. V. Maslov
257 Построение лаборатории для экстракции моделей ЭКБ и разработки РЭА
А. В. Зайцев
А. С. Исаев
П. В. Маслов

SoC's clock control model for analysis automation
I. S. Kolbasov
F. M. Putrya
262 Модель для автоматизации анализа системы тактирования СнК
Я. С. Колбасов
Ф. М. Путря

The fundamental parametric approach to synthesis of electronic systems
I. M. Koldaev
265 Фундаментальный параметрический подход к синтезу электронных систем
И. М. Колдаев

Specificity of developing Electronic design automation or FPGA design and verification
N. M. Malyshev
S. V. Rybkin
270 Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС
Н. М. Малышев
С. В. Рыбкин

Dynamic characteristics of modern high speed synchronization systems
V. E. Martirosov
G. A. Alekseev
277 Динамические характеристики современных высокоскоростных систем синхронизации
В. Е. Мартиросов
Г. А. Алексеев

Methodological approach to assessing the technical level of domestic electronic component base
A. S. Afanasyev
S. I. Bokov
D. V. Matyukhin
S. S. Miloserdov
A. P. Studenovsky
286 Методический подход к оценке технического уровня отечественной электронной компонентной базы
А. С. Афанасьев
С. И. Боков
Д. В. Матюхин
С. С. Милосердов
А. П. Студеновский

Calculating CVC betavoltaic microbatteries using a universal TCAD model
K. O. Petrosyants
A. A. Pugachev
I. A. Kharitonov
291 Расчет ВАХ бета-вольтаических микробатарей с использованием универсальной TCAD-модели
К. О. Петросянц
А. А. Пугачёв
И. А. Харитонов

PLL Macromodelling using full schematic diagram phase detector circuits
M. M. Gourary
M. M. Zharov
L. P. Ionov
I. I. Muhin
S. G. Rusakov
I. M. Ten
S. L. Ulyanov
295 Макромоделирование схемы ФАПЧ с использованием полной принципиальной схемы фазового детектора
М. М. Гурарий
М. М. Жаров
Л. П. Ионов
И. И. Мухин
С. Г. Русаков
И. М. Тен
С. Л. Ульянов

MOSFET SPICE models with account for aging effects
I. A. Kharitonov
300 SPICE-модели МОПТ, учитывающие эффекты старения
И. А. Харитонов

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Developing SPICE-model of MOS-Varactor 308 Разработка SPICE-модели МДП-варактора
D. S. Shipitsin *Д. С. Шипицин*
A. G. Potupchik *А. Г. Потупчик*
A. V. Shemyakin *А. В. Шемякин*

Microwave integrated circuits and modules 314 СВЧ интегральные схемы и модули

Design and technological features of creating a power amplifier based on CMOS technology with design standards of 90 nm 314 Конструктивно-технологические особенности создания усилителя мощности на основе КМОП-технологии с проектными нормами 90 нм
R. Yu. Mussenov *Р. Ю. Мусенов*
N. M. Gorshkova *Н. М. Горшкова*
T. V. Solokhina *Т. В. Солохина*
D. V. Skok *Д. В. Скок*

The main factors affecting the amplitude and phase stability of pulsed microwave power amplifiers for bipolar transistors, and methods for their compensation 318 Основные факторы, влияющие на амплитудно-фазовую стабильность импульсных СВЧ-усилителей мощности на биполярных транзисторах, и методы их компенсации
B. V. Emelianov *Б. В. Емельянов*

Developing microwave monolithic integrated millimetre wave band circuits on GaAs for new generation information and communication systems (5G) 321 Разработка СВЧ монолитных интегральных схем миллиметрового диапазона на основе GaAs для применения в современных информационно-коммуникационных системах нового поколения (5G)
E. V. Erofeev *Е. В. Ерофеев*
D. A. Shishkin *Д. А. Шишкин*
V. V. Kurikalov *В. В. Курикалов*
A. V. Kogai *А. В. Когай*
I. V. Fedin *И. В. Федин*

Research on microwave attenuators parameters taking into account the influence of structural and technological bases 325 Исследование параметров СВЧ-аттенюаторов с учетом влияния конструктивно-технологических базисов
A. D. Kalenov *А. Д. Калёнов*
V. V. Repin *В. В. Репин*
I. I. Mukhin *И. И. Мухин*

An Automatic GaAs pHEMT small-signal modeling algorithm and its implementation in an EDA 330 Алгоритм автоматического построения малосигнальной модели GaAs pHEMT-транзистора и его реализация в САПР
A. A. Kalentyev *А. А. Калентьев*
A. S. Salnikov *А. С. Сальников*
A. A. Popov *А. А. Попов*
D. V. Bilevich *Д. В. Билевич*
I. M. Dobush *И. М. Добуш*
A. E. Goryainov *А. Е. Горяинов*
T. N. Fail *Т. Н. Файль*

Design of High-Precision Microwave Quadrature Modulators and Demodulators and Research on Adjusting Dynamic Parameters Using Digital Control Possibility 337 Проектирование высокоточных СВЧ квадратурных модуляторов и демодуляторов и исследование возможности подстройки динамических параметров с помощью цифровой регулировки
I. I. Mukhin *И. И. Мухин*
R. S. Shabardin *Р. С. Шабардин*
L. V. Nedashkovskiy *Л. В. Недашковский*
D. N. Morozov *Д. Н. Морозов*

A complex of basic technological processes for the production of microwave high-power field-effect transistors based on GaN and GaAs using domestic equipment 343 Комплекс базовых технологических процессов для получения мощных полевых транзисторов и МИС СВЧ-диапазона на основе GaN и GaAs с использованием отечественного оборудования
A. N. Alexeev *А. Н. Алексеев*
S. I. Petrov *С. И. Петров*

Research on gallium nitride low-noise amplifiers at cryogenic temperatures 347 Исследование нитрид-галлиевых малошумящих усилителей при криогенных температурах
D. G. Alipa *Д. Г. Алипа*
V. V. Krasnov *В. В. Краснов*
V. M. Minnebaev *В. М. Миннебаев*
A. V. Redka *А. В. Редька*
Yu. V. Fedorov *Ю. В. Федоров*

IN THE ISSUE СОДЕРЖАНИЕ

Microwave reflectometry of n-MOS SOI transistors 353 СВЧ-рефлектометрия n-МОП КНИ-транзисторов
V. P. Timoshenkov *В. П. Тимошенков*
A. I. Khlybov *А. И. Хлыбов*
D. V. Rodionov *Д. В. Родионов*
N. A. Shelepin *Н. А. Шелепин*
A. V. Seletskiy *А. В. Селецкий*

GaAs digital control drivers 356 Цифровые драйверы управления на основе GaAs
V. V. Kurikalov *В. В. Курикалов*
E. V. Sapozhnikov *Е. В. Сапожников*
D. S. Khokhol *Д. С. Хохол*

Developing microwave filters based on bulk acoustic waves 359 Разработка СВЧ-фильтров на основе объемных акустических волн
M. Yu. Dvoesherstov *М. Ю. Двоешерстов*
A. L. Dudin *А. Л. Дудин*
S. V. Kazimirsky *С. В. Казимирский*
N. I. Katsavets *Н. И. Кацавец*
V. P. Chaly *В. П. Чалый*
I. V. Shukov *И. В. Шуков*

«ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес»
Научно-технический журнал, посвященный широкому спектру вопросов в области разработки и изготовления электронной и радиоэлектронной аппаратуры и ее компонентов, а также отраслевых тенденций и состояния рынка. Журнал ориентирован как на руководителей различного уровня, так и на научных и инженерно-технических работников в сфере проектирования и производства электроники, а также в смежных областях.
ISSN: 1992-4178

«ПЕРВАЯ МИЛЯ Last Mile»
Научно-технический журнал, посвященный технологиям и бизнесу телекоммуникаций, производства кабелей связи, телевизионного вещания, информационной безопасности. Особое внимание уделяется сетям широкополосного доступа и локальным телекоммуникационным сетям.
ISSN: 2070-8963

«ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА»
Журнал, посвященный формированию цифровой экономики в РФ в концептуальном, институциональном и техническом аспектах. Новостные, аналитические и экспертные материалы.

«НАНОИНДУСТРИЯ»
Научно-технический журнал, посвященный наноматериалам, наноэлектронике, нанодатчикам и наноустройствам, диагностике наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнологиям и применению нанотехнологий в медицине.
ISSN: 1993-8578

«АНАЛИТИКА»
Межотраслевой научно-технический журнал о создании, изучении и применении новых веществ и материалов. Журнал посвящен инновационным междисциплинарным решениям и технологиям в химии и нефтехимии, науках о жизни, материаловедении, нанотехнологиях.
ISSN: 2227-572X

«ФОТОНИКА»
Научно-технический журнал по фотонным и оптическим технологиям, оптическим материалам и элементам, используемым в оптических системах, оборудовании и станках.
ISSN: 1993-7296

«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»
Отраслевой научно-технический журнал, комплексно рассматривающий проблемы станкоинструментальной промышленности.
ISSN: 2499-9407

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
www.technosphera.ru

УДК 621.397.01 DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.291.294

РАСЧЕТ ВАХ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИХ МИКРОБАТАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОЙ TCAD-МОДЕЛИ

CALCULATING CVC BETAVOLTAIC MICROBATTERIES USING A UNIVERSAL TCAD MODEL

ПЕТРОСЯНЦ КОНСТАНТИН ОРЕСТОВИЧ
kpetrosyants@hse.ru

ПУГАЧЁВ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ХАРИТОНОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

PETROSYANTS KONSTANTIN O.
kpetrosyants@hse.ru

PUGACHEV ANDREY A.

KHARITONOV IGOR A.

National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Department of Electronics Engineering)
34 Tallinskaya St., Moscow, 123458, Russia

Представлена TCAD-модель кремниевого бета-вольтаического элемента для исследования зависимости характеристик элемента от его объемной структуры. Для имитации результатов генерации электронно-дырочных пар при воздействии излучения от источника бета-частиц применялась настроенная модель оптической генерации, имеющаяся в TCAD. Проведено исследование зависимости вольт-амперных характеристик бета-вольтаического элемента от профиля легирующей примеси, температуры и типа полупроводникового материала для источника излучения Ni-63.

Ключевые слова: бета-вольтаический элемент; TCAD; вольт-амперная характеристика.

The paper presents TCAD-silicon betavoltaic element model for studying cell characteristics depending on its two- and three-dimensional structures. To simulate the results of electron-hole pairs generation under exposure to radiation from the source of beta particles the tuned optical generation model, available in TCAD has been used. The authors have researched dependencies of the current-voltage characteristics of the betavoltaic element on structure doping profile, temperature and type of semiconductor material for Ni-63 radiation source.

Keywords: betavoltaic element; TCAD; current-voltage-characteristic.

Элементы питания с длительным сроком работы очень актуальны для многих автономных устройств — интеллектуальных датчиков, спутниковых систем, медицинских устройств и других. Наиболее перспективными для их создания являются микроминиатюрные источники питания на основе радиоактивных изотопов, трансформирующих их энергию в электрический ток — БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ [1–2]. Такие элементы питания могут быть изготовлены на различных материалах — Si, SiC, Ge. Важнейшими характеристиками источников, применяемых в автономных устройствах с длительным сроком работы, являются величины удельной мощности (тока) и (или) время автономной работы. Для бета-вольтаических элементов наиболее критическими являются именно величины удельной мощности и эффективность бета-вольтаического преобразования [1–2]. Этот класс источников питания активно исследуется как с помощью моделирования, так и путем изготовления и анализа тестовых образцов российскими и зарубежными разработчиками [1–4].

Большинство исследований основано на аналитических моделях расчета характеристик бета-вольтаического элемента, и только некоторые работы посвящены его приборно-технологическому моделированию, причем описание особенностей TCAD-моделей в данных работах отсутствует. Хорошо известно, что после соответствующей калибровки TCAD-модель позволяет моделировать зависимости характеристик бета-вольтаического элемента от различных параметров структуры: размеров, топологии, профиля легирующих примесей, внутренних физических параметров материала и других физико-топологических характеристик. Одним из важных моментов является учет деградации структуры бета-вольтаического источника под влиянием радиационных факторов. Это может быть сделано путем расширения возможностей TCAD-моделей, разработанных в [6]. Основной задачей работы является «настройка» TCAD для моделирования бета-вольтаического элемента.

Новизна предлагаемой модели бета-элемента состоит в имитации процесса генерации электронно-дырочных пар от поглощения бета-частиц с помощью оптической генерации. Решение задачи задания скорости генерации с последующим применением двух- или трехмерных моделей различных физических процессов в объеме полупроводника позволяет строить вольт-амперные характеристики бета-вольтаического элемента с учетом различных факторов.

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ — АНАЛОГА ИСТОЧНИКА БЕТА-ЧАСТИЦ

Первым шагом TCAD-моделирования является подбор мощности и длины волны источника видимого излучения по критерию совпадения объемных распределений скоростей фотогенерации

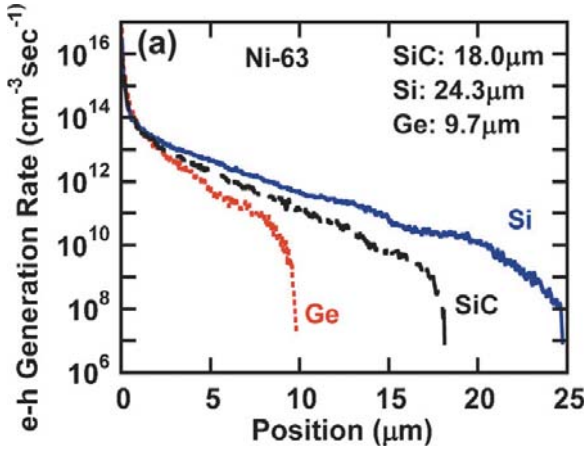

Рис. 1. Распределения скорости генерации от Ni-63 для различных материалов [4]. В зеленом овале — область подбора скорости фотогенерации

Fig. 1. Generation rates dependence on Ni-63 for Si and SiC from [4]. The green oval depicts the volumes area for visible source selection

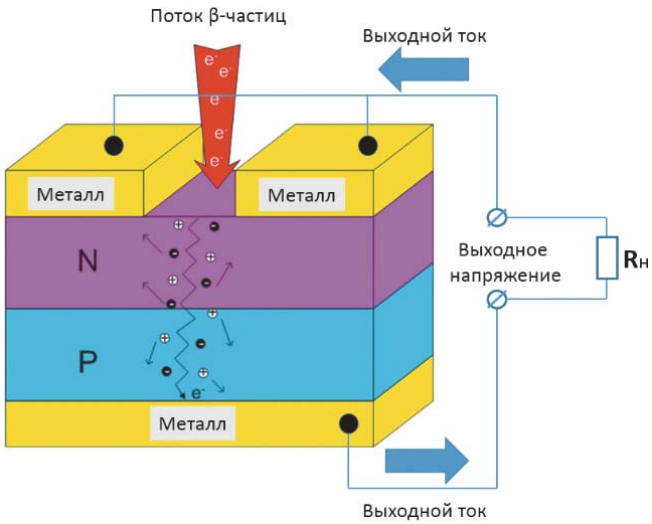

Рис. 2. Модель структуры бета-вольтаического элемента [4] и схема его включения

Fig. 2. Cross-section of the betavoltaic element (a) and doping profile (b) of betavoltaic source element for TCAD simulation [4]

и генерации от поглощения бета-излучения, которое в данном случае должно быть известно из экспериментов или из достаточно точного моделирования с помощью специализированных программных пакетов. На рис. 1 показаны зависимости скорости генерации от Ni-63 из [4]. В овале показана область значений, для которой проводился подбор скорости фотогенерации.

Для приведенных зависимостей для Si подобраны значения мощности и длиной волны видимого источника излучения: $P = 4{,}33 \cdot 10^{-7}$ Вт/см^2 и $\lambda = 450$ нм, при этом расхождение значений скоростей фотогенерации в диапазоне координат 0,5–2,5 мкм от поверхности полупроводника составляет менее 10 %.

Аналогичные параметры были подобраны для других источников и материалов.

МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

На рис. 2 показана модель структуры бета-вольтаического элемента, аналогичная [4].

Для такого элемента были созданы два варианта модели: со ступенчатым и гауссовым распределениями примесей по глубине полупроводника. Соотношение между распределениями показано на рис. 3.

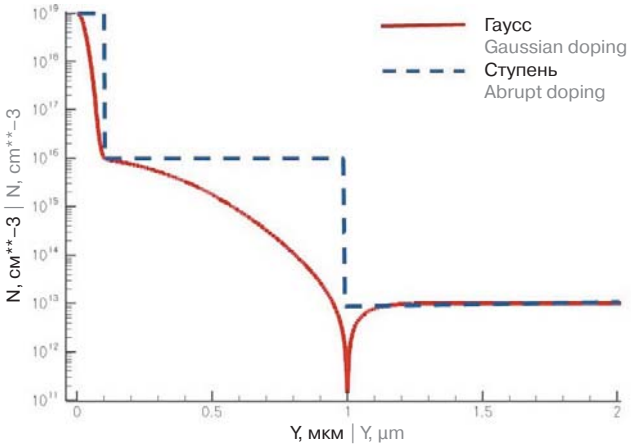

Рис. 3. Два варианта распределения примеси в модели бета-вольтаического элемента

Fig. 3. Two variants of doping profiles for betavoltaic element with abrupt doping distribution

Batteries with a long life are extremely relevant for many stand-alone devices: smart sensors, satellite systems, medical devices and so on. The most promising for creating them are micro-miniature power sources based on radioactive isotopes, transforming their energy into electric current — BETAVOLTAIC ELEMENTS [1–2]. Such batteries can be manufactured in different materials: Si, SiC, Ge. The most important characteristics of the sources used in standalone devices with long life, are power density value (V) and/or the battery life. For betavoltaic elements the value of specific capacity and efficiency betavoltaic transformation are most critical [1–2].

Most studies are based on analytical models of calculating betavoltaic element characteristics, and only some are devoted to its device-modeling technology, without any description of TCAD-work patterns [1–5]. It is well known that after appropriate calibration TCAD-model can simulate the betavoltaic element characteristics dependcies on structure's different parameters: size, topology, dopants profile, internal physical parameters of the material and other physical and topological parameters. One important consideration is checking betavoltaic source structure degradation due to radiation factors. This can be done by empowering TCAD-models developed in [6].

The novelty of the proposed beta cell model is to simulate the process of generation of electron-hole pairs upon absorption of beta particles by optical generation. Solution of the problem allows constructing current-voltage characteristics of betavoltaic element taking into account various factors.

The first step of TCAD-modeling is the selection of the power and wavelength of visible wavelength radiation source according to the criterion of coincidence of volume distributions of photo generation velocities and generation from the absorption of beta radiation, which in this case must be known. Figure 1 demonstrates the generation rates

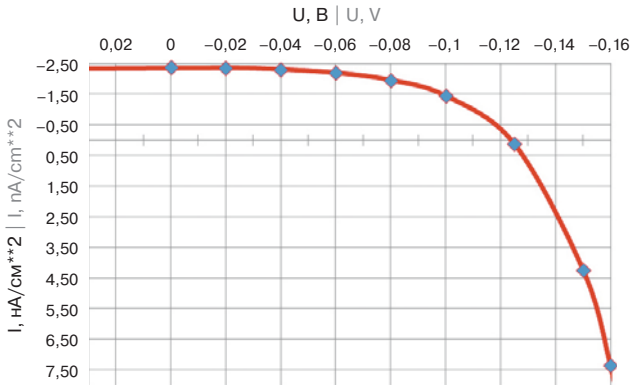

Рис. 4. Вольт-амперная характеристика бета-вольтаического элемента со ступенчатым распределением примеси

Fig. 4. The current-voltage characteristic of the betavoltaic element

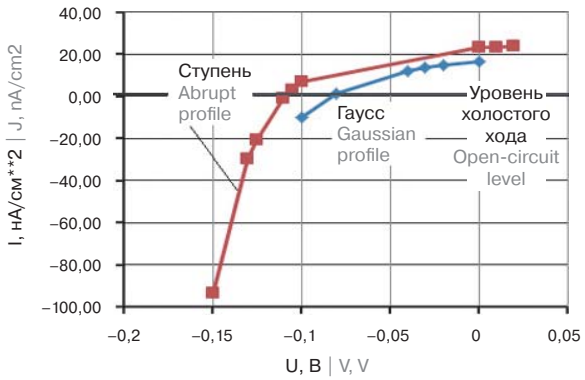

Рис. 5. Фрагменты ВАХ элементов со ступенчатым и гауссовым профилями примесей. Сравнение Uxx

Fig. 5. The current-voltage characteristic of the betavoltaic element

ПОСТРОЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

После подбора параметров источника излучения видимого света, дающего скорость генерации, аналогичную приведенной в [4], была рассчитана вольт-амперная характеристика элемента с площадью источника бета-излучения 1×10 мкм^2, которая показана на рис. 4.

После отработки методики моделирования были исследованы зависимости вольт-амперных характеристик бета-вольтаического элемента от модели профиля легирующей примеси, температуры и типа полупроводникового материала.

На рис. 5 дано сравнение фрагментов ВАХ источников с моделями структуры со ступенчатым и гауссовым профилями примесей, демонстрирующее расхождение значений напряжения холостого хода и указывающее на необходимость использования моделей с профилями примесей, с высокой точностью воспроизводящими реальные.

На рис. 6 представлены температурные зависимости напряжения холостого хода и тока короткого замыкания для структуры с гауссовым распределением примесей.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными из [5]: погрешность температурной чувствительности для Uxx составляет 17 %, а Iкз — всего 4 %.

На рис. 7 представлены ВАХ моделей бета-вольтаических элементов, изготовленных на кремнии и карбиде кремния.

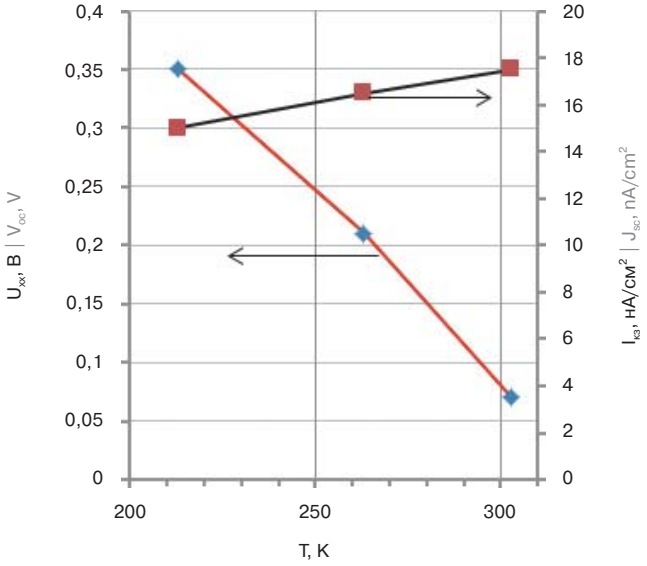

Рис. 6. Температурные зависимости Uxx и Iкз

Fig. 6. The temperature dependences of open-circuit voltage and short-cut current of the betavoltaic element

Полученные результаты, в частности напряжения холостого хода, также хорошо согласуются с данными [4, 5].

dependencies on Ni-63 in silicon from [4]. The oval depicts the area of generation rate values for visible wavelength radiation source selection.

For Fig. 1 generation rate simulation in Si the parameters of visible radiation source are as follows: source power $P = 4.33 \cdot 10^{-7}$ W/sm^2 and wavelength $\lambda = 450$ nm. For oval depicted region the error for generation rate simulation is smaller than 10 %.

In the second step we construct the model of betavoltaic element structure through the technological simulation or through the structure editor tool.

Figure 2 presents the two-dimensional structure (*a*) and doping profile (b) of betavoltaic element (from [4]) for TCAD simulation. The abrupt doping profiles of diffusion layers were used for simplicity.

Two models of structure were developed for this element: with abrupt and Gaussian doping distribution. Those doping profiles are shown on Fig. 3.

In the third step, after selecting parameters of a source of visible light radiation authorizing generation rate similar to that described in [4], the current-voltage characteristic of the source of beta radiation with an area of 1×10 μm^2, which is shown in Fig. 4. was calculated.

After the simulation techniques were tested the current-voltage characteristics dependencies of the betavoltaic element on doping profile model, temperature, and type of semiconductor material were calculated and investigated.

The CVC for abrupt and Gaussian doping profiles are shown in Fig. 5. This result demonstrates the great mismatch error for open-source voltages. The Gaussian profiles are preferable for exact simulations.

The temperature dependence of open-circuit voltage and short-cut current for Gaussian doping profile structure is demonstrated on Fig. 6. Those results are in good agreement

Таким образом, подход, примененный для моделирования бета-вольтаических элементов на основе Si и SiC-показывает свою состоятельность и может быть применен для исследования конструкций бета-вольтаических элементов с учетом различных внешних факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы считают, что в данной работе предложен и реализован новый подход к физико-топологическому моделированию бета-вольтаических элементов. Суть подхода состоит в имитации процесса генерации электронно-дырочных пар от поглощения бета-частиц с помощью оптической генерации. Основной задачей такого подхода является подбор параметров источника видимого излучения. Данный подход позволяет отказаться от сложных моделей поглощения бета-излучения и снимает ограничения на исследуемые конструкции элемента.

Работа выполнена в рамках проекта программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ВШЭ) ТZ-99 2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L., et al. *A review of nuclear batteries* // Prog. Nucl. Energy 75, 2014. P. 117–148.
2. Olsen L., Cabauy P., B. Elkind 2012, *Betavoltaic power sources* // Phys. Today 65. P. 35.

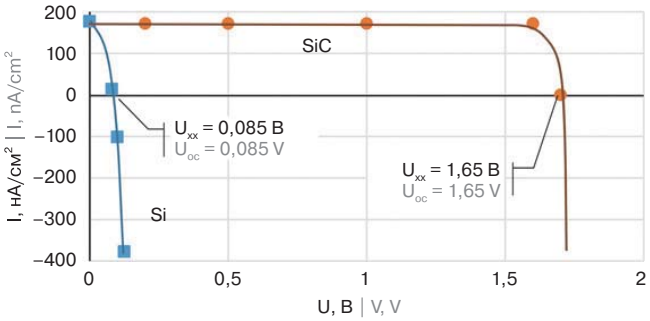

Рис. 7. ВАХ бета-вольтаических элементов на основе Si и SiC
Fig. 7. CVCs for Si and SiC betavoltaic elements

3. Bormashov V.S., Troschiev S.Yu., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V. et al. *High power density nuclear battery prototype based on diamond Schottky diodes* // Diamond & Related Materials 84 (2018). P. 41–47.
4. Zhang K., Gui G., Pathak P., Seo J.-H., Blanchard J.P., & Ma Z. *Quantitative modeling of betavoltaic microbattery performance* // Sensors and Actuators A: Physical, 240, 2016. P. 131–137.
5. Wang H. et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* // B, 2015. Vol. 359. P. 36–43.
6. Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V., Popov D.A. *Effective Radiation Damage Models for TCAD Simulation of Silicon Bipolar and MOS Transistor and Sensor Structures* // Sensors and Transducers, 2018. Vol. 227. № 11. P. 42–50.

with data from [5]: error of temperature sensitivity for U_{oc} is 17%, and for I_{sc} is only 4%.

Figure 7 demonstrates the CVCs for silicon and silicon-carbide betavoltaic elements. The open-source voltage levels for those structures are in good agreement with data from [4, 5] too.

Thus, the results of our TCAD betavoltaic model testing confirm the adequacy of proposed approach for betavoltaic elements structures investigation and development with due account of various external factors.

CONCLUSION

The authors believe that this paper proposed and implemented a new approach to physical and topological modeling of betavoltaic elements. The approach consists in simulating the process of generation of electron-hole pairs upon absorption of beta particles by optical generation. The main objective of this approach is the selection of the visible light source parameters. This approach makes it possible to do away with complex patterns of absorption of beta radiation and removes restrictions on the design of the investigated element.

Work carried out within the framework of TZ-99 Basic Research Program of the National Research University Higher School of Economics (HSE) 2019.

REFERENCES

1. Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L., et al. *A review of nuclear batteries* // Prog. Nucl. Energy 75, 2014. P. 117–148.
2. Olsen L., Cabauy P., Elkind B. *Betavoltaic power sources* // Phys. Today 65, 2012 P. 35.
3. Bormashov V.S., Troschiev S.Yu., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V. et al. *High power density nuclear battery prototype based on diamond Schottky diodes* // Diamond & Related Materials 84 (2018). P. 41–47.
4. Zhang K., Gui G., Pathak P., Seo J.-H., Blanchard J.P., & Ma Z. *Quantitative modeling of betavoltaic microbattery performance* // Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 240. P. 131–137.
5. Wang H. et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* // B, 2015. Vol. 359. P. 36–43.
6. Petrosyants K.O., Kozhukhov M.V., Popov D.A. *Effective Radiation Damage Models for TCAD Simulation of Silicon Bipolar and MOS Transistor and Sensor Structures* // Sensors and Transducers, 2018. Vol. 227. № 11. P. 42–50.

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
www.technosphera.ru