

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА-2020

Ш К О Л А
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



Международный форум «Микроэлектроника-2020»

Школа молодых ученых «Микроэлектроника-2020»

XIII Международная конференция «Кремний-2020»

XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе

Республика Крым,
г. Ялта, пгт Гурзуф
21-25 сентября 2020 г.

Отделение нанотехнологий и информационных технологий
Российской академии наук (ОНИТ РАН)
Научный совет ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы элементной
базы информационно-вычислительных и управляющих систем
и материалов для ее создания»
Консорциум «Перспективные материалы и элементная база
информационных и вычислительных систем»
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт
молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2020»
ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2020»
XIII Международная конференция «Кремний – 2020»
XII Школа молодых ученых и специалистов
по актуальным проблемам физики, материаловедения,
технологии и диагностики кремния,
нанометровых структур и приборов на его основе**

Республика Крым, г. Ялта, пгт. Гурзуф,
санаторий «Гурзуф Центр»
21–25 сентября 2020 г.

*Под редакцией члена-корреспондента РАН,
профессора Е.С. Горнева*



МОСКВА – 2020

УДК 621.38
ББК 32.844.1
М43

*Под редакцией
члена корреспондента РАН, профессора Е.С. Горнева*

М43 **Международный форум «Микроэлектроника – 2020». Школа молодых ученых «Микроэлектроника – 2020. XIII Международная конференция «Кремний – 2020». XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе : Сборник тезисов : Республика Крым, г. Ялта, 21–25 сентября 2020 г. / Под ред. Е.С. Горнева. – Москва : МАКС Пресс, 2020. – 402 с. : ил.**

ISBN 978-5-317-06470-9

e-ISBN 978-5-317-06489-1

<https://doi.org/10.29003/m1476.Silicon-2020>

В выпуске представлены тезисы докладов XIII Международной конференции «Кремний – 2020» и XII Школы молодых ученых по актуальным проблемам физики и технологии кремниевой электроники и нанометровых приборов, освещающие актуальные темы разработки процессов создания перспективной элементной базы и новых путей её использования. Кроме традиционных тем исследования процессов в объёме кремния, на поверхности и на границах раздела, их влияния на элементы кремниевой электроники, представлены и новые перспективные направления, такие как создание и исследование нейроморфных сетей, как ключевого элемента систем искусственного интеллекта, а также исследования в области создания и моделирования квантовых объектов построения элементной базы фотоники и оптоэлектроники. Представлены также доклады, затрагивающие практические вопросы построения моделей и развития систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: микроэлектроника, кремний, материаловедение, нанотехнологии, фотоника, оптоэлектроника, нейроморфные системы, моделирование.

УДК 621.38
ББК 32.844.1

ISBN 978-5-317-06470-9

© Авторы статей, 2020
© Горнев Е.С., общ. ред., 2020
© Оформление. ООО «МАКС Пресс», 2020

Nano- and Information Technology Department of Russian Academy of Science
(NITD RAS)

NITD RAS Scientific Council «Control systems components fundamentals»

Consortium «Computation systems components and advanced materials»

JSC «MERI»

INTERNATIONAL FORUM “MICROELECTRONICS – 2020”
YOUNG SCIENTISTS SCHOLARSHIP “MICROELECTRONICS – 2020”

XIII International Conference «Silicon – 2020»

**XII Young scientists scholarship
for silicon nanostructures and devices physics,
material science, process and analysis**

Crimea Republic, Yalta, Gurzuf,

«Gurzuf Center» Resort

September 21–25, 2020

Edited by Correspondent Member of RAS

Professor E. Gornev



MOSCOW – 2020

UDC 621.38
BBC 32.844.1

Edited by
Correspondent Member of RAS Professor E. Gornev

International Forum “Microelectronics – 2020”. Joung Scientists Scholarship “Microelectronics – 2020”. XIII International conference «Silicon – 2020». XII young scientists scholarship for silicon nanostructures and devices physics, material science, process and analysis : Abstract book : Crimea Republic, Yalta September 21–25, 2020 / Ed. by E.S. Gornev. – Moscow : MAKSPress, 2020. – 402 p. : ill.

ISBN 978-5-317-06470-9

e-ISBN 978-5-317-06489-1

<https://doi.org/10.29003/m1476.Silicon-2020>

This issue provides abstracts of XIII International Conference «Silicon – 2020» and XII Young Scientists Scholarship participants presentations devoted to the actual problems of silicon electronics and nano-devices. Presentations touch issues of advanced electronic elements, their fabrication processes and the way of application. Beside traditional topics of silicon bulk, surface and interface interaction influence upon semiconductor devices properties the Book presents some novel themes like research and development of neuromorphic networks as a basic part for artificial intelligence systems. Quantum dots models and research for optoelectronics and photonics benefit are presented as well. As a real applications presentations for electronics model generation and automation design system development may be found.

Key words: microelectronics, silicon, materials science, nanotechnology, photonics, optoelectronics, neuromorphic systems, simulation.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели программного комитета:

Горнев
Евгений Сергеевич,
член-корреспондент РАН

заместитель руководителя
приоритетного технологиче-
ского направления,
АО «НИИМЭ»

Кведер
Виталий Владимирович,
академик РАН

научный руководитель,
ИФТТ РАН

Члены программного комитета:

Двуреченский
Анатолий Васильевич,
член-корреспондент РАН

заведующий лабораторией
неравновесных
полупроводниковых систем,
ИФП СО РАН

Гимпилевич
Юрий Борисович,
доктор технических наук

директор Института
радиоэлектроники
и информационной
безопасности,
ФГАОУ ВО
«Севастопольский
государственный
университет»

Глумова
Марина Всеволодовна,
кандидат физико-
математических наук

директор Физико-
технического института,
Крымский федеральный
университет
имени В.И. Вернадского

Итальянцев
Александр Георгиевич,
доктор физико-
математических наук

начальник отдела
функциональной
электроники,
АО «НИИМЭ»

Критская
Татьяна Владимировна,
доктор технических наук

профессор,
Slovenia-Pirado d.d.o.
(Республика Словения)

Мурашев
Виктор Николаевич,
доктор технических наук

Петросянц
Константин Орестович,
доктор технических наук

Путря
Михаил Георгиевич,
доктор технических наук

Рощупкин
Дмитрий Валентинович,
доктор физико-
математических наук

Тныштыкбаев
Курбангали Байназарович,
доктор технических наук

профессор,
НИТУ «МИСиС»

ординарный профессор,
МИЭМ НИУ ВШЭ

профессор,
НИУ МИЭТ

директор,
ИПТМ РАН

ведущий научный сотрудник
Якорного проекта
по программе
«Ученые мирового уровня»,
Автономная организация
образования
«Назарбаев Университет»
(Республика Казахстан)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели организационного комитета:

Тельминов Олег Александрович, кандидат технических наук	начальник лаборатории исследования нейроморфных систем, АО «НИИМЭ»
Иванов Владимир Викторович	заместитель начальника отдела проектирования фотошаблонов, АО «НИИМЭ»

Члены организационного комитета:

Кобелева Светлана Петровна, кандидат физико- математических наук	доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, НИТУ «МИСиС»
Колдаев Игорь Михайлович, кандидат физико- математических наук	ведущий специалист аппарата генерального директора, АО «НИИМЭ»
Ковалева Анна Николаевна, кандидат химических наук	начальник Управления по организации научно- исследовательской деятельности студентов, доцент, РТУ МИРЭА
Морозов Александр Юрьевич, кандидат физико- математических наук	научный сотрудник, ФИЦ ИУ РАН
Мошкарова Лилия Айратовна	младший научный сотрудник, АО «НИИМЭ»
Соколова Евгения Васильевна	инженер-конструктор, АО «НИИМЭ»

Жаворонкин
Юрий Геннадьевич

начальник отдела,
АО «НИИМЭ»

Крыловецкий
Владимир Васильевич

директор, ООО «ДЦО
«Жемчужный берег»

Новожилова
Ирина Борисовна

заместитель управляющего
делами, АО «НИИМЭ»

Парамонова
Елена Анатольевна

руководитель группы,
АО «НИИМЭ»

Смирнова
Людмила Владимировна

главный специалист,
АО «НИИМЭ»

Юденков
Владимир Анатольевич

управляющий делами,
АО «НИИМЭ»

СОДЕРЖАНИЕ

О Международной конференции «КРЕМНИЙ-2020»	23
Пленарная сессия	24
Кведер В.В. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ИНЖЕНЕРИИ ДЕФЕКТОВ В МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.....	24
Двуреченский А.В., Якимов А.И., Зиновьева А.Ф., Ненашев А.В., Зиновьев В.А. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КРЕМНИЕВЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ КОМПОНЕНТ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, НАНОФОТОНИКИ И СПИНТРОНИКИ.....	26
Критская Т.В., Шварцман Л.Я., Додонов В.Н., Кравцов А.А. НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЧИСТОТЫ.....	29
Петросянц К.О. ВВЕДЕНИЕ В TCAD И SPICE МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ БИС.....	35
K.B. Tynyshtykbayev, C. Spitas, K. Kostas, Z.Z. Insepov. GRAPHENE LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS ON POROUS SILICON	40
Секция 1 «Материаловедение кристаллического кремния: получение и очистка металлургического кремния, процессы роста из расплавов, химического осаждения из газовой фазы, аппаратура для роста»	45
Непомнящих А.И. ВЫСОКОЧИСТЫЙ РАФИНИРОВАННЫЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	45
Ерёмин В.П., Елисеев И.А. СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЯ В РОССИИ И МИРЕ, ЕГО РАФИНИРОВАНИЕ ДО ВЫСОКИХ МАРОК И «СОЛНЕЧНОГО» КАЧЕСТВА.	49
Кононенко О.В., Зотов А.В., Матвеев В.Н. ТУРБОСТРАТНЫЙ МУЛЬТИСЛОЙНЫЙ ГРАФЕН – ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФОТОДЕТЕКТОРОВ.....	53

Кобелева С.П., Щемеров И.В., Шарапов А.А., Юрчук С.Ю. УЧЁТ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПО СПАДУ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ОБРАЗЦАХ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ.	55
Аверкин А.И., Козлов В.А., Николаев В.И., Тимашов Р.Б., Федоров М.В., Шпейзман В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВЕРХТОНКИХ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СПОСОБАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ МАТЕРИАЛА ПЛАСТИН И ОБРАБОТКИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ	59
Редькин С.В., Мальцев П.П., Гамкрелидзе С.А. КУБИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ.....	62
Леньшин А.С., Барков К.А., Скопинцева Н.Г., Минаков Д.А., Середин П.В. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ КОЛОНКИ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ	68
Миланина К.И., Агафонов А.Н. ПЛАНАРНЫЕ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ КОЛОНКИ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ	71
Карабанов С.М., Суворов Д.В., Сливкин Е.В., Тарабрин Д.Ю., Теруков Е.И. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МГД ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА КРЕМНИЯ.....	73
Логинова Е.М., Лизункова Д.А. НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ	76
Полуэктова Н.А., Лизункова Д.А. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕМ	79

Полуэктова Н.А., Латухина Н.В., Чепурнов В.И., Павликов А.В., Головань Л.А. ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КАРБИДИЗИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ.	82
Абросимова Н.Д., Кипелкин И.М., Оболенский С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НИЗКОИНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ».....	85
Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С. СИНТЕЗ И ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА.....	87
Наумов А.В., Смирнова Н.Н., Старцев В.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАКАНСИОННЫХ КЛАСТЕРОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CZ-Ge ДИАМЕТРОМ 200 ММ, ВЫРАЩЕННЫХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ	91
Павлов А.А., Серикканов А.С., Турмагамбетов Т.С. ОЧИСТКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ОТ БОРА И ФОСФОРА ШЛАКОВЫМ РАФИНИРОВАНИЕМ.....	94
Шаропов У.Б. ЭЛЕКТРОННО-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЬ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН.....	97
Секция 2 «Атомные процессы на поверхности, границах раздела и в объеме кремния: дефекты, примесные атомы, гетерограницы»	101
Терехов В.А., Барков К.А., Нестеров Д.Н., Попов А.И., Баринов А.Д., Середин П.В., Голощапов Д.Л., Занин И.Е., Ивков С.А., Домашевская Э.П., Козаков А.Т., Никольский А.В. ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК SIPOS.....	101
Степина Н.П., Шумилин А.В., Бельтюков Я.М., Двуреченский А.В., Файнер Н.И. ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛЕНОК SiC _x Ny:Fe.	105

Зайцева Э.Г., Наумова О.В. СРАВНЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ С РАЗНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.	108
Р. Zukowski, Т. Koltunowicz, К. Czarnacka, Федотов А.К., Тысченко И.Е. ТРАНСПОРТ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЛЕНОК SiO ₂ С НАНОЧАСТИЦАМИ InSb	112
Тысченко И.Е. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ...	114
Попов В.П., Тысченко И.Е. СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИК- ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК ДЛЯ СВЧ, ФОТОННЫХ, НЕЙРОСЕТЕВЫХ И НАНО РАЗМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ	117
Пономарев С.А., Рогило Д.И. СЛОИСТЫЙ IN ₂ SE ₃ НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111) С ГИСТЕРЕЗИСАМИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	120
Золотухин Д.С., Голощапов Д.Л., Середин П.В., Мизеров А.М., Леньшин А.С. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БУФЕРНОГО СЛОЯ SiC/por-Si НА СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР GaN/SiC/Si(111).	123
Терехов В.А., Теруков Е.И., Ундалов Ю.К., Барков К.А., Середин П.В., Голощапов Д.Л., Занин И.Е., Домашевская Э.П. ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ НАНОКРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ КРС СПЕКТРОСКОПИИ В ПЛЕНКАХ α-SiO _x :H ПОСЛЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ.....	126
Петров А.С., Рогило Д.И. СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111) ПРИ АДСОРБЦИИ Sn В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ.....	130
Окулич Е.В., Окулич В.И., Тетельбаум Д.И. ОЦЕНКА ДОЗЫ АМОРФИЗАЦИИ КРЕМНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ЛЕГКИМИ ИОНАМИ	133

Орлов А.А., Резванов А.А., Гвоздев В.А., Кузнецов П.И., Серегин Д.С. ФОРМИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ БАРЬЕРОВ В СИСТЕМЕ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В МЕТОДЕ GAP FILLING.	136
Ромодин М.С., Баранов Г.В., Дорофеев А.А., Панасенко П.В., Федотов С.Д., Царев А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В КРЕМНИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СВЧ СИГНАЛА.	139
Мирошкин Я.А., Резванов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССЕ ГЛУБОКОГО КРИОГЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ.....	142
Девятков Э.В. ПЕРЕНОС ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ТОКА ПОВЕРХНОСТНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛОВ.....	145
Секция 3 «Нанотехнологии и тонкие пленки в кремниевой микроэлектронике».....	149
Домашевская Э.П., Терехов В.А., Занин И.Е., Барков К.А. ВОЗМОЖНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ФАЗЫ Al ₃ Si ПРИ ИОННО-ЛУЧЕВОМ И МАГНЕТРОННОМ НАПЫЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК Al-Si	149
Редькин С.В., Мальцев П.П., Гамкрелидзе С.А. ЛАЗЕРНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ФРАГМЕНТИРОВАНИЕ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ.....	152
Лозовой К.А., Дирко В.В. ОБОБЩЕННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ДВУМЕРНЫХ И НУЛЬМЕРНЫХ СТРУКТУР КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ.....	158
Кацюба А.В., Двуреченский А.В., Камаев Г.Н., Володин В.А., Кириенко В.В. РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЙ РОСТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК CaSi ₂	161
Антонов В.А., Попов В.П., Тарков С.М., Тыщенко И.Е. СТРУКТУРНО И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИ СОВЕРШЕННЫЕ ГЕТЕРОПАРЫ КРЕМНИЙ-САПФИР С HIGH-K МЕЖСЛОЙНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ.....	164

Долгополов В.М., Иракин П.А., Варакин В.М. УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ TSV СТРУКТУР.....	166
Горохов С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНЫХ КОНТАКТНЫХ ОКОН.....	170
Зюзин С.С., Горнев Е.С., Резванов А.А., Панин В.В. АТОМНО- СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ	173
Тихонова Е.Д., Горнев Е.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛА SPIN-ON-CARBON ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕТОДА САМОСОВМЕЩЕННОГО ДВОЙНОГО ПАТТЕРНИРОВАНИЯ.	176
Татаринцев А.А., Шишлянников А.В., Руденко К.В., Рогожин А.Е., Иешкин А.Е. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТОВ ЭЛЕКТРОННОГО РЕЗИСТА HSQ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ ПРОЯВЛЕНИЯ	179
Коханенко А.П., Дирко В.В., Лозовой К.А. ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ТОЛЩИНЫ ОСАЖДЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ РОСТЕ ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИИ	183
Кацюба А.В., Двуреченский А.В., Камаев Г.Н., Володин В.А., Кириенко В.В. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПЛЕНОК CaSi ₂ , ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ РАДИАЦИОННО- СТИМУЛИРОВАННОМ ЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ CaF ₂ НА Si	186
Секция 4 «Физика кремниевых квантово-размерных структур для нано- и оптоэлектроники, фотоники, спинтроники и логических элементов для квантовых вычислений».....	189
Терещенко А.Н., Королев Д.С., Хорошева М.А., Никольская А.А., Михайлов А.Н., Белов А.И., Тетельбаум Д.И. НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ.....	189

Двуреченский А.В., Зиновьев В.А., Зиновьева А.Ф., Ненашев А.В., Кацюба А.В., Мудрый А.В. УСИЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ Ge/Si КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА.....	192
Зиновьев В.А., Смагина Ж.В., Зиновьева А.Ф., Двуреченский А.В., Мудрый А.В. ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	196
Королев Д.С., Никольская А.А., Михайлов А.Н., Белов А.И., Конаков А.А., Муртазин Р.И., Павлов Д.А., Тетельбаум Д.И. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ИОННО- СИНТЕЗИРОВАННЫХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ ФАЗУ 9R-Si.	199
Кириенко В.В., Якимов А.И., Блошкин А.А., Двуреченский А.В., Уткин Д.Е. УСИЛЕНИЕ ФОТОТОКА КОМПОЗИТНЫМИ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТАПОВЕРХНОСТЯМИ В ФОТОПРИЕМНИКАХ НА БАЗЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge/Si. .	202
Смагина Ж.В., Зиновьев В.А., Степихова М.В., Рудин С.А., Родякина Е.Е., Новиков А.В., Двуреченский А.В. УПОРЯДОЧЕННЫЕ ГРУППЫ Ge(Si) КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА КНИ-ПОДЛОЖКАХ, ВСТРОЕННЫХ В ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ.....	205
Камаев Г.Н., Ашихмина М.А., Черкаев А.С. ПРОВОДИМОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ МЕЗАРЕЗИСТОРОВ В УСЛОВИЯХ ДЖОУЛЕВА РАЗОГРЕВА.....	208
Миннуллин Р.Т., Барабаненков М.Ю. СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ИЗ GESBTE НА ВОЛНОВОДЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ	211

Черкова С.Г., Володин В.А., Скуратов В.А., Кривякин Г.К., Камаев Г.Н. МОДИФИКАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ОТЖИГАМИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	215
Зиновьев В.А., Зиновьева А.Ф., Кацюба А.В., Володин В.А., Двуреченский А.В. ОСОБЕННОСТИ РОСТА СЛОЕВ CaSi_2 НА ПОДЛОЖКАХ $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$	218
Секция 5 «Моделирование процессов роста кремния и структур на его основе, применение TCAD и SPICE-моделей»	221
Евдокимов В.Л. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СЛОЕВ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ, НА МИКРОРЕЛЬЕФНУЮ ПОДЛОЖКУ	221
Орленсон В.Б., Мазинов А.С., Шевченко А.И. МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	224
Попов Д.А. TCAD МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ SELBOX И DSOI КМОП КНИ ЯЧЕЕК ПАМЯТИ.....	227
Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. SPICE модели СУБМИКРОННЫХ КМОП ТРАНЗИСТОРОВ В ДИАПАЗОНЕ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	229
Звягинцев Д.Е., Елисеева А.В., Куликов Н.А., Харитонов И.А., Самбурский Л.М. ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЦИФРОВЫЕ КМОП ИС.....	232
Шипицин Д.С., Потупчик А.Г., Шемякин А.В. ОСНОВНЫЕ ЭФФЕКТЫ БЛИЗОСТИ В ГЛУБОКО-СУБМИКРОННЫХ МОП- ТРАНЗИСТОРАХ И ПОДХОДЫ К ИХ УЧЁТУ В SPICE-МОДЕЛЯХ.	236
Коротких С.А., Новиков А.А., Ильин С.А. ВАЛИДАЦИЯ В КРЕМНИИ СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБИС.....	240

Константинов В.С., Итальянцев А.Г. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗ В ДИОКСИДЕ ГАФНИЯ.....	242
Шипицин Д.С., Потупчик А.Г., Яшин Г.А. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ СОЗДАНИИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ Н-ТИПА, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ КНИ 0.18 МКМ.....	247
Шипицин Д.С., Потупчик А.Г., Нуштаев А.В. ВЛИЯНИЕ ВЕОЛ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СХЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ КНИ250, КНИ180, КНИ90	251
Карабанов С.М., Серебряков А.Е., Беляков О.А., Суворов Д.В., Теруков Е.И. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОЛЮМИНИСЦЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАСТИН	254
Ларионов М.Ю., Соболев А.С., Резник А.Ю. МЕТАМАТЕРИАЛ С ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В RFID-МЕТКЕ.....	257
Секция 6 «Кремниевая электронная компонентная база для наноэлектроники, оптоэлектроники, силовой электроники, светоизлучающих структур, фотоприемников, микромеханики и сенсорики».....	261
Иванов Д.Н., Леонов А.В., Мурашев В.Н. ЭФФЕКТ ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗИ В ПОЛЕВОМ ЭЛЕМЕНТЕ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО КНИ МОП ТРАНЗИСТОРА.	261
Наумова О.В., Зайцева Э.Г., Асеев А.Л., Генералов В.М., Сафатов А.С. КРЕМНИЕВЫЕ НАНОПРОВОЛОЧНЫЕ СЕНСОРЫ С ДИЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АНАЛИТА.	264
Соловьев А.В. ЗАРУБЕЖНЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭКБ.....	267
Филиппов И.Ф., Вертегел В.В., Гимпилевич Ю.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА SI СВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ.	270

Науменко Д.В., Лысенко И.Е., Ежова О.А. ТРЕХОСЕВОЙ МЭМС АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ТОРСИОННЫЙ ПОДВЕСОВ.	273
Дученко Н.В., Поморев А.С., Харитонов С.А., Ковалевский Д.С., Ветров И.Л. АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ В КВАДРАТУРНЫХ МОДУЛЯТОРЕ И ДЕМОДУЛЯТОРЕ РАЗРАБОТАННЫХ ПО КМОП ТЕХНОЛОГИИ.	276
Чуйко А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА.	279
Соловьев А.А. РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО ПОЛНОГО НАБОРА ЛОГИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЭМС.	282
Михайлов В.Ю., Пронин А.А. РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ В ЕДИНОМ КОРПУСЕ.	285
Горчакова М.А., Кочетков Д.В. ЦИФРОВОЙ УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ПОДАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА ДЛЯ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА НА БАЗЕ КНИ 90НМ.	287
Баранцев А.С., Баранов Г.В., Волосов А.В., Нефедьев С.В., Россов А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАННЫХ В КРЕМНИЕВЫЙ ИНТЕРПОЗЕР КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ 3D СВЧ МОДУЛЕЙ.	290
Макиевский Ю.А. ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО- ПРОГРАММНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ СВЧ СХЕМАМИ В ППМ АФАР.	293
Скуратов И.Д., Панасенко П.В., Баранов Г.В., Балаклеяский Н.С. АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ. ..	296
Хрущева О.А. ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОВ НА РЕЗОНАНСНУЮ ЧАСТОТУ И ДАЛЬНОСТЬ СЧИТЫВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ МЕТКИ.	298
Эпов И.В. ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕМНОЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ UHF МЕТКИ.	301

Тярин А.С., Эннс А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА-ДЕЦИМАТОРА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ДЕЛЬТА-СИГМА АЦП.....	304
Дубовицкий К.А., Зубов И.А., Ермаков И.В. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В КМОП- ТЕХНОЛОГИИ 180 НМ.....	307
Кочетков Д.В., Белоусов Е.О., Моленкам К.М., Эннс А.В. ВЫСОКОЛИНЕЙНЫЙ СЕГМЕНТИРОВАННЫЙ 12-РАЗРЯДНЫЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВОИЧНО-ВЗВЕШЕННЫХ КЛЮЧЕЙ... 310	
Любавин К.Д., Лосевской А.Ю., Ермаков И.В. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ЧАСТИ RFID-МЕТКИ.	313
Шабанов А.А., Путря М.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ МИКРОСХЕМ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ НА ОСНОВАНИИ КРИТИЧЕСКОЙ СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	316
Секция 7 «Искусственный интеллект и нейроподобные системы».....	320
Панин Г.Н. РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ КРИСТАЛЛАХ ДЛЯ НЕЙРОПОДОБНЫХ СИСТЕМ.	320
Морозов А.Ю., Абгарян К.К., Ревизников Д.Л. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОМОРФНОЙ СЕТИ НА МЕМРИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С 1T1R КРОССБАР АРХИТЕКТУРОЙ.....	322
Макаров М.Э., Сапегин А.А., Королев Д.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ.	325

Шамин Е.С., Горнев Е.С., Жевненко Д.А., Мещанинов Ф.П., Кожевников В.С. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ МЕМРИСТОРА.	328
Мошкарлова Л.А., Тельминов О.А. МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ РЕКУРРЕНТНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ С ДОЛГОЙ КРАТКОСРОЧНОЙ ПАМЯТЬЮ.....	332
Березин А.А., Шахманова М.В., Иванов В.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭСКИЗА ФОТОШАБЛОНА.	335
Федотов М.И., Коротичский В.И., Ковешников С.В. РАЗРАБОТКА СЕЛЕКТОРНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ МАТРИЦ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ.	338
Ду Х. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕМРИСТОРА.	342
Окулич Е.В., Гусейнов Д.В., Королев Д.С., Белов А.И., Окулич В.И., Тетельбаум Д.И., Михайлов А.Н. ГИБКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОФОРМОВКИ И РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В МЕТАЛЛООКСИДНЫХ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВАХ, СОДЕРЖАЩИХ ФИЛАМЕНТЫ.	344
Ганыкина Е.А., Горнев Е.С., Резванов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В HFO2 RRAM-СТРУКТУРАХ В ПРОЦЕССЕ RESET.	347
Трясогузов П.Е., Теплов Г.С., Кузовков А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ЭФФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.	350
Матюшкин И.В., Рубис П.Д. КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ....	354

Кузнецов С.Е., Теплов Г.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕМРИСТОРА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ.....	358
Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ботиров К.А. ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdTe-SiO ₂ -Si.	361
Орлов О.М., Гисматулин А.А., Гриценко В.А. МЕМРИСТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ Si ₃ N ₄ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В НИХ.	364
Секция 8 «Системы автоматизированного проектирования»	369
Колдаев И.М. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОМПОНЕНТ КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	369
Балан Н.Н., Иванов В.В., Панкратов А.Л., Харченко Е.Л. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВКЛАДА ДОПУСКОВ НА КРИТИЧЕСКИЕ ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РИСУНКА ФОТОШАБЛОНА В БЮДЖЕТЫ ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ.....	372
Шарапов А.А., Шамин Е.С., Скуратов И.Д., Горнев Е.С. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАНОСТРУКТУР. ПОСТАНОВКА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧИ.....	375
Коротких С.А. МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ МАРШРУТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИБЛИОТЕК СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	378
Сахазик У.А., Соколова Е.В. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ БИБЛИОТЕКИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СМО.	380
Харченко Е.Л., Соколова Е.В. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ В MPW ЗАПУСК.....	383

Литаврин М.В., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООРГАНИЗАЦИИ DSA- ЛИТОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ.	386
Соколова Е.В., Харченко Е.Л. РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СЛОЯ КОНТАКТНЫЕ ОКНА ДЛЯ SMO.	389
Медведев К.А., Панкратов А.Л., Иванов В.В. КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ.	391
Петросянц К.О., Кожухов М.В. УНИФИЦИРОВАННАЯ SPICE- МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАДИАЦИИ.....	394
Моисеев Г.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ БЕСПЕРЕХОДНОГО ТРАНЗИСТОРА В СИСТЕМЕ TCAD.	397
Кузьмин П.А. Проектирование топологии микропроцессора с архитектурой MIPS.	400

О Международной конференции «КРЕМНИЙ-2020»

Конференция «Кремний-2020» является продолжением серии научных конференций, посвященных кремнию. Свою историю она ведет с общероссийского совещания по кремнию, проведенного в НИТУ «МИСиС» в 1999 году. С 2000 года параллельно с конференцией проводится Школа для молодых ученых и специалистов, призванная с помощью мастер-классов и круглых столов ознакомить будущих ученых с наиболее важными и интересными проблемами в области получения кремния и создания современных приборов на его основе.

За эти годы Мероприятие превратилось в основной форум, где ученые, представляющие академическое сообщество, вузы и промышленность России и стран зарубежья, обсуждают актуальные проблемы по всему кругу вопросов, включающему в себя получение металлургического и поликристаллического кремния, рост и материаловедение объемных кристаллов и тонких пленок кремния и родственных материалов, а также физику, технологию и диагностику наноструктур на их основе.

В 2020 году символический ключ организатора Мероприятия получило АО «НИИМЭ» и проводит его на побережье Черного моря в санатории «Гурзуф Центр».

121 доклад, для которых опубликовано 118 тезисов, представлены в пленарной сессии и в восьми направлениях: «Материаловедение кристаллического кремния», «Атомные процессы на поверхности, границах раздела и в объеме кремния», «Нанотехнологии и тонкие пленки в кремниевой микроэлектронике», «Физика кремниевых квантово-размерных структур», «Моделирование процессов роста кремния и структур на его основе, применение TCAD и SPICE-моделей», «Кремниевая электронная компонентная база» «Искусственный интеллект и нейроподобные системы», «Системы автоматизированного проектирования».

Проводятся 4 круглых стола: Школа молодых ученых по вычислительной литографии НИИМЭ, «Метрологическая база микроэлектроники», «SPICE-модели», «Машинное обучение».

УДК 538.9

<https://doi.org/10.29003/m1547.Silicon-2020/24-26>

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ИНЖЕНЕРИИ ДЕФЕКТОВ В МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Кведер Виталий Владимирович, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, научный руководитель института, ИФТТ РАН, г. Черноголовка, kveder@issp.ac.ru

Аннотация: Обсуждаются современные тенденции развития солнечной энергетики и особенности «инженерии дефектов» при производстве солнечных элементов из мультикристаллического кремния.

Ключевые слова: кремний, солнечная энергетика, инженерия дефектов

«Чистые технологии» и «возобновляемая энергетика» сейчас стали очень актуальными и быстро развивающимися областями технологического развития. Экспертные оценки показывают, что наиболее перспективными источниками электроэнергии являются солнечные фото-вольтаические преобразователи («солнечные элементы»). Производство солнечных элементов в течение предыдущих 20 лет росло экспоненциально, удваиваясь каждые два года, и сейчас оно уже достигло весьма заметных масштабов. Но это только начало и уже к 2040 г. солнечная энергетика займет лидирующие позиции в мировой энергетике (см. Рис.1). Это отражает давнее стремление людей найти, наконец, неиссякаемый источник энергии, безопасный для нашей планеты. А к 2050 г. солнечная и ветряная энергетика вместе взятые составят около 50% от всей мировой энергетики.

Сейчас более 90% солнечных элементов изготавливаются из кремния.

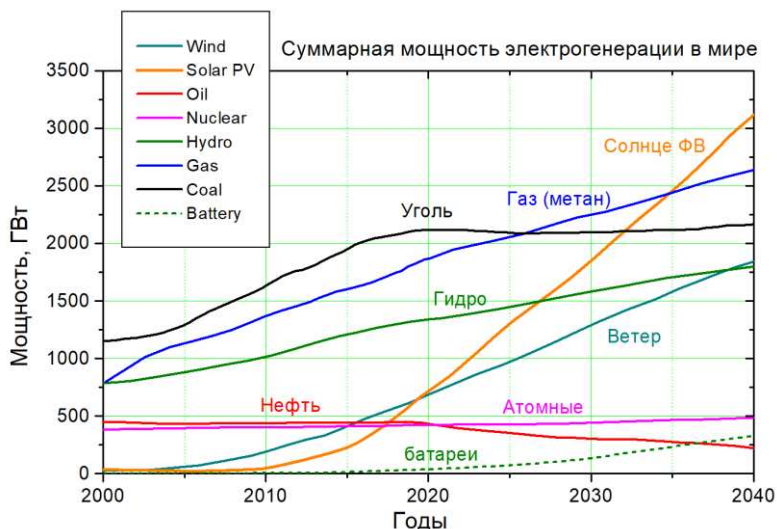


Рисунок 1 – Экспертный прогноз развития мировой энергетики до 2040 г. (использованы данные IEA [1])

Это связано с его большой распространенностью в природе, низкой токсичностью, достаточно большим КПД (20-23%) и весьма длительным сроком службы (порядка 50 лет). Серьезную конкуренцию кремнию могут составить солнечные элементы на основе перовскитов, но пока они еще сильно уступают кремнию по времени службы.

В этом докладе планируется обсудить современные тенденции развития солнечной энергетики и особенности «инженерии дефектов» при производстве солнечных элементов из мульти-кристаллического кремния [2], который сейчас составляет основную конкуренцию монокристаллическому кремнию.

В докладе приводится краткий обзор направлений исследований и полученных результатов.

Список использованных источников

1. «World Energy Outlook 2019»
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

2. Michael Seibt and Vitaly Kveder - Chapter 4 in "Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications", John Wiley & Sons Ltd, ISBN 9780470661116, (2012).

MODERN TRENDS IN SOLAR ENERGY DEVELOPMENT AND DEFECT ENGINEERING FOR MULTI-CRYSTALLINE SOLAR CELLS

Vitaly Kveder, Academician of the RAS, Professor, Principal researcher, Scientific Director, kveder@issp.ac.ru

ISSP RAS, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

Abstract: Modern trends in solar energy development and "defect engineering" features for multi-crystalline silicon based solar cells manufacturing are discussed.

Key words: silicon, solar energy, defects engineering.

УДК 538.915,538.911

<https://doi.org/10.29003/m1548.Silicon-2020/26-29>

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КРЕМНИЕВЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ КОМПОНЕНТ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, НАНОФОТОНИКИ И СПИНТРОНИКИ

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией¹, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (913) 916-40-12

Якимов Андрей Иннокентьевич, д.ф.-м.н., г.н.с.¹, yakimov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Зиновьева Айгуль Фанизовна, к.ф.-м.н., с.н.с.¹, aigul@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Ненашев Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹, nenashev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Зиновьев Владимир Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹, vladimir@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Аннотация: В докладе представлен обзор физических явлений в кремниевых наногетероструктурах с квантовыми точками Ge [1], формируемых на основе квантовых технологий.

Ключевые слова: Si, Ge, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Введение

Наноструктуры с квантовыми точками (КТ) являются перспективными объектами для разработки нового поколения приборов нанoeлектроники и нанофотоники, совместимых с кремниевой КМОП технологией, особенно наноструктуры Ge/Si с КТ Ge [1].

Основная часть

В докладе будут представлены результаты разработки методов управления зарождением и ростом КТ в кремниевых наногетероструктурах с управлением их пространственным распределением, однородностью по размерам. Прорывные результаты в таких структурах были получены на основе использования коллективных эффектов (встроенные деформационные поля, плазмоники, метаматериалы, метаповерхности, гибридные структуры) в повышении квантовой эффективности поглощения и излучения света в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками [2,3,4].

Выводы

Установлены электронные, оптические и спиновые явления в ансамблях квантовых точек, разработаны и созданы базовые компоненты нанoeлектроники, нанофотоники, стрейнтроники и логические элементы для квантовых вычислений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070).

Список использованных источников

1. Dvurechenskii A.V., Yakimov A.I. Silicon-Based Nanoheterostructures with Quantum Dots. // Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications, Ed. by A.V.Latyshov, A.V.Dvurechenskii, A.L.Aseev. Elsevier, Amsterdam, NewYork, 2017, P. 59 – 99.

2. Yakimov A.I., Bloshkin A.A., Dvurechenskii A.V., Tailoring the optical field enhancement in Si-based structures covered by nanohole arrays in gold films for near-infrared photodetection. // Photonics and Nanostructures, 2020, v.40, P. 100790.

3. Zinovieva A. F., Zinovyev V. A., Nenashev A. V.; Tey S. A., Dvurechenskii A. V., Borodavchenko O. M., Zhivulko A. V., Mudryi A.V. Photoluminescence of compact GeSi quantum dot groups with increased probability of finding an electron in Ge. // Scientific Reports, 2020, v. 10, article number: 9308.

4. Зиновьева А. Ф., Ненашев А. В., Кошкарев А. А., Зароднюк Т. С., Горнов А. Ю., Двуреченский А. В. Квантовые логические операции на спиновых состояниях в непрерывном СВЧ-поле. // Микроэлектроника, 2018, том 47, № 4, С.49-58.

PHYSICS PHENOMENA IN SILICON BASED QUANTUM DOT STRUCTURES FOR NANOELECTRONICS, NANOPHOTONIC AND SPINTRONIC

*Anatoly Vasilievich Dvurechenskii*¹ Professor, Corresponding member of RAS, Head of the Laboratory., dvurech@isp.nsc.ru, +7 (913) 916-40-12

*Andrew Innokentevich Yakimov*¹, Dr., Principle researcher, yakimov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aigul Fanizovna Zinovieva, Ph.D., Senior researcher aigul@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

*Aleksei Vladimirovich Nenashev*¹, Ph.D., Senior researcher, nenashev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

*Vladimir Anatolevich Zinovev*¹, Ph.D., Senior researcher, vladimir@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk

Abstract: The report is review of physical phenomena in Ge/Si quantum dot nano heterostructures

Key words: Ge,Si, molecular beam epitaxy.

The work was funded by Russian Scientific Foundation (grant 19-12-00070)

УДК 621.315.5

<https://doi.org/10.29003/m1549.Silicon-2020/29-34>

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЧИСТОТЫ

Критская Татьяна Владимировна, д.т.н., профессор,
научный консультант¹, krytskaja2017@gmail.com, (+38) 068-909-8154

Шварцман Леонид Яковлевич, к.т.н., научный консультант¹,
leoschv@ukr.net, (+38) 067-612-6076

Додонов Владимир Николаевич, генеральный директор¹,
Slovenia-pirado@outlook.com, (+386) 3021010

Кравцов Анатолий Александрович, к.т.н., директор²,
ankravts@gmail.com, (+371) 25633392

¹*Slovenia-Pirado, Ljubljana*

²*SIA«KEPPEU» Riga, LV-1034, Latvia*

Аннотация: в сложившихся экономических условиях необходим новый подход к промышленным методам получения поликристаллического и монокристаллического кремния полупроводниковой чистоты. Это удешевление и повышение производительности процессов при обеспечении их экологической безопасности (оптимизация используемых сырьевых источников, замкнутый цикл производства, снижение энергопотребления, специальные методы обработки и легирования монокристаллов для управления их

механическими свойствами, термостабильностью и радиационной стойкостью).

Ключевые слова: технология, поликристаллический, монокристаллический кремний, легирование, электрофизические параметры.

Введение

Объёмы производства поликристаллического кремния (ПКК) в мире в настоящее время составляют более 600 тыс. т, его рост происходит ежегодно и достаточно равномерно (на 8-12 %). Стоимость ПКК на мировом рынке после пика цен 2008 года (до \$ 500/кг), вызванного быстрым ростом солнечной энергетики и отставанием мощностей по производству сырья, упала в десятки раз и в настоящее время составляет менее \$ 12/кг [1,2]. В наступившей ситуации предпринимать какие-либо шаги, направленные на удешевление технологии получения ПКК, достаточно проблематично. Создание отечественных производств «на рыночных условиях» сегодня признано невозможным. Выделяемые инвестиции не преследуют цели глобальной поддержки кремниевых отраслей. Особую опасность данная ситуация представляет для космических проектов, где требуются специальные радиационно-стойкие комплектующие, которые выпускаются под конкретный заказ и их нельзя приобрести на открытом рынке.

Основная часть

Сегодня необходима смена парадигмы развития отечественной промышленности, производящей кремний полупроводниковый чистоты - уход от больших объёмов производства продукции традиционного качества и ориентация на качественно новый уровень технологий поликристаллического и монокристаллического кремния для электроники, фотовольтаики и специальных применений. В настоящей работе приведены результаты направленной

работы авторов по созданию новых технологий получения кремния высокой чистоты:

- энергосберегающей, экологически оптимальной технологии «Кремний из песка»;
- технологии электронно-лучевой гарнисажной плавки поликристаллических заготовок высокочистого кремния с последующим выращиванием методом бестигельной зонной плавки монокристаллов с рекордно низким содержанием кислорода;
- технологии выращивания монокристаллов кремния с повышенной однородностью по методу Чохральского;
- технологии специального легирования монокристаллов кремния, обеспечивающей повышение их термостабильности и радиационной стойкости.

Отличием технологии «Кремний из песка» является исключение ряда высокотемпературных и энергозатратных переделов: замена метода получения металлургического кремния карботермическим восстановлением (температура процесса в РТП до 2000°C, энергопотребление до 15 тыс. кВт/т) прямым хлорированием шихты со специально активированными твердофазными компонентами в шахтном хлораторе с получением SiCl_4 ; отказ от процесса синтеза хлороводорода (температура процесса до 2300°C); отказ от энергозатратных операций разделительной конденсации ПГС (температура процесса ниже -60°C), высокотемпературного гидрирования SiCl_4 (температура процесса 1270°C); введение в технологическую схему операции получения моносилана SiH_4 в процессе диспропорционирования SiHCl_3 . Преимущества использования SiH_4 : выведение примесей металлов из SiHCl_3 ; уменьшение скоростей реакций образования твёрдых полимерных продуктов состава $(\text{SiH}_x)_n$, аморфного кремния, газонасыщенности поликристаллического кремния, увеличены скорости осаждения кремния на подложки; возможность получения ПКК электронного качества в виде гранул в реакторе кипящего слоя.

ПКК высокой чистоты для силовых полупроводниковых приборов, детекторов, изделий инфракрасной оптики, приборов СВЧ и других специальных применений, используемый в процессе выращивания монокристаллов методом бестигельной зонной плавки, требует строгого соблюдения геометрии стержней, отсутствия в их объёме газовых и аморфных включений, внутренних трещин, упругих напряжений. Разработанный метод получения кремниевых заготовок методом гарнисажной плавки в «холодном тигле» с использованием направленных электронных пучков с последующим выращиванием кристалла на кремниевую затравку является наименее энергоёмким процессом среди прочих металлургических процессов получения монокристаллов кремния [3]. При выращивании стержня диаметром 200 мм на весь процесс, включая расплавление шихты и выращивание кристалла, расходуется до 25 кВт·час/кг. Чистота полученных заготовок по уровню содержания основных фоновых примесей достаточна для последующего выращивания монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки для перечисленных целей, в которых достигнуты время жизни неравновесных носителей заряда до 1500 мкс и концентрация кислорода - $(4-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В соавторстве с ИЯИ НАНУ разработаны режимы нейтронного трансмутационного легирования крупногабаритных монокристаллов кремния, которые обеспечивают требуемый уровень концентрации легирующего элемента и его однородное распределение по поперечному сечению и длине слитка. Найдены режимы γ -облучения, которое обеспечивает сток внутренних упругих напряжений в бездислокационном монокристалле при его резке и шлифовке (за счет образования временных, легко устранимых радиационных дефектов), что позволяет существенно снизить брак на операциях механической обработки, обеспечивает возможность получения тонких пластин (для DBP-процесса). Проведение α - облучения в установленных оптимальных режимах позволяет получать сверхтонкие пластины желаемой толщины («блистеринг»-процесс).

Нами осуществлен расчет энергии межатомных связей атомов кремния при введении ряда легирующих элементов (Al, Cu, Fe, Mg, Zr, Hf, Sn, Ge, Mo) с привлечением положений металлохимии комплексного легирования. Обнаруженный феномен фазовых превращений был использован при выборе компонентов комплексного легирования. Полученные положительные результаты от применения монокристаллов CZ-Si<Ge> в силовой электронике, микроэлектронике (повышение термостабильности, радиационной стойкости), дают основание полагать, с высокой долей вероятности, что в приложении к фотовольтаике изовалентно легированные монокристаллы позволят снизить деградацию, повысить срок службы и эффективность фотоэлектрических преобразователей.

Выводы

Дана оценка состояния производства поликристаллического кремния в мире. Обоснована необходимость модернизации известной технологии Siemens (снижение энергопотребления, оптимизация используемых сырьевых источников, отказ от использования низкотемпературных и взрывоопасных процессов, вариативность переделов в соответствии с конечным назначением продукции и др.). Доказана целесообразность использования метода гарнисажной электронно-лучевой плавки в технологии монокристаллов для силовых полупроводниковых приборов и спецприменений, а также предложены методы специальной обработки и легирования монокристаллов с целью управления их механическими свойствами, термостабильностью и радиационной стойкостью.

Список использованных источников

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://renen.ru › on-the-market-of-polycrystalline-silicon-the-key-raw-material for solar entegyhttps://marketpublishrs.ru/11932/news.html](https://renen.ru › on-the-market-of-polycrystalline-silicon-the-key-raw-material-for-solar-entegyhttps://marketpublishrs.ru/11932/news.html)
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pv-tech.org/news/list/13.03/2020>.

3. Kravtsov A. Development of silicon growth techniques from melt with surface heating // VIII International Scientific Colloquium on Modelling for Materials Processing IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 355 (2018) 012007 doi:10.1088/1757-899X/355/1/012007.

NEW DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF SILICON TECHNOLOGY OF SEMICONDUCTOR PURITY

*Tatiana Vladimirovna Kritskaya*¹, Dr. of Engineering, professor, scientific consultant, krytskaja2017@gmail.com, (+38)-068-909-8154

*Leonid Yakovlevich Schwartzman*¹, Ph.D, scientific consultant, leoschv@ukr.net, (+38) 067-612-6076

*Vladimir Nikolaevich Dodonov*¹, general director, Slovenia-pirado@outlook.com, (+386)3021010

*Anatoly Aleksandrovich Kravtsov*², Ph.D, director, ankravts@gmail.com, (+371)25633392

¹ Slovenia-Pirado, Ljubljana

² SIA "KEPP EU", Riga, LV-1034, Latvia

Annotation: In the current economic conditions, a new approach to industrial methods of obtaining polycrystalline and monocrystalline silicon of semiconductor purity is required. This is a reduction in the cost and increase in the productivity of processes while ensuring their environmental safety (optimization of the used raw materials, a closed production cycle, a decrease in energy consumption, special methods of processing and alloying single crystals to control their mechanical properties, thermal stability and radiation resistance).

Key words: technology, polycrystalline, monocrystalline silicon, alloying, electrophysical parameters.

ВВЕДЕНИЕ В TCAD И SPICE МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ БИС

*Петросянц Константин Орестович, д.т.н., профессор,
МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, kpetrosyants@hse.ru, 8-495-772-
9590,15208.*

Аннотация: Рассмотрены методики TCAD и SPICE моделирования для биполярных и МОП-компонентов, изготовленных по базовым технологиям кремниевых ИС/БИС.

Ключевые слова: 2D/3D структуры п/п приборов, приборно-технологическое (TCAD) моделирование, компактные SPICE модели компонентов ИС/БИС, измерение ВАХ, экстракция SPICE параметров.

Введение

Приведена краткая характеристика физических структур БТ, МОПТ, JFET малой и средней мощности, мощных БТ, ДМОПТ, IGBT и разновидностей на объемном кремнии и подложках КНИ/КНС. На конкретных примерах показано, какие TCAD и SPICE модели необходимо использовать, чтобы учесть специфику транзисторов каждого типа.

TCAD моделирование

TCAD системы предназначены для технологов, конструкторов и разработчиков п/п приборов и ИС/БИС. Они позволяют предварительно, до изготовления опытных образцов: во-первых, получить виртуальную геометрическую модель 2-х/3-х мерной конструкции и физической структуры п/п прибора, состоящую из областей и слоев на основе различных материалов (полупроводников, диэлектриков, металлов), и с помощью этой модели оценить практическую пригодность различных вариантов проектируемого прибора с точки зрения конструктивно-технологических требований и

ограничений и, во-вторых, получить и проанализировать необходимый набор электрических характеристик этого прибора и оценить его пригодность с точки зрения требований микросхемотехники ИС/БИС.

Наиболее распространенными пакетами TCAD являются Sentaurus Synopsys и ATLAS Silvaco. В обоих пакетах физические процессы в структуре п/п прибора описываются 2-х/3-х мерной ФСУ в частных производных, которая решается численными методами. Используются модели 2-х уровней: первый уровень – модели переноса носителей заряда в п/п структуре; второй уровень – модели электрофизических параметров материалов и физических эффектов (см. рисунок 1).

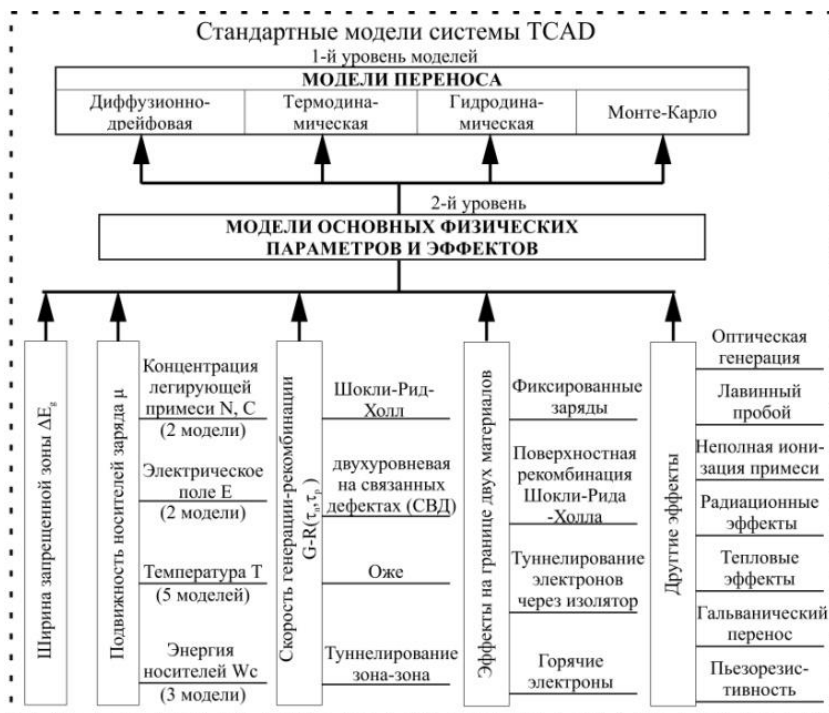


Рисунок 1 – Стандартные модели системы Sentaurus Synopsys TCAD

Для п/п приборов различного типа показано, какие модели 1-го и 2-го уровней необходимо использовать, чтобы адекватно учесть их специфику.

Большинство практических задач успешно решаются с помощью 2D моделирования. Однако, для целого ряда п/п структур, в первую очередь для приборов с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами, необходимо решить 3D задачи. Типовые затраты времени на расчет ВАХ п/п прибора составляют: десятки минут – несколько часов для 2D задач и единицы – десятки часов для 3D задач.

Рассмотрены квази-3D модели, существенно снижающие время счета.

На случай воздействия внешних факторов рассмотрена расширенная библиотека TCAD-моделей для электрофизических параметров (μ , ρ , λ_{th} , τ , N_{ot} , N_{it} и др.), зависящих от температуры и интенсивности радиационного воздействия.

Компактные SPICE модели

Компактные модели используются схемотехниками для оперативной оценки работоспособности аналоговых и цифровых узлов и блоков ИС/БИС при их работе в различных электрических режимах и при воздействии внешних факторов (температуры и/или радиации).

Основные требования к этим моделям – точность и приемлемые затраты времени на расчет схем больших размерности.

В SPICE подобных схемотехнических симуляторах имеются разветвленные библиотеки моделей БТ и МОПТ различных типов.

Для Si БТ/SiGe ГБТ используются модели GP, VBIC, HiCUM, Mextram 504 (для мощных приборов предпочтительнее VBIC и HiCUM).

Для МОПТ с размерами канала $L_{мин} \geq 0,2$ мкм используются модели BSIM3, BSIM4, EKV; для глубоко субмикронных и нанометровых приборов с $L \leq 0,1$ мкм – модели BSIM5, BSIM6,

PSP; для приборов с диэлектрической изоляцией КНИ/КНС – модели BSIM SOI, EKV SOI.

Для определения параметров SPICE моделей из результатов измерения ВАХ и C-V характеристик приборов используются универсальные экстракторы IC-CAP и BSIM ProPlus (см. рисунок 2).

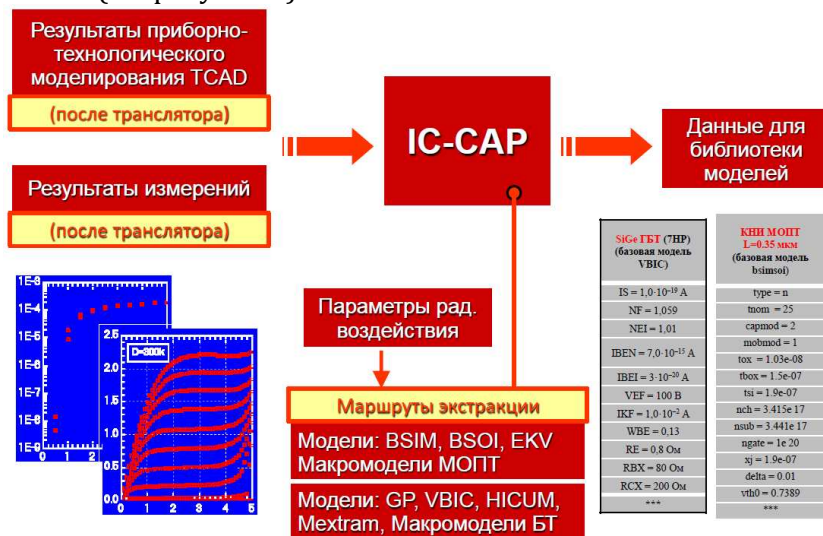


Рисунок 2 – Определение SPICE параметров

При воздействии внешних факторов в стандартные SPICE модели вводятся радиационные и температурные зависимости параметров, учитывающие конкретный вид воздействия.

Выводы

Приведены необходимые базовые сведения для студентов и специалистов, находящихся на начальной стадии освоения TCAD и SPICE моделирования п/п приборов и компонентов ИС/БИС.

Рассмотрены следующие инновационные решения, способствующие прогрессу в области TCAD и SPICE моделирования:

- квази 3D модели, уменьшающие время TCAD расчетов;

- расширенные TCAD библиотеки электрофизических параметров μ , ρ , λ_{Th} , τ , N_{ot} , N_{it} и др., учитывающие влияние температуры и радиации;
- «встраивание» в SPICE-модели дополнительных параметров и зависимостей, учитывающих эффекты сверхмалых размеров и влияние внешних воздействий;
- сквозной маршрут TCAD-SPICE моделирования: технологический маршрут – 2D/3D физическая структура прибора – электрические характеристики – параметры компактной SPICE модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00898) и совместного российско-китайского гранта (грант № 20-57-53004).

INTRODUCTION INTO TCAD AND SPICE MODELING OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND IC COMPONENTS.

Konstantin Orestovich Petrosyants, Dr. Sc., Professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics Higher School of Economics, Moscow, kpetrosyants@hse.ru, +7 (916) 091-22-43

Abstract: Conventional BJT, MOSFET, JFET, DMOST, IGBT structures fabricated on bulk silicon and SOI/SOS substrates are characterized as the object of modeling. Popular TCAD simulators and SPICE device models libraries are presented. The model parameters extraction strategies for TCAD device and SPICE circuit simulation based on data proceeding of physical and electrical measurements are described. The typical examples of TCAD and SPICE modeling of BJTs and MOSFETs fabricated by conventional silicon IC technologies are presented.

Key Words: Semiconductor devices, IC components, TCAD and SPICE models, device model parameters extraction from experimental I-V characteristics.

Acknowledgments: the research was supported by Basic Research Program of the National Research University Higher School of

Economics in 2019, grant №TZ-99 and by Russian Foundation for Basic Research grants №18-07-00898 (2019) and 20-57-53004 (2020).

УДК 18.12

<https://doi.org/10.29003/m1551.Silicon-2020/40-44>

GRAPHENE LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS ON POROUS SILICON

Kurbangali Baynazarovich Tynyshtykbayev, Doctor of Sci.Tech.¹, Professor¹, Leading Researcher¹, +7 (717) 270-65-42, +7 (777) 215-07-50, kurbangali.tynyshtykbayev@nu.edu.kz

Chistos Spitas, Associate professor¹, +7 (717) 270-46-19, christos.spitas@nu.edu.kz

Konstantinos Kostas, Assistant Professor¹, +7 (717) 270-46-25, konstantinos.kostas@nu.edu.kz

Zinetula Zeke Insepov, Professor¹⁻³, Head of the Project Group¹, +7 (717) 270-65-50, insepov@nu.edu.kz

¹ The autonomous organization of education Nazarbayev University, Nur Sultan, Kazakhstan

² National Nuclear Research University (MEPhI), Moscow, Russian Federation

³ Purdue University, West-Lafayette, IN USA

Abstracts: The possibility of low-temperature synthesis of graphene on the surface of porous silicon (PS) is associated with the excess surface energies of nc-PS nanocrystallites ; the boundary interface nanocrystallites nc-PS / c-Si monocrystal matrix; the dangling bonds of silicon atoms of nanocrystallites skeleton nc-PS . This opens up new prospects for the development of methods for the low-temperature synthesis of graphene without metal catalysts for the decomposition of carbon precursors, including using the ALD method.

Key words: porous silicon, energy, nanocrystal, dangling bonds, interface, skeleton, low-temperature synthesis, graphene.

The actuality of developing low-temperature synthesis of graphene is associated with the development of flexible electronics based on organic polymers, which are planned to be done in the next 5 years [1]. Currently existing low-temperature (300–500 °C) LPCVD- [2], PECVD- [3], REALD- [4] methods for the synthesis of graphene are either imperfect to obtain a stable and uniform large area of graphene, LPCVD [5], or possess the same drawbacks as the high-temperature CVD method for the synthesis of graphene on metal catalysts, high cost and energy consumption, PECVD, or complicated for large-scale application, REALD.

Recently, the possibility of low temperature <400 °C synthesis of multilayer graphene [6] and few layer graphene, carbon graphene nanocomposite [7] on the surface of porous silicon PS has been shown. The high energy activity of PS is associated with the catalytic activity of nanosized silicon nc-PS for low-temperature decomposition of a carbon precursor [6], and also with previously known quantum-size effects such as a decrease in the melting temperature of a crystal with a decrease in size [8], a change in the energy gap of nanocrystals [9], and energy saturation dangling bonds of Si atoms of nanocrystallites of the skeleton nc-PSi [10]; the appearance of elastic deformation forces at the nanocrystal / c-Si matrix interface due to mismatch defects [11]. The possibility of synthesizing graphene on the PS surface without the use of metal catalysts can open up a new perspective for the integration of silicon and graphene electronics without metal interconnects [6], and the development of flexible electronics based on organic polymers using the ALD method [12].

The report will consider the features of low-temperature synthesis of graphene on the surface of PS in the light of all the above remarks.

This work has been funded by the Nazarbayev University Collaborative Research Project (CRP) "Development of smart passive-active multiscale composite structure for earth Remote Sensing Satellites (RSS) of ultrahigh resolution (ULTRASAT)", Grant Award Nr. 091019CRP2115.

Bibliography

1. Bum Jun Kim, Tuqeer Nasir, Jae-Young Choi. Direct Growth of Graphene at Low Temperature for Future Device Applications. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 55 (3) 203-223, 2018. <https://doi.org/10.4191/kcers.2018.55.3.12>
2. Srivastava, C. Galande, L. Ci, L. Song, C. Rai, D. Jariwala, K. F. Kelly, P. M. Ajayan. Novel Liquid Precursor- Based Facile Synthesis of Large-Area Continuous, Single, and Few-Layer Graphene Films. *Chem. Mater.* 2010, 22 (11) 3457- 3461
3. Y.-J. Kim, S. J. Kim, M. H. Jung, K. Y. Choi, S. Bae, S.-K. Lee, Y. Lee, D. Shin, B. Lee, H. Shin, M. Choi, K. Park, JH Ahn, B. H. Hong. Low-Temperature Growth and Direct Transfer of Graphene-Graphitic Carbon Films on Flexible Plastic Substrates. *Nanotechnology* 2012, 23 (34) 344016
4. Yijun Zhang, Wei Ren, Zhuangde Jiang, Shuming Yang, Weixuan Jing, Peng Shi, Xiaoqing Wu, Zuo-Guang Ye. Low-temperature remote plasma-enhanced atomic layer deposition of graphene and characterization of its atomic-level structure *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2, 7570–7574
5. X. Wan, K. Chen, D. Q. Liu, J. Chen, Q. Miao, J. B.Xu. High-Quality Large-Area Graphene from Dehydrogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons,” *Chem. Mater.* 2012. 24 (20) 3906-3915
6. Keith Share, Rachel E. Carter, Pavel Nikolaev, Daylond Hooper, Landon Oakes, Adam P. Cohn, Rahul Rao. Nanoscale Silicon as a Catalyst for Graphene Growth: Mechanistic Insight from in Situ Raman Spectroscopy. *J. Phys. Chem. C* 2016, 120, 14180–14186
7. K. B. Tynyshtykbayev, A. Ainabayev, O. Kononenko, M. Chichkov, Z. Ramazanova, R. Zulkharnai, D. Roshchupkin, J. Sorokupudova, V. Starkov, Z. Insepov. *Diamond & Related Materials* 92 (2019) 53–60
8. P.R. Couchman, W. A. Jesser. Thermodynamic theory of size dependence of melting temperature in metals. *Nature* 1977, 269 (6) 481 – 482
9. R. L. Smith and S. D. Collin s.Porous Silicon Formation Mechanisms. *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, 1992, pp. 1-22. doi:10.1063/1.350839

10. D. Kovalev, V. Yu. Timoshenko, N. KDnzner, E. Gross, F. Koch. Strong Explosive Interaction of Hydrogenated Porous Silicon with Oxygen at Cryogenic Temperatures. Phys. Rev. Lett. 2001, 87(6) 68301-4

11. Yu. Ya. Gafner, S. L. Gafner, I. S. Zamulin, L. V. Redel, V. M. Samsonov. Possible mechanisms of increase in heat capacity of nanostructured metals. Physics of the Solid State volume 55, pages2142–2149(2013)

12. J. Salonen and E. Mäkilä. Thermally Carbonized Porous Silicon and Its Recent Applications. Adv. Mater. 2018 30 1-19

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ГРАФЕНА НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

Kurbangali Baynazarovich Tynyshykbayev, Doctor of Sci.Tech.¹, Professor¹, Leading Researcher¹, +7 (717) 270-65-42, +7 (777) 215-07-50, kurbangali.tnyshtykbayev@nu.edu.kz

Chistos Spitas, Associate professor¹, +7 (717) 270-46-19, christos.spitas@nu.edu.kz

Konstantinos Kostas, Assistant Professor¹, +7 (717) 270-46-25, konstantinos.kostas@nu.edu.kz

Zinetula Zeke Insepov, Professor¹⁻³, Head of the Project Group¹, +7 (717) 270-65-50, insepov@nu.edu.kz

¹ *Общественный фонд «ФОНД ОБРАЗОВАНИЯ НУРСУЛТАНА НАЗАРБАЕВА», Нур Султан, Казахстан.*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»), Москва, Российская Федерация.*

³ *Университет Предью, Уэст-Лафейетт, Индиана, США*

Аннотация: В докладе будут рассмотрены особенности низкотемпературного синтеза графена на поверхности пористого кремния (por-Si) в свете следующих известных факторов: высокой энергетической активностью por-Si связанной с каталитической активностью наноразмерного кремния nc-PS при низкотемпературном разложении углеродного предшественника; квантово-размерными эффектами, такими как снижение температуры плавления

кристалла с уменьшением размера, изменение энергетической щели нанокристаллов и энергонасыщение оборванных связей атомов Si нанокристаллитов скелета nc-PSi; появление сил упругой деформации на границе раздела (нанокристалл)/ (кристаллическая кремниевая матрица) вследствие дефектов рассогласования.

Ключевые слова: пористый кремний, por-Si, энергия, нанокристалл кремния, nc-Si, низкотемпературный метод синтеза, графен.

Эта работа была профинансирована совместным исследовательским проектом Назарбаев Университета (CRP) "разработка интеллектуальной пассивно-активной многомасштабной композитной структуры для спутников дистанционного зондирования Земли (RSS) сверхвысокого разрешения (ULTRASAT)", Грант № 091019CRP2115.

Секция 1 «Материаловедение кристаллического кремния: получение и очистка металлургического кремния, процессы роста из расплавов, химического осаждения из газовой фазы, аппаратура для роста»

УДК 621.383.535.215

<https://doi.org/10.29003/m1552.Silicon-2020/45-49>

**ВЫСОКОЧИСТЫЙ РАФИНИРОВАННЫЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*Непомнящих Александр Иосифович, д.ф.-м.н., профессор,
г.н.с., ИГХ СО РАН, г. Иркутск, ainer@igc.irk.ru*

Аннотация: В работе проведен анализ роста объемов мирового производства солнечных модулей за последние 10 лет. Рассматриваются вопросы получения рафинированного металлургического кремния высоких сортов и кремния для солнечной энергетики. Показан перспективность использования высокочистых кварцитов Восточного Саяна. Описана разработанная в Институте технология прямого получения кремния для солнечной энергетики.

Ключевые слова: кварциты, монокремний, мультикремний.

Введение

Солнечная энергетика является одной из самых бурно развивающихся в мире отраслей. Так за последние 10 лет объем производства солнечных модулей вырос в 16,5 раз с 7,3 GW в 2009 году до 121,4 GW в 2019 году. Общий объем установленных к концу 2019 года составляет 630 GW. Десять крупнейших компаний продали в 2019 году 80 ГВт солнечных модулей, что соответствует 65,4% мирового рынка. На 2020 год ожидается роста объемов продаж до 134,8 GW и увеличения концентрации производства — доля первой десятки может превысить 70%. Причем, более 95 % солнечных

элементов изготавливаются из пластин моно- и мультикремния. В России завод «Хевел» в 2019 году произвел 229 MW солнечных модулей.

Результаты

Основой для получения поликремния или UMG кремния, используемого для моно- или мультикремния для солнечных элементов является высокочистый рафинированный металлургический кремний. Всего мировой объем производства металлургического кремния составляет в настоящее время 2,7 миллионов тонн в год с ежегодным приростом объемов порядка 5 %. Около 43 % расходуется алюминиевой промышленностью для изготовления сплавов, 33 % идет на производство силиконов и 24 % на солнечные элементы и микроэлектронику, что составляет в настоящее время порядка 900 тысяч тонн в год. С учетом прогнозируемого роста объемов солнечной энергетики к 2025 году понадобится более миллиона тонн кремния для этих целей.

Для производства высоких сортов рафинированного металлургического кремния необходимы высоко-чистый природный кварцевый материал, низкосольный уголь и высококачественная древесина. Кроме того расход электроэнергии не должен превышать 12-13 KWh/t.

Институтом геохимии СО РАН открыты и детально изучены высоко-чистые кварциты в Восточном Саяне [1-3]. На основе наиболее чистых разновидностей (суперкварциты и сливные) разработаны схемы обогащения и получения кварцевых концентратов с суммарным содержанием десяти регламентированных примесей (Fe, Al, Ti, Ca, Mg, Cu, Mn, Na, K, Li) менее 10 ppm. На основе разработанных кварцевых концентратов получены оптические стекла.

Кварциты Восточного Саяна характеризуются низким содержанием бора и фосфора (ниже 0,1 ppm). Поэтому этот материал перспективен для получения как рафинированного металлургического кремния высоких сортов ($Fe \leq 0,1 \%$), так и UMG кремния для солнечной энергетики. Разработанная нами

технология прямого получения кремния для солнечной энергетики минуя химический передел состоит из трех основных частей: карботермическое восстановление кремния из высокочистых кварцитов; принципиально новая технология рафинирования расплава кремния; финишная очистка кремния от тяжелых элементов и формирование необходимой столбчатой структуры при направленной кристаллизации моно- или мультикремния [4,5]. Получены экспериментальные образцы мультикремния по разработанной технологии. Применение шихты, состоящей из высокочистого кварцита месторождения Бурал-Сардык (Восточный Саян) и древесного угля полученного из обесшкуренной березы позволяет получить кремний с содержанием бора порядка 2 ppm. Применение брикетированной шихты из обогащенной кварцевой крупки и гранулированного углеродистого восстановителя позволяет выплавить кремний с содержанием бора порядка 0.3 ppm. Дальнейшее удаление бора, фосфора и ряда других элементов происходит на второй стадии при использовании разработанной нами технологии рафинирования расплава кремния [6]. Формирование необходимой структуры межзеренных границ мультикремния и его дальнейшая очистка, прежде всего от примесей группы железа, происходит на стадии направленной кристаллизации. Использование первого варианта шихты позволяет получить моно- и мультикремний марки 6N, а второго варианта шихты марки 7N.

Предварительная оценка прогнозных ресурсов кварцитов Восточного Саяна, выполненная Институтом на трех блоках (Ока-Урикского, Урда-Гарганского и Уренгенурского) составляет 134 млн. тонн [7].

Заключение

Высоко-чистые кварциты Восточного Саяна позволяют обеспечить получение рафинированного металлургического кремния высоких сортов и кремния для солнечной энергетики.

Список использованных источников

1. Е.И. Воробьев, А.М. Спиридонов, А.И. Непомнящих, М.И. Кузьмин. Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // ДАН. 2003, т. 390, № 2, с. 219-223.
2. Непомнящих А.И., Волкова М.Г., Жабоедов А.П., Лесников А.К., Лесников П.А., Паклин А.С., Сизова Т.Ю., Спиридонов А.М., Федоров А.М., Шалаев А.А., Шендрик Р.Ю. Оптическое стекло из кварцитов Восточного Саяна // Физика и химия стекла. 2018, т.44, № 2, стр.169-177.
3. А. И. Непомнящих, М. Г. Волкова, А. П. Жабоедов, А. М. Федоров. Кварцевые концентраты на основе сливного кварцита // Неорганические материалы. 2018, том 54, № 8, с. 850-853
4. А.И. Непомнящих, В.П. Еремин, Б.А. Красин, И.Е. Васильева, И.А. Елисеев, А.В. Золотайко, С.И. Попов, В.В. Синицкий. Мультикристаллический кремний для солнечной энергетики. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 4, 02, 2002, с. 16-24
5. А.И.Непомнящих, З.В.Пресняков, И.А.Елисеев, Ю.В.Сокольников. Особенности роста мультикристаллического кремния из металлургического кремния высокой чистоты. Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып.37, вып.15, стр. 103-110
6. A.I. Nepomnyaschikh, A.V.Zolotaiko, I.A.Eliseev, N.I. Dubovicov and A.A. Nepom-nyaschikh. New technology of refining of metallurgical silicon. Silicon for chemical industry VII, Trondheim, 2004, p. 79-89.
7. А.М.Федоров, В.А.Макрыгина, А.М.Мазукабзов, А.И. Непомнящих, Д.Ц. Аюржанаева, М.Г. Волкова. Ресурсы кварцевого сырья Гарганской зоны Восточно-Саянского кварцитоносного района. Георесурсы, (в печати).

HIGH PURITY REFINED METALLURGICAL SILICON AS A BASIS FOR PRODUCING SILICON FOR SOLAR ENERGY

*Alexander Iosifovich Nepomnyashikh, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, ainep@igc.irk.ru,
+7 (902) 513-55-72*

Vinogradov Institute of Geocmemistry SB RAS, Irkutsk

Abstract: The paper analyzes the growth in the global production of solar modules over the past 10 years. Problems of obtaining refined metallurgical silicon of high grades and silicon for solar energy are considered. The prospects of using high-purity quartzites of the Eastern Sayan are shown. The technology of direct silicon production for solar energy developed at the Institute is described.

Key words: quartzite, monosilicon, polysilicon.

УДК 669.782; 669.04.42; 669.04.412

<https://doi.org/10.29003/m1554.Silicon-2020>

СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЯ В РОССИИ И МИРЕ, ЕГО РАФИНИРОВАНИЕ ДО ВЫСОКИХ МАРОК И «СОЛНЕЧНОГО» КАЧЕСТВА

*Ерёмин Валерий Петрович, инженер-металлург¹, ve@ek-
resources.com*

*Елисеев Игорь Алексеевич, к.т.н., старший научный
сотрудник², elia.@igc.irk.ru*

¹ ООО "ЕК-Ресурсес", г. Иркутск

² ИГХ СО РАН, г. Иркутск

Аннотация: В работе представлено состояние производства кремния в мире и России за последние несколько лет и перспективы его развития до 2024 года. Оценены технологии рафинирования металлургического кремния до высоких сортов и «солнечного» качества.

Ключевые слова: кремний, рафинирование, спрос, производство, технология.

Введение

Производство металлургического кремния за последние 20 лет удвоилось. Несмотря на COVID-19 и торговые войны, годовой объём производства металлоида превысит цифру в 3 000 000 т.

Россия пока ещё располагает потенциалом получения кремния высоких марок с заданным химическим составом, для любого потребителя в мире.

В России создан потенциал для разработки собственного производства кремния “солнечного” качества, есть необходимая научная база знаний, разработано и может быть реализовано новое металлургическое оборудование, способное работать с особо чистыми сырьевыми материалами, накоплен практический опыт, есть квалифицированный персонал, способный решить задачу, подготовлена сырьевая база.

Результаты

Covid-19 вызвал значительное сокращение экономической активности во всех странах мира. Глобальный спрос на кремний снизился на ~ 5%. Восстановление спроса начнётся в 2021 году. В 2019 г. спрос упал по разным оценкам от 150 000 т. до 175 000 т. в год. Падение спроса в 2020 году сложно оценить, но оно точно будет не меньше, чем в 2019 г., ожидается, что мировое производство в текущем году будет на уровне 2 700 000 т. Однако поднимать всю отрасль из кризиса будет именно спрос на химическом рынке, он начнёт расти в 2021 году и увеличение потребления от дна 2020 года может составить по некоторым оценкам ~ 650 000 т.

Требования к оптимального процессу получения солнечного кремния следующие:

1) Использовать возможно более чистые, но недорогие сырьевые материалы.

2) Свести к минимуму возможные загрязнения кремния в процессе восстановительной плавки.

3) Обеспечить эффективную очистку кремния от избытка углерода и твёрдых включений.

Кварциты:

Для получения солнечного кремния необходимо использовать чистые природные кварцы с чистотой $>99,9\text{мас.}\%$ SiO_2 с низким содержанием В и Р. Месторождения таких кварцев есть в России. Более высокую чистоту можно получить стандартным методом – дробление – грохочение – отмывка, таким образом можно получить кварцевый концентрат с суммарным содержанием примесей порядка 100ppm. Однако, чистить надо ещё глубже, содержание SiO_2 выше 99,999мас.%.

Углеродные восстановители:

В экспериментах для получения кремния солнечного качества использовали в качестве восстановителя нефтекокс, древесный уголь, углеродную сажу различных марок. Оценивается не только чистота восстановительных материалов, но и их реакционная способность по отношению к SiO_2 с этих позиций наиболее эффективной оказалась газовая сажа, получаемая крекингом метана или пропана.

Графитовые электроды по чистоте должны быть не ниже, чем используемые сырьевые материалы.

В любой технологической цепочке последний шаг – финальная очистка, которой всегда будет направленная кристаллизация.

Заключение

1) После спада 2020г. производство кремния будет расти и в первую очередь за счёт чистых марок кремния для химической промышленности.

2) Производство “солнечного” кремния из особо чистых металлургических марок, полученных прямым карботермическим восстановлением возможно и в России и уже реализовано, например, в Норвегии, при рационально выстраиваемой технологической схеме, где финальной очисткой всегда будет направленная кристаллизация.

Список использованных источников

1. Ерёмин В.П., Чвалинский Ю.М. Новые процессы плазменного рафинирования кремния. Физ.-хим. процессы и технологии получения металлургического кремния. Металлургический кремний 15-17 мая 2012 г. г.Караганда.
2. Кузьмин М.Г., Чередниченко В.С., Жидков В.Г., Ерёмин В.П. Печь РКО-33 – новая универсальная печь для производства кремния и ферросплавов. Физико-химические процессы и технологии получения металлургического кремния. г. Караганда Республика Казахстан. 15-17 мая 2012 г.
3. Ерёмин В.П. Рафинирование технического кремния. Кремний 2004. Тезисы докладов совещания. 5-9 июля 2004 г.
4. Непомнящих А.И., Ерёмин В.П., Красин Б.А., Васильева И.Е., Елисеев И.А., Золотайко А.В., Попов С.И., Синицкий В.В. Мудьтикристаллический кремний для солнечной энергетики. Материалы электронной техники. 4.02.2002 г.
5. Непомнящих А.И., Красин Б.А., Васильева И.Е. Ерёмин В.П. и др. Кремний для солнечной энергетики. Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т.303, вып.2. – с. 175-190.

STATE OF SILICON PRODUCTION IN RUSSIA AND THE WORLD, ITS REFINING TO HIGH GRADES AND "SOLAR" QUALITY

Valery Eremin, metallurgical engineer ¹, ve@ek-resources.com

Igor Alekseevich Eliseev, candidate of technical Sciences, senior research fellow ², elia.@igc.irk.ru

¹ EC-Resources LLC, Irkutsk

² IGH SB RAS, Irkutsk

Abstract: the paper presents the state of silicon production in the world and Russia over the past few years and the prospects for its development until 2024. Technologies for refining metallurgical silicon to high grades and "solar" quality are evaluated.

Key words: silicon, refining, demand, production, technology.

ТУРБОСТРАТНЫЙ МУЛЬТИСЛОЙНЫЙ ГРАФЕН – ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Кононенко Олег Викторович, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник¹, oleg@iptm.ru, +7 (496) 524-41-58.

Зотов Александр Владимирович, младший научный сотрудник¹, taba@iptm.ru, +7 (496) 524-40-50.

Матвеев Виктор Николаевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник¹, matveev@iptm.ru, +7 (496) 524-40-98.

¹ ИПТМ РАН, г. Черноголовка

Аннотация: В пленках турбостратного мультислойного графена, выращенного методом химического парофазного осаждения, исследованы транспортные свойства, магнитосопротивление и фотоотклик.

Ключевые слова: турбостратный мультислойный графен, магнитосопротивление, фототермоэлектрический эффект.

Введение

В последние годы двумерные (2D) материалы находятся на переднем фронте исследований материалов из-за их уникальных электрических и оптических свойств, обусловленных их атомарно тонкими размерами. Графен демонстрирует безмассовые носители заряда с линейной дисперсией около точки Дирака [1], где соприкасаются валентная зона и зона проводимости, большую Fermi velocity ($v_F \sim 2.5E6$ m/s). Интерес к устройствам на основе графена в значительной степени обусловлен чрезвычайно высокой подвижностью носителей заряда, делая его перспективным для таких приложений, как, например, высокочастотные транзисторы, сверхбыстрые детекторы [2] и приборы спиновой электроники [3]. Так было обнаружено, что высокая подвижность носителей заряда способствует большей длине

пробега спина, обеспечивая чистый спиновый ток на больших расстояниях [4].

Результаты

Турбостратный мультислойный графен был выращен на пленках железного катализатора методом химического парофазного осаждения низкого давления с однократным напуском ацетилена. Пленки были исследованы с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. Также были исследованы транспортные свойства пленок и магнитосопротивление. В пленках было обнаружено большое положительное квазилинейное магнитосопротивление, достигающее 100% в поле 0,5 Т при комнатной температуре. В пленках был исследован фототок, возникающий при облучении лазером с длиной волны 532 нм. Фототок, связан с фототермоэлектрическим эффектом, проявляющимся при облучении границы между металлическим электродом и графеном, и между оксидом кремния и графеном.

Список использованных источников

1. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene // Nat. Mater., 2007 V.6. P 183.
2. Humer M., Furchi M.M., Bachmann D., Guider R., Fromherz T, Mueller T. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands // Nat. Photonics, 2013 V.7, P 892–896.
3. Ferrari, A. C., Bonaccorso, F., Fal'ko, V., Novoselov, K. S., Roche, S., Bøggild, P.; Borini, S., Koppens, F. H. L., Palermo, V., Pugno, N., et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // Nanoscale 2015, V.7, P 4598–4810.
4. Józsa C., Maassen T., Popinciuc M., Zomer P. J., Veligura A., Jonkman H. T., van Wees B. J., Linear scaling between momentum and spin scattering in graphene // Phys. Rev. B, 2009 V.80, P 241403.

TURBOSTRATIC MULTILAYER GRAPHENE – PROSPECTS FOR USE AS MAGNETIC FIELD SENSORS AND PHOTODETECTORS

*Oleg Viktorovich Kononenko*¹, oleg@iptm.ru, +7 (496) 524-41-58.

*Aleksandr Vladimirovich Zotov*¹, taba@iptm.ru,
+7 (496) 524-40-50.

*Viktor Nikolaevich Matveev*¹, matveev@iptm.ru,
+7 (496) 524-40-98.

¹ *Institute of microelectronics technology and high purity materials, Russian academy of sciences.*

Abstract: The transport properties, magnetoresistance, and photoresponse are investigated in turbostratic multilayer graphene films grown by chemical vapor deposition.

Key words: turbostratic multilayer graphene, magnetoresistance, photothermoelectric effect.

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.29003/m1555.Silicon-2020/55-58>

УЧЁТ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПО СПАДУ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В ОБРАЗЦАХ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

Кобелева Светлана Петровна, к.ф.м.н., доцент^{1,2},
kob@misis.ru

Щемеров Иван Васильевич, к.т.н., старший преподаватель^{1,2}, schemerov.iv@misis.ru

Шарапов Артем Алексеевич, студент¹, s.artem11@mail.ru

Юрчук Сергей Юрьевич, к.ф.м.н., доцент¹, yurchuk60@mail.ru

¹ *НИТУ «МИСиС», г. Москва*

² *ООО «РИИС», г. Москва*

Аннотация: Одна из главных проблем при измерении рекомбинационного времени жизни (ВЖ,τ) по спаду

фотопроводимости — сильное влияние поверхностной рекомбинации на результат. Хорошо известная зависимость эффективного ВЖ от τ , толщины образца и скорости поверхностной рекомбинации описывает максимально достижимое измеряемое ВЖ. В данной работе показано, что при увеличении толщины измеряемого образца свыше 6 диффузионных длин максимальное ВЖ не достигается.

Ключевые слова: рекомбинационное время жизни, бесконтактные методы измерения, монокристаллический кремний.

Введение

В непрямозонных полупроводниках, таких как монокристаллический кремний (МК), наибольший вклад в рекомбинацию неравновесных носителей заряда вносит рекомбинация через примесные центры. Поэтому рекомбинационное время жизни (τ) ННЗ в этом случае обратно пропорционально концентрации глубоких центров, создаваемых в запрещённой зоне примесями и дефектами. Именно поэтому τ является марочным параметром кремния, характеризующим чистоту материала, и его измерение требуется на всех производствах на базе МК. В слитках и пластинах τ измеряется методом релаксации фотопроводимости (ФП). В непассивированных образцах на скорость спада ФП сильно влияет поверхностная рекомбинация (ПР). В работе на основе численных методов решения уравнения непрерывности приведены пределы применимости аналитических формул для оценки вклада ПР и предложены более точные формулы для расчета τ .

Основная часть

В отсутствии ПР спад ФП описывается экспонентой с параметром τ . В [1] было показано, что при наличии ПР релаксационная кривая представляет собой бесконечную сумму экспонент, параметр которых τ_{eff} описывается выражением:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_s} \quad (1)$$

где τ_s — бесконечный ряд значений, которые определяются граничными условиями на поверхности образца. Максимальное значение τ_s определяется выражением:

$$\tau_s = \frac{d}{2S} + \frac{d^2}{\pi^2 D} \quad (2)$$

где S — скорость поверхностной рекомбинации, d — толщина образца, D — коэффициент диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ). Эта формула приводится для оценки вклада поверхностной рекомбинации в τ_{eff} и делается вывод, что на «толстых» образцах $\tau = \tau_{eff}$. Оценивать τ_{eff} было предложено по второй части релаксационной кривой от 45 до 5% от величины максимального сигнала ФП [2], предполагая, что более быстрые экспоненты во второй части будут пренебрежимо малы.

В [3] на основе численного решения уравнения непрерывности было показано, что с увеличением толщины образца вклад быстрых экспонент увеличивается и остается заметным даже в области 5% от величины максимального сигнала ФП и расчет τ по (1-2) приводит к заметным ошибкам.

В работе получены зависимости τ_{eff} от толщины образцов, выраженной в единицах диффузионной длины ННЗ L , для $S=20000$ см/с. Граничные значения d/L , при которых погрешность расчетов τ по (1,2) не превышает 5% от результатов численного расчета, для образцов р-типа составляют соответственно 9 и 6, а для n-типа - 12 и 8 для τ 100 и 1000 мкс соответственно.

Выводы

Показано, что предельная толщина образцов для использования формул (1,2) зависит от типа проводимости и величины τ . Для относительной толщины не выше 6 формулы (1,2) применимы для обоих типов проводимости и практически важного интервала значений объемного рекомбинационного времени жизни 10 — 1000 мкс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Stevenson D.T. and Keyes R.G. Measurement of Carrier Lifetimes in Germanium and Silicon. J Appl Phys 26 190-5. 1955.
2. SEMI MF1535-00, Test method for carrier recombination lifetime in electronic-grade silicon wafers. PA. 2000.
3. Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, т. 80, № 1, 2014 г. с. 41-45.

CONSIDERATION OF SURFACE RECOMBINATION WHEN MEASURING THE RECOMBINATION LIFETIME FROM THE PHOTOCONDUCTIVITY DECAY IN LARGE-THICKNESS SAMPLES

Svetlana Petrovna Kobeleva, Ph.D., assoc. prof.^{1,2}, kob@misis.ru
Ivan Vasilievich Schemerov, Ph.D., assistant prof.^{1,2}, schemerov.iv@misis.ru

Artem Alekseevich Sharapov, student¹, s.artem11@mail.ru
Sergey Yurievich Yurchuk, Ph.D., assoc. prof.¹, yurchuk60@mail.ru

¹ NUST "MISiS", Moscow

² OOO "MEDNM", Moscow

Abstract: Surface recombination strongly influence on the photoconductivity decay curve. In this work it was shown that usually defined using this curve the effective life time don't achieve maxima value if silicon sample thickness exceeds six diffusion length. In this case well known formulas for calculation of free carrier recombination lifetime need to be adjusted.

Key words: free carrier recombination lifetime, non-contact measuring methods, silicon single crystal.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВЕРХТОНКИХ ПЛАСТИН
КРЕМНИЯ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СПОСОБАМИ ВЫРАЩИВАНИЯ
МАТЕРИАЛА ПЛАСТИН И ОБРАБОТКИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

*Аверкин Андрей Иванович, м.н.с.¹, andreyaverkin@mail.ru,
+7 (911) 008-33-89*

*Козлов Владимир Алексеевич, к.ф.-м.н., в.н.с.^{1,2},
kozlov@fidtech.com, +7 (812) 591-67-67*

*Николаев Владимир Иванович, к.ф.-м.н., в.н.с.¹,
nikolaev.v@mail.ioffe.ru, +7 (931) 238-28-90*

*Тимашов Роман Борисович, м.н.с.¹, timashov@inbox.ru,
+7 (921) 912-85-86*

*Федоров Максим Вячеславович, к.т.н., заместитель
генерального директора³, fedorov@gyro.ru, +7 (812) 542-46-02*

*Шпейзман Виталий Вениаминович, д.ф.-м.н., в.н.с.¹,
shpeizm.v@mail.ioffe.ru, +7 (921) 757-39-41*

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

²АО «ПК «ФИД-Техника, г. Санкт-Петербург

³АО «Гирооптика», г. Санкт-Петербург

Аннотация: измерена механическая прочность сверхтонких 100 мкм пластин Si в зависимости от способов выращивания Si и режимов механической обработки пластин (шлифовка абразивом, полировка алмазными пастами, химико-механическая полировка — ХМП).

Ключевые слова: пластины кремния, прочность, шлифовка, полировка, дефекты структуры.

Введение

Пластины кремния толщиной менее 100 мкм находят все большее применение в производстве приборов на их основе. Прочность Si зависит от методов выращивания Si, от способов изготовления сверхтонких пластин и режимов формирования

в них приборных структур. Современные данные по прочности сверхтонких отечественных пластин Si практически отсутствуют и нам представлялось актуальным исследовать их прочность в зависимости от отмеченных выше факторов.

Основная часть

В работе исследованы образцы Si толщиной 100 мкм. Использовались исходные пластины с толстыми слоями эпитаксиального Si или Si Чохральского, которые методами механической обработки (шлифовка порошками М14 и М7, полировка алмазными пастами АСМ 3/5 и химико-механическая полировка - ХМП) утонялись до толщины 100 мкм.

Прочность пластин Si определялась в испытаниях образцов на изгиб до разрушения способом «кольцо-в-кольцо», напряжения оценивались методом конечных элементов [1]. Испытуемые образцы имели диаметр 12 мм и вырезались из исходных 100 мм пластин Si методом импульсной лазерной резки. Параметры поверхности образцов анализировались с применением оптических, электронных и атомно-силовых микроскопов, структурные дефекты в образцах исследовались методами рентгеновской топографии.

Наименьшее усредненное значение прочности (0.26 GPa) показали образцы, изготовленные методами шлифовки. Наиболее прочными оказались образцы, утоненные последовательно шлифовкой, полировкой алмазными пастами и финишной ХМП (усредненная прочность превышала 1 GPa).

Выводы

Способы выращивания Si и методы механической обработки сверхтонких пластин Si заметно влияют на их прочность и должны учитываться при изготовлении приборных структур на их основе.

Список использованных источников

1. В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, А.О. Поздняков, А.В. Бобыль и др. Влияние текстурирования поверхности пластин кремния для солнечных фотопреобразователей на их прочностные свойства // ЖТФ, 2020, том 90, вып. 7, стр. 1168-1174.

INVESTIGATION OF ULTRA-THIN SILICON WAFERS STRENGTH DEPENDING ON WAFER MATERIAL GROWING METHODS AND SURFACE TREATMENT

*Andrei Ivanovich Averkin, junior researcher¹,
andreyaverkin@mail.ru, +7 (911) 008-33-89*

*Vladimir Alekseevich Kozlov, Ph.D., leading researcher^{1,2},
kozlov@fidtech.com, +7 (812) 591-67-67*

*Vladimir Ivanovich Nikolaev, Ph.D., leading researcher¹,
nikolaev.v@mail.ioffe.ru, +7 (931) 238-28-90*

*Roman Borisovich Timashov, junior researcher¹,
timashov@inbox.ru, +7 (921) 912-85-86*

*Maxim Fyodorov, Ph.D., Deputy General Director³,
fedorov@gyro.ru, +7 (812) 542-46-02*

*Vitaly Veniaminovich Shpeizman, Ph.D., leading researcher¹,
shpeizm.v@mail.ioffe.ru, +7 (921) 757-39-41*

¹ *Ioffe Institute, St. Petersburg*

² *AO "PK" FID-Technika, St. Petersburg*

³ *AO "Gyrooptika," St. Petersburg*

Annotation: the mechanical strength of ultra-thin 100 μm Si wafers was measured depending on Si growing methods and machining modes of wafer surface preparation (abrasive grinding, diamond paste polishing, chemical-mechanical polishing — CMP).

Key words: silicon wafers, strength, grinding, polishing, structure defects.

КУБИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ

Редькин Сергей Викторович к.т.н., ведущий научный сотрудник¹, sergeiredckin@yandex.ru, +7 (915) 130-94-84

Мальцев Петр Павлович д.т.н., профессор, научный руководитель¹, isvch@isvch.ru, +7 (916) 165-30-63

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич д.т.н., профессор, директор¹, gamkrelidze@isvch.ru, +7 (916) 713-22-99

¹ИСВЧПЭ РАН, Москва

Аннотация: Проведены работы по созданию базовой технологии формирования кубического карбида кремния (3C-SiC) на пластинах кремния (Si) в плазме высокочастотных (ВЧ и ВЧИ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) разрядов при низком давлении. Установлено, что процесс формирования слоев 3C-SiC на Si должен быть многостадийным, но интегрированным, т.е. одна стадия должна следовать за другой без развакуумирования рабочей камеры, только изменением режимов, газовых сред и подачей электрического смещения. Предложены технологические смеси: $\text{SiF}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$; $\text{SiF}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$. Установлено, что четырехчасовая обработка в ВЧИ разряде позволяет модифицировать кремневую (Si) пластину толщиной 375 мкм в карбид кремния (3C-SiC) на всю толщину. Следует отметить, что при этом, пластина утонялась на максимальную толщину 120 мкм. В предлагаемых плазменных методах формирование 3C-SiC на Si температуры не превышали 800°C. Слои 3C-SiC могут быть использованы для создания мощных нитридных приборов в СВЧ диапазоне, силовых приборов и других изделий электронной техники. Предложена упрощенная модель расчета скорости и времени протекания технологического процесса формирования кубического карбида кремния (3C-SiC) на кремнии (Si) в низкотемпературной плазме на основе механизма образования дефектов кристаллической решетки Si – вакансий по Шоттки.

Ключевые слова: кубический карбид кремния, кремний, PECVD процесс, карбидизация, травление, очистка, слой, пластина.

Введение

В настоящее время актуальны вопросы широкого использования в промышленности широкозонных полупроводников, одним из которых является карбид кремния, но применяемые сегодня гексагональные полиморфы (4H и 6H) дороги. Поэтому выращивание на кремнии кубического полиморфа 3C- SiC значительно снижает стоимость таких пластин - 3C- SiC на Si. В настоящей работе сделана попытка разработки принципиально новой плазменной технологии формирования слоев 3C- SiC на Si в отличие от термических методов. Нам удалось сформировать слои 3C- SiC, при температурах, не превышающих 800°C и ниже – подогрев осуществлялся или ламповый, или самой плазмой и отчасти СВЧ или ВЧ полями. Нами рассмотрены плазмы трех разрядов - традиционного ВЧ – разряда в диодной системе (13,56 МГц) ВЧИ-высокочастотного индукционного, их комбинации ВЧ диодного и ВЧ индукционного, а также СВЧ – разряда (2,45 ГГц) с магнитным полем (ЭЦР-электронный циклотронный резонанс).

Освоение широкозонных материалов, прежде всего карбида кремния (далее – SiC) и нитридов третьей группы, становится одним из главных направлений развития современной полупроводниковой электроники. Прогресс в области разработок приборов нового поколения связан с совершенствованием технологии приборов на широкозонных полупроводниках (SiC, GaN, алмаз и др.). С технологическим освоением данного класса материалов связываются ожидания в создании нового поколения приборов для высокотемпературной силовой и высокочастотной электроники, продвижение полупроводниковой оптоэлектроники в коротковолновую часть видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов спектра [1]. Подложки SiC в мировой практике используют, в основном, при

разработке отдельных приборов военного и специального назначения.

Массовое применение карбид кремниевых изделий электронной компонентной базы (далее – ЭКБ) сдерживается высокой стоимостью подложек SiC. Поэтому разработка путей снижения стоимости ЭКБ на основе SiC является актуальной проблемой. В России эта проблема стоит наиболее остро, что обусловлено необходимостью импортозамещения дорогих подложек фирмы CREE (США), на поставку которых в Российскую Федерацию наложено эмбарго. Следовательно, разработка экономически эффективной технологии формирования структур «карбид кремния на кремнии» является перспективным решением указанной проблемы, появятся технико-экономические условия для проведения масштабных разработок радиационноустойчивых изделий СВЧ ЭКБ и их внедрения в перспективные образцы изделий различного назначения.

Экспериментальная часть

Все наши технологические процессы были многостадийными и проводились в плазме при низких давлениях. В качестве реагентов мы использовали: SiF_4 , CF_4 , CH_4 , H_2 , Ar. Из них образовывали технологические смеси: $\text{SiF}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$; $\text{SiF}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$. Наряду с образованием SiC (3C-SiC), мы всегда один или два атома кремния переводим в летучее состояние и удаляем его из решетки Si исходной пластины и, тем самым, устраняем напряженное состояние между решетками Si и SiC из-за отличия их параметров. Следует обратить внимание и на нашу особенность – мы проводим процессы в плазме, а это значит, что поверхность пластины Si и образующегося слоя 3C-SiC подвержены бомбардировке заряженными частицами. При этом, должны и образуются дефекты структуры – вакансии, которые диффундируют внутрь кристалла, а это эквивалентно, что атомы Si движутся к поверхности, где «связываются» с компонентами наших газовых сред и образуют 3C-SiC и SiH_x , т.е. мы из структуры монокристалла Si переводим в летучее состояние отдельные

атомы Si и, тем самым, сопрягаем решетки 3C-SiC и пластины Si. Это еще одно объяснение утонения пластины и надежности сопряжения материалов с отличающимися параметрами решетки. Эксперименты с ВЧ системами показали, что смещение не должно превышать -50 В. В этом случае формируются качественные слои толщиной 30-40 мкм.

Соотношение Si/C близко к стехиометрическому. Результаты представлены на рисунке 1.

Спектр	В стат.	C	O	Si	Br	W	Au	Итог
Спектр 1	Да	57,85		42,15				100,00

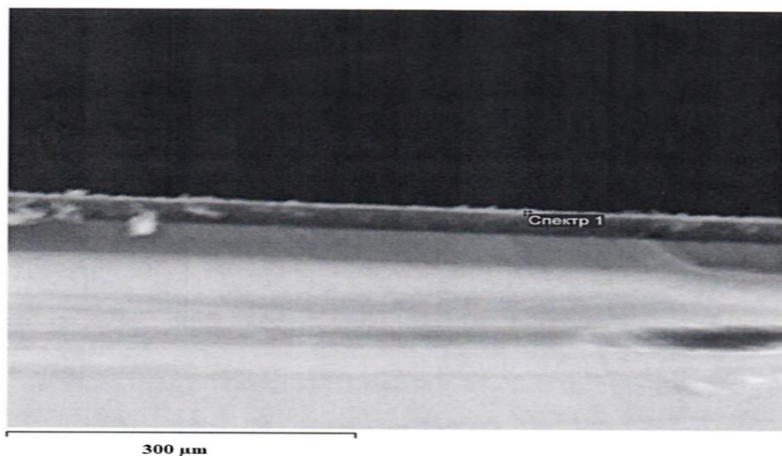


Рисунок 1 - Кубический карбид кремния на кремнии
(3C-SiC на Si)

Экспериментально установлено, что в процессе формирования слоев 3C-SiC на Si исходные пластины Si утоняются. Если в твердом теле есть градиент концентрации вакансий, то их поток будет двигаться сквозь твердое тело. Поэтому, если мы создаем этот градиент (обработка в плазме), то атомы Si находящиеся внутри пластины устремятся к ее поверхности, где протекают химические реакции с образованием летучих соединений и, таким образом,

удаляются из пластины, т.е. происходит утонение пластины. Так можно объяснить экспериментальный факт. Поскольку на поверхности пластины атомы Si удаляются, то следует признать, что у нас «работает» механизм образования вакансий по Шоттки и их диффузия внутрь пластины. В силу того, что подвижность электронов в плазме выше чем у ионов (ввиду значительной разницы в массе), то поверхность нашей пластины заряжается отрицательно. Возникает постоянное электрическое поле между пластиной и плазмой, поэтому диффузия вакансий, что эквивалентно диффузии атомов, ионов Si из внутренних слоев пластины будет определяться и градиентом концентрации, и электрическим полем, и тепловым полем. Скорость взаимодействия будет определяться скоростью генерации дефектов на поверхности и их регенерацией за счет атомов и ионов, находящихся внутри кристалла.

Заключение

На макетных образцах ВЧ, ВЧИ, ВЧИ+ВЧ, СВЧ плазменных технологических установок были сформированы слои 3C-SiC на Si. Для того чтобы слои не отслаивались от Si (ввиду разницы параметров решетки) процесс должен быть многостадийным, и операция травления обязательна и должна предшествовать имплантации и дальнейшему эпитаксиальному росту. Поскольку в экспериментах по формированию слоев 3C – SiC на Si установлено утонение пластины Si, предложенная модель позволяет объяснить это явление и оценить некоторые его параметры, которые хорошо согласуются с общим процессом – формированием 3C – SiC и утонением Si. Удаление атомов Si (в соединениях SiH_x и SiF_x) необходимо для согласования кристаллических решеток 3C – SiC и Si (чтобы слои 3C – SiC не отслаивались). Таким образом, процесс утонения Si пластины является неотъемлемым процессом для формирования качественных слоев 3C – SiC на Si и может выступать как индикатор всего интегрированного процесса и его параметры (скорость и время) могут служить (в нулевом приближении) как параметры всего технологического процесса. На способ

СВЧ плазменного формирования пленок кубического карбида кремния на кремнии получен патент РФ.

Список использованных источников

1. Лучинин В.В., Мальцев П.П., Поляков Е.П. Широкозонные материалы - основа экстремальной электроники будущего. Микроэлектроника, 1999, том 28, №1, с. 21-29.

CUBIC SILICON CARBIDE ON SILICON

Sergey Viktorovich Redkin, Ph.D., Senior Researcher¹, sergeiredkin@yandex.ru, +7 (915) 130-94-84

Petr Pavlovich Maltsev, Doctor of Engineering Sciences, professor, scientific supervisor¹, isvch@isvch.ru, +7 (916) 165-30-63

Sergey Anatolievich Gamkrelidze, Doctor of Engineering Sciences, professor, director¹, gamkrelidze@isvch.ru, +7 (916) 713-22-99

¹ IUHFSE RAS, Moscow

Abstract: A basic technology for cubic silicon carbide (3C-SiC) formation on silicon (Si) plates in high-frequency (HF and HFI) and very-high-frequency (microwave) discharges at low pressure has been developed. It is found that 3C-SiC layers formation on Si should be multiple staged, but integrated, i.e. sequential change of stages should be performed without working chamber de-evacuating and accompanied only by changing modes, gaseous media and applying electrical displacement. The following technological mixtures have been proposed: $\text{SiF}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$; $\text{SiF}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$.

It was found that a four-hour treatment in HFI discharge allows to modify a silicon (Si) plate (375 μm thickness) to silicon carbide (3C-SiC) at the entire thickness. It should be noted that the plate was thinned to maximum thickness of 120 μm . In the proposed plasma methods, 3C – SiC formation on Si did not exceed 800°C. 3C-SiC layers can be used in the development of powerful nitride devices in the microwave range, power devices and other electronic products. A simplified model is proposed for calculating the rate and time of technological process of cubic silicon carbide (3C-SiC)

formation on silicon (Si) in a low-temperature plasma based on the lattice damage mechanism of Si-vacancy positions according to Schottky.

Key words: cubic silicon carbide, silicon, PECVD process, carbonization, etching, purification, layer, plate.

УДК 538.911

<https://doi.org/10.29003/m1558.Silicon-2020/68-70>

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*Леньшин Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., в.н.с.¹,
lenshinas@mail.ru, +7 (472) 220-83-63*

*Барков Константин Александрович, зав. лаб.¹, асп.
barkov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63*

*Скопинцева Наталья Геннадиевна, студ., skopin@mail.ru,
+7 (472) 220-83-63*

*Минаков Дмитрий Анатольевич, к.ф.-м.н. с.н.с.¹,
minakov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63*

*Середин Павел Владимирович, д.ф.-м.н. проф.¹,
paul@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63*

¹ ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж

Аннотация: В работе методами оптической и рентгеновской спектроскопии были исследованы особенности фазового состава и химических связей поверхности образцов многослойного пористого кремния, выращенных при различных условиях.

Ключевые слова: пористый кремний, спектроскопия

Методы исследования

Многослойный пористый кремний может применяться в качестве планарных волноводов с низким уровнем потерь для

целей интегральной оптики, различных видов оптических, газовых и биологических сенсоров, в качестве фотонных кристаллов. Пористый кремний (por-Si) был получен электрохимическим травлением кремниевых пластин c-Si (100) n-типа проводимости. В качестве травителя использовался раствор на основе HF, C₃H₇OH и перекиси водорода, взятых в соотношении 2:2:1. Для получения многослойной структуры различной морфологии проводилось последовательное ступенчатое изменение плотности тока анодирования. ИК-спектры пропускания образцов были получены на спектрометре Vertex 70. Рентгеновские эмиссионные USXES Si L_{2,3} спектры образцов были получены на уникальном рентгеновском спектрометре «PCM-500». Глубина анализа данным методом ~ 30 и 60 нм [1].

Результаты

По данным ИК-спектроскопии (глубина анализа ~ 1-10 мкм) было установлено, что с увеличением плотности тока анодирования образцов в одностадийном режиме наблюдается увеличение интенсивности полос поглощения, соответствующих водородным и кислородным связям с кремнием, что можно объяснить увеличением удельной плотности поверхности пористого слоя, приводящей к дополнительному окислению и большей адсорбции связей Н и ОН групп с поверхности. Скорость травления двухслойного образца определялась суммой скоростей травления отдельных слоев. Анализ данных USXES показывает, что при двухстадийном травлении увеличение тока анодирования способствует окислению более глубоких слоев пористой структуры, при этом вклад окисла на поверхности несколько снижается, а уменьшение тока анодирования при двухстадийном травлении в свою очередь существенно снижает вклад оксидов в фазовый состав более глубоких слоев por-Si.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Воронежской области в рамках научного проекта 19-42-363004.

Список использованных источников

1. А.С. Леншин, К. А. Барков и др. Влияние режимов электрохимического травления при одностадийном и двухстадийном формировании пористого кремния на степень окисления его поверхностных слоев в естественных условиях//Конд. среды и межф. границы, 2019, 21(4), с. 534–543.

FEATURES OF FORMATION AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF MULTILAYER SYSTEMS BASED ON POROUS SILICON

Alexander Sergeevich Lenshin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher¹, lenshinas@mail.ru, +7 (472) 220-83-63

Konstantin Alexandrovich Barkov, head. lab. 1, asp. barkov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Natalya Gennadievna Skopintseva, student, skopin@mail.ru, +7 (472) 220-83-63

Dmitry Anatolyevich Minakov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences c.s.¹, minakov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Pavel Vladimirovich Seredin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences prof.¹, paul@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

¹ FGBOU VO "Voronezh State University", Voronezh

Abstract: In this work, the features of the phase composition and chemical bonds of the surface of multilayer porous silicon samples grown under different conditions were investigated by methods of optical and X-ray spectroscopy.

Key words: porous silicon, spectroscopy

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Voronezh Region within the framework of the research project 19-42-363004.

ПЛАНАРНЫЕ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ КОЛОНКИ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Миланина Ксения Игоревна, студент¹,
potienko97@gmail.com, +7 (937) 643-27-96

Агафонов Андрей Николаевич, кандидат тех. наук, доцент
кафедры нанотехнологий¹, agaonov.ssau@yandex.ru, +7 (917) 114-81-85

¹ Самарский университет, г. Самара

Аннотация: В данной работе представлены основные этапы разработки технологии изготовления планарных газохроматографических колонок.

Ключевые слова: газохроматографическая колонка, кремний, аналитическая химия.

Введение

Целью данной работы является разработка технологии изготовления планарных газохроматографических колонок на базе кремниевых подложек. Такие планарные колонки могут быть эффективно применены в аналитических устройствах для анализа состава газа вместо классических хроматографических колонок, при этом, появляется возможность значительного снижения массогабаритных параметров, времени единичного цикла анализа, а также стоимости конечного устройства [1,2].

Основные технологические этапы

В данной работе предлагается технология изготовления планарных газохроматографических колонок с помощью плазмохимического травления (ПХТ) кремния с интеграцией в их структуру планарного нагревательного элемента

(промежуточного металлического слоя) для поддержания необходимой температуры исследуемого вещества. Использование ПХТ позволяет получить большее разнообразие видов микроканалов в сравнении с жидкостным травлением за счет возможности реализации анизотропного травления (bosch-процесс). В частности, с помощью сочетания фотолитографии и ПХТ можно изготовить колонки с заданной структурой внутри канала (например пилларные колонки). В ходе выполнения работы авторы получили каналы в кремнии с шириной около 100 мкм и глубиной до 40 мкм, что говорит о возможности их использования в газовой хроматографии.

На данный момент все эксперименты проводились на подложках с размерами до 25x75 мм, что ограничивает длину микроканала.

Герметизация системы микроканалов осуществлялась посредством анодного сращивания с подложкой из боросиликатного стекла.

Выводы

В результате проделанных конструкторско-технологических работ была разработана технология изготовления микроканалов для планарных газохроматографических колонок на базе кремниевых подложек и изготовлены тестовые образцы таких устройств.

Список использованных источников

Wang X., Zhu Y., Fang Q. Valveless gated injection for microfluidic chip-based liquid chromatography system with polymer monolithic column // Journal of Chromatography. 2012. Vol. 1246. pp. 123-128.

Platonov I.A., Platonov V.I., Agafonov A.N. Study of the sorption properties of planar micropacked gas-chromatographic columns of polycapillary and pillar types // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1989.

PLANAR GAS CHROMATOGRAPHIC COLUMNS MANUFACTURED ON SILICONE SUBSTRATES

Ksenia Igorevna Milanina, student¹, potienko97@gmail.com, +7 (937) 643-27-96

*Andrey Nikolaevich Agafonov, Candidate of Technical Sciences,
Department of Nanoengineering¹, agafonov.ssau@yandex.ru, +7 (917) 114-81-85*

¹ Samara University, Samara

Abstract: This paper presents the main stages in the development of technology for the manufacture of planar gas chromatographic columns.

Key words: gas chromatographic column, silicon, analytical chemistry.

УДК 544.032.5

<https://doi.org/10.29003/m1560.Silicon-2020/73-75>

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МГД ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА КРЕМНИЯ

Карабанов Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник¹, pvs.solar@gmail.com, +7 (996) 910-07-53

Суворов Дмитрий Владимирович, к.т.н., ведущий научный сотрудник¹, Dmitriy_Suvorov@mail.ru, +7 (910) 562-24-94

Сливкин Евгений Владимирович, к.т.н., старший научный сотрудник¹, e.slivkin@mail.ru, +7 (920) 951-47-10

Тарабрин Дмитрий Юрьевич, к.т.н., старший научный сотрудник¹, tarabrin-dmitriy@mail.ru, +7 (953) 732-12-92

Теруков Евгений Иванович, д.т.н., профессор, зав. лабораторией², +7 (911) 835-39-84

¹ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Аннотация: в работе проводится оценка эффективности различных параметров процесса магнитогидродинамического (МГД) перемешивания расплава кремния.

Ключевые слова: кремний, расплав, массообмен, фазовый сдвиг, частота, магнитогидродинамическое перемешивание.

Введение

Перспективным методом интенсификации процессов очистки кремния от примесей в процессе производства слитков мультикристаллического кремния является МГД перемешивание расплава [1,2]. Оно обеспечивает интенсивный массообмен с поверхностью, что существенно увеличивает скорость очистки и, соответственно, снижает затраты на процесс роста кристаллов. Ключевым параметром, отражающим эффективность массообмена с поверхностью, является скорость движения расплава.

МГД перемешивание расплава кремния

В работе экспериментально исследованы зависимости поверхностной скорости движения расплава кремния при МГД перемешивании от фазового сдвига и частоты токов в индукторах. Установлено, что характер зависимостей имеет четко выраженный максимум при значении фазового сдвига токов 60° и частоты 50 Гц.

Выводы

Экспериментально установлены наиболее эффективные значения фазового сдвига и частоты МГД перемешивания. Максимальная скорость движения расплава на поверхности установлена при значении фазового сдвига токов в индукторах равном 60° и частоте тока 50 Гц.

Список использованных источников

1. Dropka, N., W. Miller, U. Rehse, P. Rudolph, F. Büllesfeld, U. Sahr, O. Klein, D. Reinhardt. Numerical study on improved mixing in

silicon melts by double-frequency TMF // Journal of Crystal Growth. - 2011. - Vol. 318 - pp. 275–279.

2. Qinghua Yu, Lijun Liu, Zaoyang Li, Peng Su. Global simulations of heat transfer in directional solidification of multi-crystalline silicon ingots under a traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth, Volume 401, 2016, pp. 285-290.

PECULIAR PROPERTIES OF THE ELECTROMAGNETIC STIRRING OF SILICON MELT

Sergey Karabanov¹, Doctor of Technical Sciences, professor, chief researcher pvs.solar@gmail.com, +7 (996) 910-07-53

Dmitry Suvorov¹, Ph.D., leading researcher, Dmitry_Suvorov@mail.ru, +7 (910) 562-24-94

Slivkin Evgeny¹, Ph.D., Senior Researcher, .slivkin@mail.ru, +7 (920) 951-47-10

Dmitry Tarabrin¹, Ph.D., Senior Researcher, tarabrin-dmitriy@mail.ru, +7 (953) 732-12-92

Terukov Evgeny², Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Laboratory, +7 (911) 835-39-84

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

²Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract: The paper evaluates the effectiveness of various parameters of the electromagnetic stirring of a silicon melt.

Key words: silicon, melt, mass transfer, phase shift, frequency, electromagnetic stirring.

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВ

Логинова Екатерина Максимовна, студент¹,
loginova10057@gmail.com, +7 (927) 753-66-11

Лизункова Дарья Александровна, к.ф.-м.н., старший
преподаватель¹, daria.lizunkova@yandex.ru, +7 (927) 908-35-96

¹Самарский Университет, г. Самара

Аннотация: Одним из перспективных объектов для разработки наноструктурных систем доставки является пористый кремний. Цель настоящей работы – обзор литературных источников, включающих вопросы исследования создания лекарственных форм на основе пористого кремния.

Ключевые слова: адресная доставка лекарств, пористый кремний, наноконтейнер.

Введение

Кремний является компонентом всех клеток человеческого организма, его среднесуточное потребление составляет порядка 20-50 мг. В зависимости от степени пористости, кремниевые частицы могут быть биологически активны, биоинертны или биоразлагаемы [1-3]. Биоинертные материалы не разлагаются в организме человека, но они не являются вредными и легко экскретируются. Мезопористый кремний в организме человека разрушается до мономерных кремниевых кислот [5-6]. В настоящее время активно исследуется возможность применения порошков пористого кремния как материалов для наноконтейнеров для транспортировки лекарственных средств [7-8].

Основная часть

Целевая доставка лекарственных препаратов — это доставка их способом, управляемым во времени и пространстве. Например, в желательное место и время, с соответствующей скоростью высвобождения и подходящей длительностью. Такой уровень управления дает возможность преодолеть неблагоприятные физико-химические биофармацевтические свойства некоторых лекарственных препаратов и в конечном счете повысить их терапевтическую эффективность и безопасность. Одной из главных проблем в нанометровых системах доставки лекарств является изготовление наноносителей с высокой стабильностью в физиологических условиях, которые смогут эффективно инкапсулировать терапевтические агенты и контролируемо выпускать свою полезную нагрузку [7]. Кроме того, управляя развитостью поверхности и пористостью, возможно в перспективе регулировать скорость высвобождения лекарственного препарата и скорость рассасывания контейнера в организме и др.

Выводы

Таким образом, наночастицы пористого кремния являются перспективным материалом для создания лекарственных форм различного фармакологического действия.

Список использованных источников

1. Canham L. Handbook of Porous Silicon. Springer, 2014. 1017 p.
2. Diffusion and Molecular Exchange in Hollow Core-Shell Silica Nanoparticles / A. Pochert [et al.] // Langmuir. 2015. Vol. 31. Pp. 10285–10295.
3. Состав и реакционная способность нанопорошков пористого кремния / А.С. Леншин [и др.] // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 10. С. 1091–1096.
4. Preparation and degradation of the optical properties of nano-, meso-, and macroporous silicon / A.S. Lenshin [et al.] //

Materials Science in Semiconductor Processing, February. 2015. Vol. 30. Pp. 25–30.

5. Краснюк И.И., Беленова А.С., Сливкин А.И. Фармацевтическая технология. Высокомолекулярные соединения в фармации и медицине. М: ГЭОТАР-Медиа, 2017. 560 с.

6. Шевченко В.Я., Киселева О.И., Соколова В.Н. Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине. СПб.: Химиздат, 2015. 367 с.

7. Porous silicon in drug delivery device and materials / Anglin E.J., Cheng L.Y., Freeman W.R., Sailor M.J. // Advanced Drug Delivery Reviews. 2008. Vol. 60(11). Pp.1266-1277.

NANOSTRUCTURED SILICON AS MATERIAL FOR ADDRESSED DRUG DELIVERY

Ekaterina Maksimovna Loginova¹, student,
loginova10057@gmail.com, +7 (927) 753-66-11

Daria Alexandrovna Lizunkova¹, Ph.D., Senior Lecturer,
daria.lizunkova@yandex.ru, +7 (927) 908-35-96

¹ Samara University, Samara

Abstract: Porous silicon is one of the promising objects for the development of nanostructured delivery systems. The purpose of this work is to review the literature, including the issues of studying the creation of dosage forms based on porous silicon.

Key words: targeted drug delivery, porous silicon, nanocontainer.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КРЕМНИЕМ

Полуэктова Наталья Алексеевна, студент¹,
natapolivekt37@gmail.com, +7 (927) 742-50-73

Лизункова Дарья Александровна, к.ф.-м.н., старший
преподаватель кафедры наноинженерии¹,
daria.lizunkova@yandex.ru, +7 (927) 908-35-96

¹ Самарский университет, г. Самара

Аннотация: В данной работе было изучено влияние технологических параметров на вольтамперные характеристики солнечных элементов с наноструктурированным кремнием. Показано, что для структур с развитой поверхностью требуется подбор оптимальных режимов диффузии.

Ключевые слова: кремниевые нанонити, пористый кремний, солнечные элементы, диффузия.

Введение

Преобразование солнечной энергии в электрическую является важной научно-технической проблемой, связанной с перспективным направлением энергетики будущего.

Особенности технологии создания фоточувствительных структур

В 2004 году была сделана первая попытка изготовить эффективные солнечные батареи на основе кремниевых нанонитей традиционным методом легирования фосфором[1].

На рисунке 1а показаны изготовленные фотоэлектрические элементы на основе кремниевых нанонитей, полученные методом МСХТ с р-п переходом.

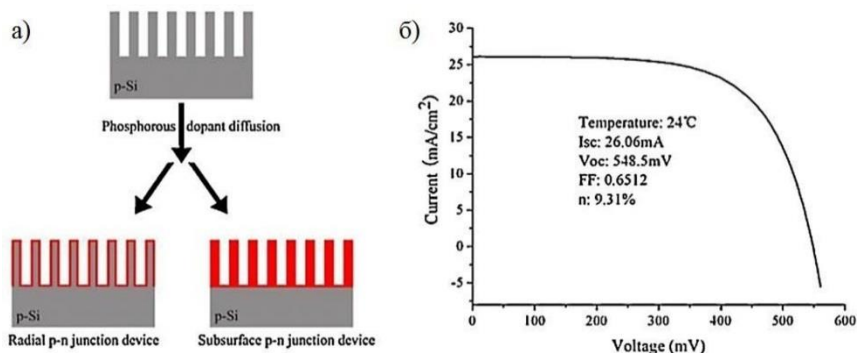


Рисунок 1 - Схематическая иллюстрация изготовления солнечных элементов на основе КНН с р-п переходом(а) и соответствующая ВАХ солнечных элементов на основе КНН(б)

Таким образом, солнечные элементы на основе КНН вели себя как обычные планарные солнечные батареи с р-п переходом. Из-за высокой поверхностной/межфазной рекомбинации и большой последовательности сопротивления, изготовленные на основе КНН солнечные элементы показывали эффективность 9,31%, которая была намного ниже, чем у обычных солнечных элементов с р-п переходом.

Подобные результаты показывают структуры с пористым кремнием (рисунок 2), изготовленные электрохимическим травлением. Различная технология изготовления (порообразование до или после диффузии) оказывает существенное влияние на эффективность преобразования.

Закключение

Таким образом, наиболее эффективной структурой является структура, изготовленная при режиме порообразования до диффузии. Такие структуры, благодаря развитой поверхности, обладают более длинным р-п-переходом, что позволяет генерировать больше электрон-дырочных пар (рисунок 2 схема а).

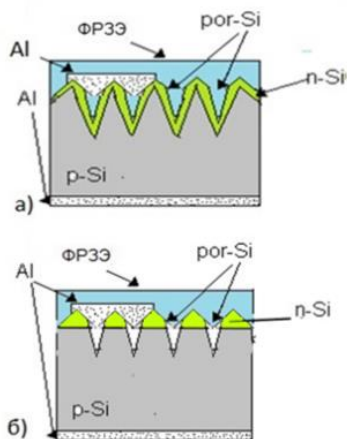
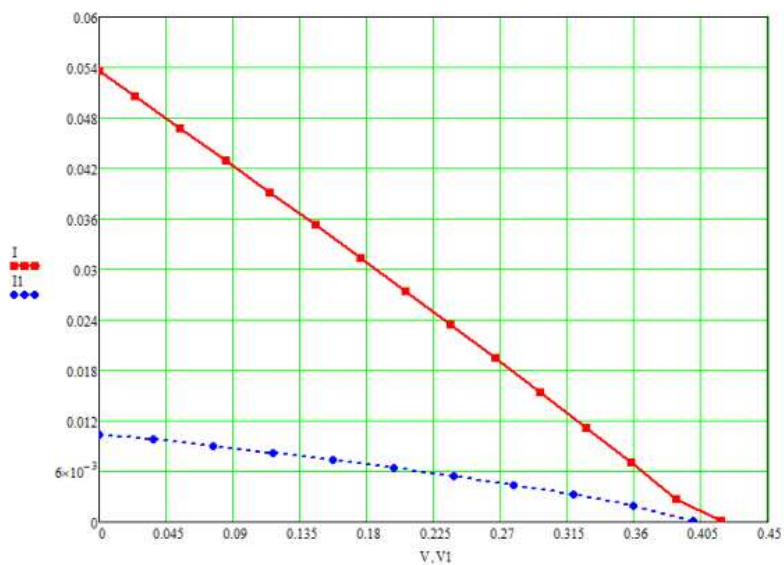


Рисунок 2 - Вольтамперная характеристика
фоточувствительных структур с порообразованием
до диффузии (красная линия, схема а)
и после диффузии (синяя линия, схема б)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Peng K.Q. Ph.D. Dissertation. – Tsinghua University. – China.– 2004.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF PHOTOSENSITIVE STRUCTURES WITH NANOCRYSTALLINE SILICON

Natalia Alekseevna Poluektova¹, student,
natapolivekt37@gmail.com, +7(927) 742-50-73

Daria Alexandrovna Lizunkova¹, Ph.D., Senior Lecturer,
daria.lizunkova@yandex.ru, +7 (927) 908-35-96

¹ Samara University, Samara

Abstract: In this work, the influence of technological parameters on the current-voltage characteristics of solar cells with nanostructured silicon was studied. It is shown, that for structures with a developed surface, the selection of optimal diffusion regimes is required.

Key words: silicon nanowires, porous silicon, solar cells, diffusion.

УДК 535.016

<https://doi.org/10.29003/m1563.Silicon-2020/82-85>

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КАРБИДИЗИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ

Полуэктова Наталья Алексеевна, студент¹,
natapolivekt37@gmail.com, +7 (927) 742-50-73

Латухина Наталья Виленовна, к.т.н., доцент¹,
natalat@yandex.ru, 8 (846) 334-54-55

Ченурнов Виктор Иванович, к.т.н., доцент¹,
Chvi44@yandex.ru, 8 (846) 334-54-55

*Павликов Александр Владимирович, к.ф.-м.н., доцент²,
pavlikov@physics.msu.ru, тел. +7 (495) 939-18-75*

*Головань Леонид Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор²,
golovan@physics.msu.ru, тел. +7 (495) 939-18-75*

¹ Самарский университет, г. Самара

² Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Аннотация: В работе исследуются оптические свойства карбидизированных кремниевых нанонитей (SiNW).

Ключевые слова: нанонити, SiNW, SiC, нелинейная оптика.

Введение

Использование кристаллического кремния (с-Si) с пористым слоем на поверхности для создания гетероструктур карбида кремния и кремния (SiC/Si) позволяет сочетать высокие эксплуатационные характеристики слоев SiC с хорошо развитой кремниевой технологией. В электронике SiC применяется в сверхбыстрых высоковольтных диодах Шоттки, МОП-транзисторах и в высокотемпературных тиристорах [1].

Методика эксперимента

Образцы были получены путем карбидизации слоев кремниевых нанонитей (SiNW). Слои SiNW на подложке с-Si получались посредством химического металл-стимулированного травления в растворе $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HF}$. Далее полученные SiNW подвергались процессу карбидизации экспонированием в газовом потоке водорода, содержащем углеводороды при температуре 1360-1380°C.

Возбуждение второй гармоники (ВГ) осуществлялась излучением $\lambda = 1230$ нм, генерируемым в параметрическом генераторе света EKSPLA PG501P. Регистрация осуществлялась с помощью спектрометра Solar LS M266 и ПЗС камерой Hamamatsu TCD 1205. Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КРС) осуществлялось с помощью установки Horiba HR800.

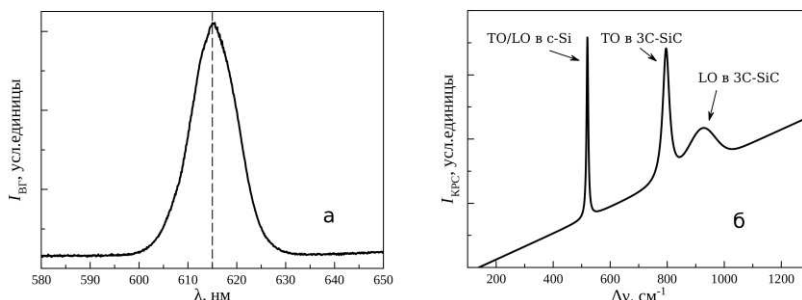


Рисунок 1 – Спектры ВГ (а) и КРС (б) исследуемых образцов.

Экспериментальные результаты

На рис.1а представлен спектр ВГ. Эффективность генерации ВГ в нецентросимметричных кристаллах SiC на несколько порядков выше, чем в исходных образцах SiNW ввиду центральной симметрии решетки последних. На рис.1б представлен спектр КРС, на котором виден сигнал, как от c-Si, так и от 3C-SiC. Сочетание этих данных убедительно доказывает, что в результате карбидизации SiNW происходит формирование нанокристаллов SiC, демонстрируя тем самым возможность оптической диагностики наноструктур SiC.

Список использованных источников

1. Е. Обжерин, Силовые модули на карбиде кремния // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2009, №7, С.22-24.

OPTICAL DIAGNOSTICS OF CARBIDIZED SILICON NANOWIRES

Natalia Alekseevna Polyektova¹, student,
natapolivekt37@gmail.com, +7 (927) 742-50-73

Natalia Vilenovna Latuhina¹, Ph.D. docent, natalat@yandex.ru,
+7 (903) 334-71-98

Viktor Ivanovich Chepurnov¹, Ph.D. docent, Chvi44@yandex.ru,
+7 (927) 693-91-46

Alexander Vladimirovich Pavlikov², Ph.D. docent,
pavlikov@physics.msu.ru, +7 (495) 939-18-75

*Leonid Anatolyevich Golovan², Ph.D. professor,
golovan@physics.msu.ru, +7 (495) 939-18-75*

¹ Samara University, Samara

*² Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University,
Moscow*

Abstract: In this work the optical properties of carbidized silicon nanowires (SiNW) are investigated.

Key words: nanowires, SiNW, SiC, nonlinear optics.

УДК 621.482

<https://doi.org/10.29003/m1564.Silicon-2020/85-87>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
НИЗКОИНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР
«КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»**

*Абросимова Наталья Дмитриевна, аспирантка¹,
andnenastik@inbox.ru*

Кипелкин Иван Михайлович, студент¹

*Оболенский Сергей Владимирович, д.т.н., профессор,
директор²*

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

²НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Аннотация: В работе сопоставлены результаты исследований влияния низкоинтенсивного низкоэнергетического рентгеновского излучения на электрофизические характеристики структур «кремний на изоляторе» различных производителей.

Ключевые слова: кремний на изоляторе, встроенный заряд, вольт-фарадные характеристики, ртутный зонд.

Введение

Целью работы являлось получение зависимости электрофизических характеристик структур КНИ различных производителей от дозы низкоинтенсивного низкоэнергетического излучения и оценка степени влияния облучения на их дефектный состав.

Основная часть

Объектами исследований являлись структуры КНИ n- и p-типов проводимости с толщинами слоев 200, 482 и 637 нм отечественных и зарубежных производителей до и после воздействия различных доз низкоинтенсивного низкоэнергетического рентгеновского излучения.

Исследования проводились методами ВАХ, ВЧ и НЧ ВФХ, методом проводимости с помощью системы контроля электрофизических параметров со ртутным зондом, позволяющей выполнять измерения непосредственно на пластине, исключая нанесение контактных площадок [1]. Облучение проводилось различными дозами в различных областях пластины (области обозначены А, В, С, дозы облучения соотносятся как $D_A > D_B > D_C$). Сопоставлялись данные до и после облучения.

Анализируя полученные данные, можно констатировать заметное различие в их радиационном отклике. В области облучения, соответствующей меньшей дозе, в структурах КНИ происходит накопление объемного заряда, и скорость его накопления для них отличается. При увеличении дозы облучения становится заметной разница наклонов C-V характеристики в области обеднения, что свидетельствует о различной скорости образования поверхностных состояний. Также существенно отличается вид C-V характеристик в области инверсии. При дальнейшем увеличении дозы характер различий сохраняется.

Зафиксированная разница радиационного отклика косвенно свидетельствует о том, что микросхемы, изготовленные на пластинах различных производителей, также будут иметь различия радиационного отклика.

Список использованных источников

1. Dieter K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization. John Wiley & Sons, Inc. 1990.

LOW-ENERGY LOW-INTENSITI X-RAY RADIATION EFFECT ON THE SOI STRUCTURES ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS

Natalya Abrosimova, Ph.D.r¹, andnenastik@inbox.ru

Ivan Kipelkin, student¹

Obolensky Sergey, doctor, professor, director²

¹ Lobachevsky State University, N.Novgorod

² Radiophysical Research Institute, N.Novgorod

Abstract: The low-energy low-intensity X-ray radiation effect on SOI structure electrophysical characteristics research results by mercury probe method is concerned here.

Key words: SOI structures, capacitance-voltage characteristics, mercury probe.

УДК 661.689, 538.9

<https://doi.org/10.29003/m1565.Silicon-2020/87-91>

СИНТЕЗ И ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Мазинов Алим Сеит-Аметович, к.т.н., доцент кафедры радиофизики и электроники¹, mazinovas@cfuv.ru, +7 (978) 768-49-67

Тютюник Андрей Сергеевич, младший научный сотрудник физико-технического института¹, real-warez@mail.ru

Гурченко Владимир Сергеевич, аспирант кафедры радиофизики и электроники¹, gurchenko_v@mail.ru

*¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
г.Симферополь*

Аннотация: Рассмотрен метод получения наноструктурированных углеродных и кремниевых порошковых материалов. Показаны микрофотографии полученного нанокристаллического кремния. Приведены температурные зависимости проводимости нанокристаллического кремния, фуллерена содержащего материала и кремний-углеродного соединения.

Ключевые слова: нанокристаллический кремний, плазмохимический синтез, фуллеренсодержащий материал.

Введение

В современной микро- и нанoeлектронике использование порошковых технологий обладает существенным преимуществом – уменьшение размеров функциональных частей полупроводниковых приборов при относительно дешевизне [1]. В свою очередь использование углеродных порошковых материалов позволит увеличить эффективность полупроводниковых приборов, с параллельным уменьшением себестоимости продукции [2]. Поэтому целью нашей работы являлся анализ кремниевых и углеродных структур, полученных методом плазмохимического синтеза.

Метод получения и микрофотографии

Представленные наноструктурированные материалы получены методом плазмохимического синтеза. Суть метода заключается в подаче микро- и макрочастиц в плазму, где они испаряются при температуре 8000-12000 °С. Далее атомы исходного материала подвергаются быстрой закалке при встречных газовых потоках. Посредством аэроселекции происходит фильтрование мелких от крупных частиц (рис.1). Конечным результатом плазмохимической реакции является набор макро- и микрочастиц неправильной формы (вставка рис.1)

Температурные зависимости проводимости и энергия активации

Получены температурные зависимости кремниевых, кремний-углеродных и углеродных наноструктур (рис. 2). Температурная зависимость проводимости показала активационный характер, который можно объяснить наличием порошковой проводимости по дефектам границ нанокристаллов.

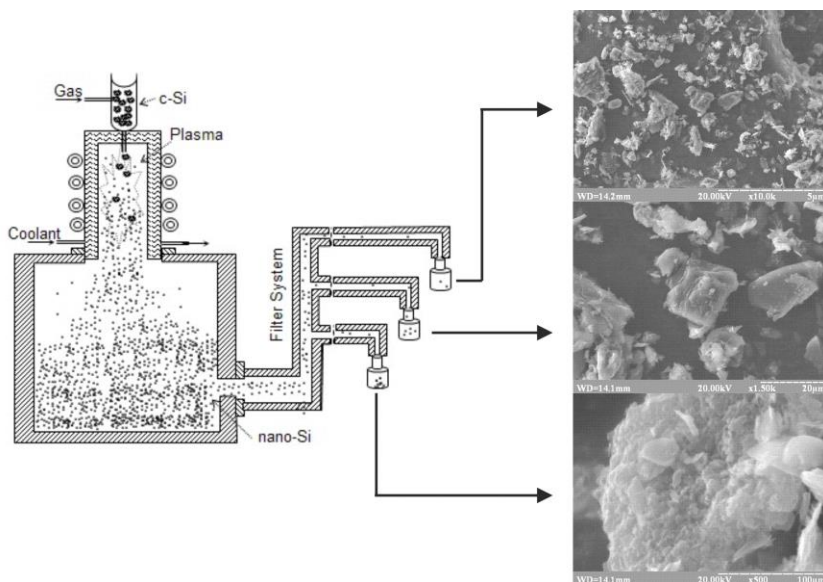


Рисунок 1 – Схема установки плазмохимического синтеза наноструктурированных порошков

После нахождения зависимостей проводимости от температуры были получены зависимости энергии активации. Для кремниевых структур она составила 0,12 эВ, кремний-углеродных – 0,1 эВ и углеродных 0,76 эВ.

$$E_g = -\frac{2kT_1T_2}{(T_2 - T_1)} * (\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2)$$

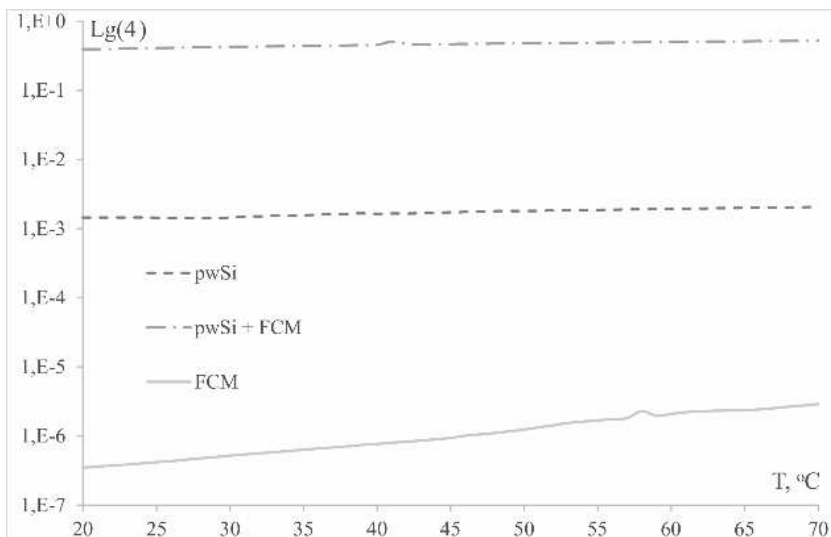


Рисунок 2 – Температурные зависимости проводимости: кремниевых (pwSi); кремний-углеродных (pwSi+FCM); углеродных (FCM) материалов

Выводы

Таким образом, проведённые нами исследования показали возможность использования наноструктурированных материалов, полученных методом плазмохимического синтеза.

Список использованных источников

1. Мазинов А.С., Шевченко А.И., Карпенко Н.И., Гурченко В.С. Токовые характеристики нанокристаллического порошкового кремния, полученного методом высокотемпературного плазмохимического синтеза // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2017. № 1, С. 59-64.
2. Мазинов А.С., Работягов К.В., Гурченко В.С., Тютюник А.С. Влияние структурных особенностей фуллеренсодержащего материала на его резистивные свойства // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2018. № 2, С. 86-93.

SYNTHESIS AND CONDUCTING PROPERTIES OF SILICON-CARBON NANOSTRUCTURES OBTAINED BY THE METHOD HIGH-TEMPERATURE PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS

Alim Seit-Ametovich Mazinov, Ph.D., Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronics¹, mazinovas@cfuv.ru +79787684967

Andrey Sergeevich Tyutyunik, junior researcher at the Institute of Physics and Technology¹, real-warez@mail.ru

Vladimir Sergeevich Gurchenko, postgraduate student of the Department of Radiophysics and Electronics¹, gurchenko_v@mail.ru

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation

Abstract: A method for obtaining nanostructured carbon and silicon powder materials is considered. Shown are micrographs of the obtained nanocrystalline silicon. The temperature dependences of the conductivity of nanocrystalline silicon, fullerene-containing material, and a silicon-carbon compound obtained by plasma-chemical synthesis are presented.

Key words: nanocrystalline silicon, plasma-chemical synthesis, fullerene-containing material.

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.29003/m1566.Silicon-2020/91-94>

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАКАНСИОННЫХ КЛАСТЕРОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CZ-GE ДИАМЕТРОМ 200 ММ, ВЫРАЩЕННЫХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

Наумов Аркадий Валерьевич, ведущий инженер¹

Смирнова Наталья Николаевна, к.т.н., ведущий инженер¹, v@aiz.com, 8(916) 321-33-73

Старцев Вадим Валерьевич, главный конструктор¹

Аннотация: исследовано распределение вакансионных кластеров в CZ-монокристаллах Ge большого диаметра при различных условиях выращивания.

Ключевые слова: монокристалл германия, метод Чохральского, вакансионные кластеры, ямки травления.

Введение

Исследование является продолжением работы [1]. Кластеры обнаруживались по появлению плоскодонных ямок травления на поверхности (111) кристаллов Ge которые принимались как след вытравливания вакансионного кластера. [2] Для выявления кластеров в Ge использован метод селективного травления ферроцианидным травителем. Объемную концентрацию кластеров по известной поверхностной концентрации плоскодонных ямок травления, определяли пересчетом из толщины стравленного слоя, дефекты которого оставили ямки на наблюдаемой поверхности [3,4]. Травление проводилось в течение 5 мин в кипящем травителе со скоростью ~ 2 мкм/мин. Для наблюдения дефектов использовали микроскоп МИМ-7 и микроинтерферометр МИИ-4.

Основная часть

Исследовался малодислокационный CZ-Ge с $N_d \leq 10^2$ см⁻², легированный Sb (10^{12} - 10^{14} см⁻²), диаметром 200 мм, выращенный на установке «Редмет-30» с дополнительным фоновым нагревателем.[5] Как и в [1], на травленной поверхности образцов помимо дислокационных ямок, были обнаружены ямки типа I и типа II: ямки с поперечным размером, превышающим 4 мкм) и ямки с поперечным размером < 2 мкм. Наблюдаемые два типа ямок травления, как теперь можно оправданно предположить, соответствуют известным в кремнии А- и В-кластерам (по терминологии Кока). [3] Концентрация В-кластеров стабильно больше, чем концентрация А-кластеров.

Выводы

В отличие от результатов, полученных в работе [1], в настоящей серии экспериментов, установлено, что при выращивании кристалла с фоновым нагревателем, вдоль оси роста формируется периферийная область монокристалла в виде кольца размером 30-40 мм и длиной до $2/3$ цилиндрической части кристалла, полностью свободная от кластеров. Это подтверждает высказанные ранее соображения о влиянии коалесценции на формирование вакансионных кластеров[1] и открывает путь к получению кристаллов Ge, свободных от вакансионных кластеров.

Список использованных источников

1. Аношин К.Е., Наумов А.В. Смирнова Н.Н., Особенности распределения вакансионных кластеров в монокристаллах германия диаметром 200 мм // XII Конференция и XI Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нано метровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2018», 22-26 октября 2018 г.

2. Tweet A.G. «Structure sensitivity of Cu diffusion in Ge»// J. Appl. Phys., 1959, v.10, #12, p.2002-2010

3. De Kock A.J. R., Beeftink F.M., «Investigation of Lithium Precipitation in Germanium Crystals by X-Ray Transmission Topography» // «Appl. Phys. Lett.», 1972, v/20, #2, p. 81-83

4. Г.И. Воронкова, Е.А. Петрова «Особенности распределения вакансионных кластеров в германии» // Научн. Труды Гиредмета, т.77, 1976, с.5-13

5. Заявка на полезную модель «Устройство для выращивания бездислокационного монокристалла из расплава методом Чохральского» (№ 2019111047/05(021464) от 28.05.2019 г.), полученный 17.08.2019 г (в стадии рассмотрения).

DISTRIBUTION OF VACANCY CLUSTERS IN CZ-GE MONOCRYSTALS DIAM 200 MM GROWN WITH ADDITIONAL HEATER

Arkady Valerievich Naumov, Principal Engineer
Natalya Nikolaevna Smirnova, Ph.D., Principal Engineer,
v@aiz.com, 8(916) 321-33-73
Vadim Valerievich Startsev, Chief Designer

JSC Experimental Design Bureau" Astron", Lytkarino

Abstract: the distribution of vacancy clusters in large-diameter Ge CZ single crystals under various growing conditions has been investigated.

Key words: germanium single crystal, Cz-method, vacancy clusters, etching pits.

УДК 669.054; 669.782

<https://doi.org/10.29003/m1567.Silicon-2020/94-96>

ОЧИСТКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ОТ БОРА И ФОСФОРА ШЛАКОВЫМ РАФИНИРОВАНИЕМ

Павлов Артем Александрович, научный сотрудник¹,
art_roll@mail.ru, +7 (777) 773-02-34.

Серикканов Абай Серикканович, к.ф.-м.н, директор¹,
a.serikkanov@gmail.com, +7(777)342-84-48.

Турмагамбетов Тлеужан Сабиржанович, Ph.D., научный
сотрудник¹, tleuzhan@yandex.ru, тел.: +7 (777) 801-08-96.

¹*Satbaev University TOO «ФТИ», г. Алматы,*

Аннотация: Объектом исследования является металлургический кремний полученный методом карботермического восстановления, а также исследование возможности очистки данного материала металлургическим путем с помощью шлаков от бора и фосфора.

Ключевые слова: металлургический кремний, рафинирование, элементный анализ.

Основным материалом, используемым для создания «солнечных» элементов, является кремний. Ранее доминировали два химических процесса: трихлорсилановый (Сименс-процесс) и моносилановый (Юнион Карбайд, США), которые производили ~76% и ~21% полупроводникового кремния, но начиная с 2012 запланировано увеличение доли SoG-Si, производимого металлургическими методами [1].

На основании результатов литературных источников [2,3], а также ряда проведенных нами работ по данной тематике [4,5], дальнейшие работы по отработке и усовершенствованию технологий получения и очистки кремния до «солнечного» качества имеют перспективное значение для кремниевой промышленности Казахстана. Поэтому, в данное время актуальны исследования по прямой очистке металлургического кремния другими методами. Целью работы является апробирование методики шлаковой очистки (рафинирования) металлургического кремния от примесей бора и фосфора.

Эксперименты по очистке проводились с использованием индукционной печи и шлаковыми смесями на основе оксида кремния, оксида кальция, фторида кальция, оксида алюминия и др.

В результате проведенных работ был получен улучшенный металлургический кремний с низким содержанием примесей бора и фосфора.

Список использованных источников

1. SolarPower Europe. Global Market Outlook For Solar Power 2017-2021.

2. M. Johnston, M. Barati. Distribution of impurity elements in slag-silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications. Solar Energy Materials & Solar Cells, 94 (2010), с. 2085–2090.

3. Jafar Safarian et al. Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon. Energy Procedia, 20 (2012), с. 88 – 97.

4. B.N. Mukashev, Kh. A. Abdullin, M.F. Tamendarov, T.S. Turmagambetov, B.A. Beketov, M.R. Page and D.M. Kline. A metallurgical route to produce upgraded silicon and monosilane. Solar Energy Materials and Solar Cells, 93/10 (2009), с. 1785-1791.

5. Б.Н. Мукашев, А.А. Бетекбаев, Д.А. Калыгулов, А.А. Павлов, Д.М. Скаков. Исследования процессов получения кремния и разработка технологий изготовления «солнечных» элементов. ФТП, том 49, вып. 10 (2015), с. 1421-1428.

PURIFICATION METALLURGICAL GRADE SILICON FROM BORON AND PHOSPHORUS BY SLAG REFINING

Artem Pavlov, researcher¹, art_roll@mail.ru, +7 (777) 773-02-34.

Abay Serikkanov, Ph.D.¹, a.serikkanov@gmail.com, +7 (777) 342-84-48.

Turmagambetov Tleuzhan, Ph.D.¹, ttleuzhan@yandex.ru, +7 (777) 801-08-96.

¹*Satbaev University, Almaty.*

Abstract: The object of the research is metallurgical grade silicon obtained by the method of carbothermal reduction, as well as the study of the possibility of cleaning this material by a metallurgical method using slags from boron and phosphorus.

Key words: metallurgical grade silicon, refining, elemental analysis.

ЭЛЕКТРОННО-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЬ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

*Шаропов Уткиржон Баходирович, к. ф.-м. н., доцент,
Ташкентский государственный технический университет им.
Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, utkirstar@gmail.com,
+998901159779*

Аннотация: в работе исследованы процессы очистки - травления положительными ионами цезия поверхности кремния и последующего отжига методом спектроскопии полного тока (ПТ).

Ключевые слова: кремний, очистка, отжиг, облучение, травление, поверхность, ионы, спектры.

Введение

Проблемы уменьшения количества загрязнений и улучшения морфологии поверхности подложек необходимо решать и для производства интегральных схем.

Результаты

На рисунке 1 приведены спектр ПТ кремния в процессе травления положительными ионами цезия и последующего отжига. Параллельно показаны дифракционные эффекты, проявляемые в спектрах ПТ [1].

Кривая 1 соответствует спектру ПТ чистого кремния со структурой 7x7. Кривая 2 соответствует спектру ПТ поверхности кремния после облучения положительными ионами цезия с энергией 2,5 кэВ, дозой 10^{13} ион/см². Как видно из спектра первичный пик смещается в сторону низких энергий, который указывает на снижение работы выхода поверхности, также при этом снижается интенсивность дифракционной компоненты спектра (правая часть спектра 30-40эВ). С увеличением дозы на 10^{14} ион/см² (кривая 3),

появляются пики в низкоэнергетической стороне спектра при энергии 1,0 (H_{cs}) и 5,0 эВ. Также исчезают пики при энергии 7,0 и 10,0 эВ, показывающий межзонные состояния кремния. С увеличением дозы на 10^{15} ион/см² (кривая 4), увеличивается интенсивность пика (H_{cs}) 1,0 эВ, исчезают максимумы и минимумы характерные спектру ПТ кремния, который указывает на деградацию поверхности.

Пик при энергии 1,0 эВ может соответствовать внедренным междоузельным дефектам цезия на поверхности, так как энергетический уровень пика лежит внутри запрещённой зоны кремния.

Дальнейшее увеличение дозы приводит только к увеличению данного пика, остальная тонкая структура спектра не изменяется. Отжиг при температуре 100, 200°C (кривые 5 и 6) приводит к увеличению интенсивности пика при энергии 1,0 эВ, который подтверждает природу нарушения кристаллической структуры поверхности.

При таких температурах идёт диффузия образованных дефектов из объёма на поверхность. При температуре 200°C наблюдается самая минимальная работа выхода поверхности, что указывает на образование сплошной пленки цезия на поверхности кремния.

По спектру ПТ кривой 8 можно сделать вывод что, отжиг при температуре 400°C приводит к удалению атомов цезия с поверхности, который показано с уменьшением интенсивности внедрённых дефектов на поверхности (снижение интенсивности пика 1,0 эВ (H_{cs})). Но при этом наблюдается удвоение первичного пика, показывающий появление островков на поверхности кремния. Также широкий пик при энергии 5,0 эВ тоже уширяется и удваивается.

В спектре ПТ появляются максимумы А и В при энергии 6,0 и 7,0 эВ, соответственно, показывающий гибридизацию поверхностных атомов кремния с атомами цезия. Также восстанавливается дифракционная картина спектра ПТ, который показывает восстановление и переориентацию поверхностной структуры. При отжиге 650°C восстанавливается структура чистого кремния 7x7 (кривая 11).

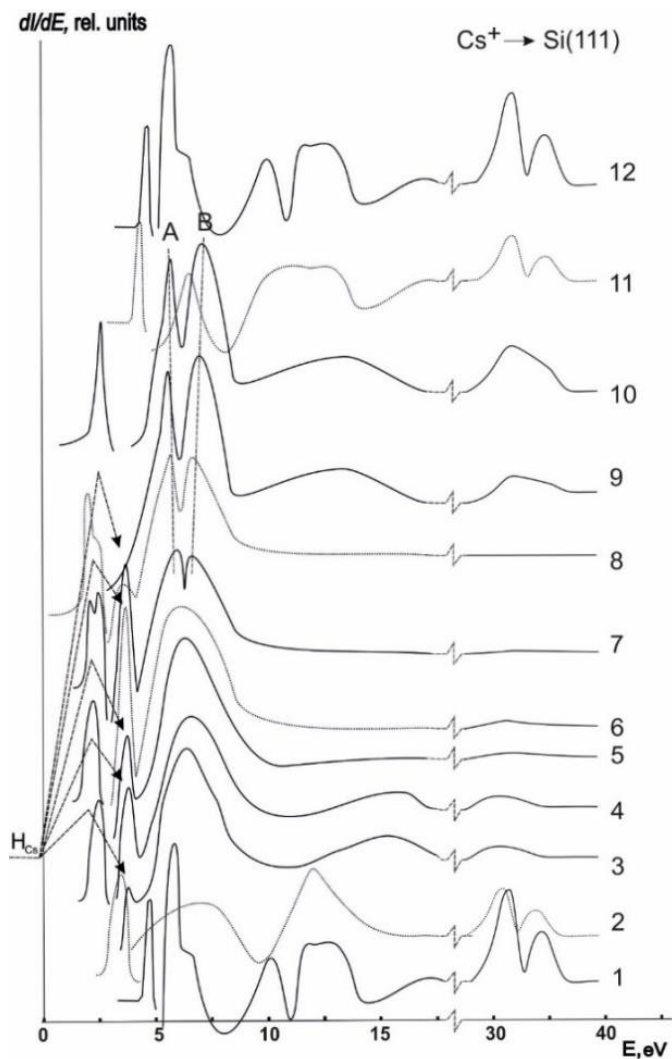


Рисунок 1 – Спектр ПТ кремния в процессе ионной бомбардировки (Cs) и после отжига: 1-чистый кремний со структурой 7x7, 2- облучения ионами цезия с энергией 2,5 кэВ, дозой 1013 ион/см², 3- облучения ионами цезия с дозой 1014 ион/см², 4- облучения ионами цезия с дозой 1015 ион/см², 5- отжиг при температуре 100°C, 6- 200°C, 7- 300°C, 8- 400°C, 9- 400°C, 10- 400°C, 11- 650°C, 12- 700°C

Выводы

Предложенный метод ионного травления и с последующим отжигом при температуре 650°C, позволяет получение атомарно чистой поверхности кремния со структурой 7x7.

Полученные данные, дают возможность эффективно проследить за структурой поверхности перед подготовкой образца, которые несомненно имеют важную роль в области микроэлектроники.

Список использованных источников

1. Комолов С.А. Интегральная вторично-электронная спектроскопия поверхности. ЛГУ, 1986. 180 с.

ELECTRON SPECTROSCOPIC CONTROL OF SURFACE CLEANING OF SILICON SUBSTRATES

Utkirjon Bakhodirovich Sharopov, Ph.D., associate professor, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan, utkirstar@gmail.com, +998901159779

Abstract: The work investigates the processes of purification - etching of the silicon surface with positive ions of cesium and subsequent annealing by total current spectroscopy.

Key words: silicon, cleaning, annealing, irradiation, etching, surface, ions, spectra.

Секция 2 «Атомные процессы на поверхности, границах раздела и в объеме кремния: дефекты, примесные атомы, гетерограницы».

УДК 538.975

<https://doi.org/10.29003/m1569.Silicon-2020/101-105>

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК SIPOS

*Терехов Владимир Андреевич, д.ф.-м.н., профессор¹,
terekhov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

Барков Константин Александрович, аспирант¹

Нестеров Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н., инженер¹

Попов Анатолий Игоревич, д.ф.-м.н., профессор²

Баринов Алексей Дмитриевич, к.ф.-м.н, доцент²

Середин Павел Владимирович, д.ф.-м.н., профессор¹

Голощапов Дмитрий Леонидович, к.ф.-м.н., ведущий инженер¹

Занин Игорь Евгеньевич, к.ф.-м.н., доцент¹

Ивков Сергей Александрович, аспирант¹

Домашевская Эвелина Павловна, д.ф.-м.н., профессор¹

Козаков Алексей Титович, д.ф.-м.н., профессор³

Никольский Анатолий Викторович, к.ф.-м.н., с.н.с.³

¹ ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж

² ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

³ ФГАОУ ВО «ЮФУ», г. Ростов-на-Дону

Аннотация: Использование пленок полуизолирующего кремния, легированного кислородом, типа SIPOS в качестве пассивирующих покрытий полупроводниковых приборов и ИС позволяет повысить пробивные напряжения высоковольтных приборов. Целью работы является установление влияния содержания кислорода на фазовый состав пленок SIPOS и их электрофизические свойства. Результаты комплексных

исследований показывают, что пленки SIPOS при различных значениях γ , имеют сложный фазовый состав нанокompозитов на основе аморфного кремния, содержащих нанокристаллы кремния и субоксиды кремния с малой степенью окисления типа $\text{SiO}_{0.47}$, при этом диоксид SiO_2 не формируется даже при больших значениях γ .

Ключевые слова: SIPOS, пленки полуизолирующего кремния легированного кислородом, ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия

ВВЕДЕНИЕ

Пленки полуизолирующего кремния типа SIPOS (Semi-Insulating Polycrystalline Oxygen-doped Silicon) используются в качестве пассивирующих покрытий в высоковольтных полупроводниковых приборах и ИС, поскольку данные пленки, в отличие от классических диэлектриков SiO_2 и Si_3N_4 , не накапливают горячие носители заряда, которые образуются в процессе лавинного пробоя [1]. Однако современная информация о влиянии содержания оксидных фаз в пленках SIPOS на их электрические свойства противоречива, что затрудняет поиск оптимального режима формирования данных пленок.

Эксперимент

Исследуемые пленки SIPOS ($d \sim 300$ нм) были получены методом химического осаждения из газовой фазы моносилана SiH_4 с добавлением закиси азота N_2O в качестве источника кислорода при различных соотношениях $\gamma = \text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4 = 0 \div 0.15$ при пониженном давлении (20 Па) и температуре 620 °C [2]. Фазовый состав плёнок SIPOS определялся стандартным методом рентгеновской дифракции, методом Raman спектроскопии, а также методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (УМРЭС), которая позволяет устанавливать наличие и соотношение аморфных фаз а-Si и а-SiO_x, а также кристаллического с-Si. Для исследования электрических свойств пленок SIPOS на их поверхность были

нанесены алюминиевые контакты различной площади. Измерения ВАХ пленок SIPOS проводились на постоянном токе в диапазоне напряжений от -5 В до +5 В на с помощью усилителя тока KEITHLEY-427, коэффициент усиления которого можно изменять в диапазоне 10^4 - 10^{11} .

Результаты и выводы

Результаты комплексных исследований показывают, что пленки SIPOS при различных значениях γ , имеют сложный фазовый состав нанокompозитов на основе аморфного кремния, содержащих нанокристаллы кремния и субоксиды кремния с малой степенью окисления типа $\text{SiO}_{0.47}$, при этом диоксид SiO_2 не формируется даже при больших значениях γ , что подтверждается данными XPS. Увеличение содержания кислорода в слоях SIPOS приводит к уменьшению размеров нанокристаллов от 75 нм (при $\gamma=0$) до 2-5 нм (при $\gamma=0.15$), погруженных в аморфную среду.

ВАХ всех пленок SIPOS с нанесенными на них Al контактами являются линейными. Рассчитанное по ВАХ удельное сопротивление пленок SIPOS увеличивается от ~ 5.5 ГОм*см до ~ 190 ГОм*см с ростом параметра γ от 0 до 0,15. Кроме того, с увеличением γ от 0 до 0,15 увеличивается энергия активации проводимости пленок SIPOS от 0,56 эВ до 0,63 эВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Воронежской области в рамках научного проекта № 19-42-363013 и гранта FZGU-2020-0036 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания.

Список использованных источников

1. T. Matsushita et. al Highly Reliable High-Voltage Transistors by Use of the SIPOS Process// IEEE Transactions on electron devices, 1976, V. ED-23, P. 826.
2. Э.П. Домашевская и др. Атомное и электронное строение аморфных и нанокристаллических слоев полужоизолирующего

кремния, полученных методом химического осаждения при низком давлении// Поверхность, 201, № 12, С. 24.

OXYGEN INFLUENCE ON THE PHASE COMPOSITION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF SIPOS FILMS

Vladimir Andreevich Terekhov, Ph.D., professor¹,
terekhov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63

Konstantin Aleksandrovich Barkov, Ph.D. student¹

Dmitry Nikolayevich Nesterov, Ph.D., engineer¹

Anatoliy Igorevich Popov, Ph.D., professor²

Aleksey Dmitrievich Barinov, Ph.D., assistant professor²

Pavel Vladimirovich Seredin, Ph.D., professor¹

Dmitry Leonidovich Goloshchapov, Ph.D., lead engineer¹

Igor Evgenievich Zanin, Ph.D., assistant professor¹

Sergey Aleksandrovich Ivkov, Ph.D. student¹

Evelina Pavlovna Domashevskaya, Ph.D., professor¹

Alexey Titovich Kozakov, Ph.D., professor³

Anatolii Victorovich Nicolskii, Ph.D., senior researcher³

¹ *Voronezh State University, Voronezh*

² *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow*

³ *Southern Federal University, Rostov-on-Don*

Abstract: The use of oxygen-doped semi-insulating silicon films of the SIPOS type as passivation coatings for semiconductor devices and IC makes it possible to increase the breakdown voltage of high-voltage devices. The aim of this work is to establish the influence of the oxygen content on the phase composition of SIPOS films and their electrophysical properties. The results of comprehensive studies show that SIPOS films at different values of γ have a complex phase composition of nanocomposites based on amorphous silicon containing silicon nanocrystals and silicon suboxides with a low oxidation state, such as $\text{SiO}_{0.47}$, while SiO_2 dioxide is not formed even at large values of γ .

Key words: SIPOS, Semi-Insulating Polycrystalline Oxygen-doped Silicon, Ultrasoft X-ray Emission Spectroscopy, USXES.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and Government of Voronezh region according to the research project №19-42-363013.

The part of work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia Federation under the grand No. FZGU-2020-0036.

УДК 538.935

<https://doi.org/10.29003/m1570.Silicon-2020/105-108>

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛЕНОК $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$

Степина Наталья Петровна, д.ф.-м.н., с.н.с.¹,
stepina@isp.nsc.ru, +7 (913) 752-52-01

Шумилин Андрей Вадимович, к.ф.-м.н., с.н.с.²,
avshumilin@mail.ioffe.ru, +7(921) 417-77-56

Бельтюков Ярослав Михайлович, и.о. зав. сектора²,
yaroslav.beltukov@mail.ioffe.ru, +7(911) 290-45-32

Двуреченский Анатолий Васильевич, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.,
профессор, зав. лабораторией¹, *dvurech@isp.nsc.ru, +7 (913) 916-40-12*

Файнер Надежда Ильинична, к.х.н., с.н.с.³,
nadezhda@niic.nsc.ru, +7 (913) 754-93-49

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

³ИНХ СО РАН, г. Новосибирск,

Аннотация: Исследовано туннельное магнетосопротивление гранулированных пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных осаждением из газовой фазы. Предложена модель, в которой за счет анизотропии и обменного взаимодействия магнетосопротивление эффективно развязано с намагниченностью.

Ключевые слова: карбонитрид кремния, гранулированные системы, туннельное магнетосопротивление.

Экспериментальные результаты

Исследовано магнетосопротивление и намагниченность гранулированных пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:Fe}$, полученных осаждением из газовой фазы. В зависимости от условий осаждения формируются гранулы разной структуры, размеров и плотности. Увеличение концентрации железа приводит к увеличению проводимости системы, а изменение структуры гранул изменяет магнитные свойства. Показано, что магнетосопротивление отрицательно в перпендикулярном поле, причем узкий пик $R(H)$ наблюдается в тех полях, в которых наблюдается и выход намагниченности на насыщение (Рисунок 1). В больших полях зависимость $R(H)$ становится не такой резкой, но не насыщается вплоть до $H=4\text{T}$.

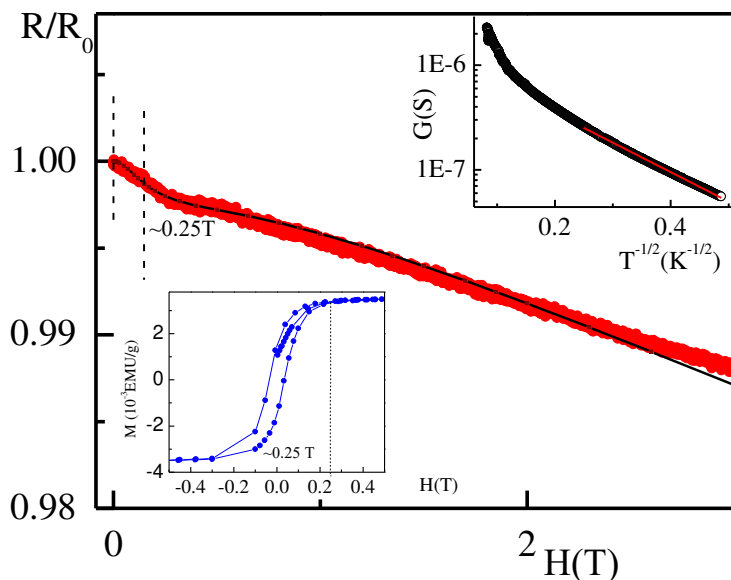


Рисунок 1 – Магнетосопротивление в перпендикулярном поле.

Линия – аппроксимация в рамках предложенной модели.

Верхняя врезка - температурная зависимость проводимости,
нижняя врезка- намагниченность

Модель

Для объяснения полученных данных предложена модель, в рамках которой обе части отрицательного магнетосопротивления (и пик в низких полях и отсутствие насыщения в поле 4Т) определяются механизмом гигантского магнетосопротивления, т.е. связаны с выстраиванием магнитных моментов железных гранул в магнитном поле. При этом важно, что намагниченность связана с усредненным распределением магнитных моментов гранул, а магнетосопротивление – с распределением углов между намагниченностями соседних гранул.

Показано, что при учете обменного взаимодействия между гранулами и случайной анизотропии формы (т.н. модель ферромагнитного стекла [1]) может наблюдаться ситуация, в которой характерные магнитные поля, в которых изменяется проводимость и намагниченность, различаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Новосибирской области (грант №19-42-540001) и госзадания №0306-2019-0019.

Список использованных источников

1. D.S. Ilyushenkov et al. // J. of Mag. and Mag. Materials, 2011, v. 323, p. 1588.

NEGATIVE MAGNETORESISTANCE $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:FE}$ FILMS

Natalia Petrovna Stepina, senior scientist ¹, stepina@isp.nsc.ru, +79137525201

Andrei Vadimovich Shumilin, senior scientist ², avshumilin@mail.ioffe.ru

Yaroslav Mikhailovich Beltukov, senior scientist ², yaroslav.beltukov@mail.ioffe.ru

Anatolii Vasil'evich Dvurechenskii, prof. ¹, dvurech@isp.nsc.ru

Nadezhda Ilinichna Fainer, senior scientist ³, nadezhda@niic.nsc.ru

¹ ISP SB RAS, Novosibirsk

² FTI, Sankt-Peterburg

³ IIC SB RAS, Novosibirsk

Abstract: The tunneling magnetoresistance of granular SiC_xN_y: Fe films obtained by deposition from the gas phase is investigated. A model is proposed in which, due to anisotropy and exchange interaction, the magnetoresistance is effectively decoupled from the magnetization.

Key words: silicon carbonitride, granular systems, tunnel magnetoresistance.

Acknowledgments: The work was supported by RFBR (grant №19-42-540001) and state program №0306-2019-0019.

УДК 538.975

<https://doi.org/10.29003/m1571.Silicon-2020/108-111>

СРАВНЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ С РАЗНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Зайцева Эльза Гайнуллаевна, инженер ¹, zayceva@isp.nsc.ru,
+7 (383) 330-67-68*

*Наумова Ольга Викторовна, д.ф.-м.н., в.н.с. ¹,
naumova@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68*

¹ ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Работа направлена на определение условий, при которых в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами достигается одинаковое распределение носителей по пленке, необходимое для корректного сравнения подвижности. Установлено, что распределение носителей в пленках контролируются рядом параметров, определяемых из экспериментальных зависимостей.

Ключевые слова: подвижность, тонкие пленки, кремний-на-изоляторе.

Введение

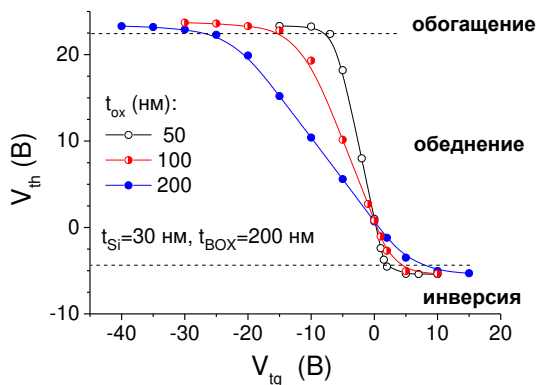
Подвижность носителей заряда μ_{eff} является одним из ключевых параметров полупроводниковых структур, который широко используется для анализа свойств гетеросистем пленка/диэлектрик. Значение подвижности и доминирующий механизм рассеяния носителей определяется их распределением относительно границ раздела пленка/диэлектрик (ГР). В тонкопленочных структурах распределение носителей $N(t_{\text{Si}})$ контролируется потенциалами на двух ГР [1]. При неконтролируемом изменении потенциала хотя бы на одной из ГР и перераспределении носителей по пленке значение подвижности может изменяться без изменения качества пленки [2]. Поэтому сравнение подвижности в тонкопленочных структурах правомерно только при одинаковом распределении носителей в пленках.

Целью работы являлось определение условий, при которых в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами (толщиной пленки и/или окружающих ее диэлектриков) достигается одинаковое распределение носителей. Для этого в среде TCAD моделировались КНИ МОП-транзисторы с разной толщиной подзатворного окисла t_{ox} , пленки кремния t_{Si} , скрытого окисла t_{BOX} (вставка рис.1б). Анализировались изменения порогового напряжения V_{th} и $N(t_{\text{Si}})$ зависимостей от напряжения на TG-затворе при индуцировании канала проводимости со стороны BG-затвора (вставка, рис.1б).

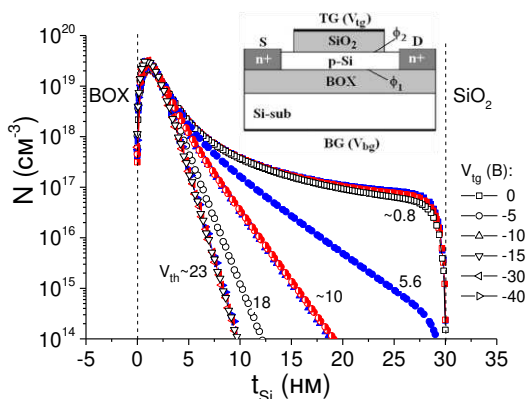
Результаты

На рисунке 1 представлены зависимости $V_{\text{th}}(V_{\text{tg}})$ и $N(t_{\text{Si}})$ для КНИ МОП-транзисторов с разной толщиной t_{ox} . Аналогичные зависимости были получены для транзисторов с разной толщиной t_{Si} и t_{BOX} . Анализ зависимостей показал, что одинаковое распределение носителей по пленке может быть получено в транзисторах с разной толщиной:

- t_{ox} или t_{BOX} – в режимах обогащения или обеднения пленки со стороны TG и фиксированном значении V_{th} или V_{tg} , соответственно;
 - t_{Si} – в режиме обеднения и фиксированном напряжении V_{tg} .
- Необходимым условием сравнения так же является одинаковая плотность индуцированных носителей в пленках.



а)



б)

Рисунок 1 – Зависимости (а) $V_{th}(V_{tg})$ и (б) $N(t_{Si})$ в КНИ МОПТ с $t_{ox} = 50 - 200$ нм. На вставке – схематичное изображение КНИ МОПТ

Выводы

Условия одинакового распределения носителей в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами могут быть определены экспериментально из зависимостей порогового напряжения от напряжения на затворах тонкопленочных транзисторов.

Список использованных источников

1. S. Cristoloveanu, M. Bawedin, I. Ionica. A review of electrical characterization techniques for ultrathin FDSOI materials and devices // Solid-State Electronics, 2016, vol.117, pp.10-36.
2. G. Hamaide, F. Allibert, F. Andrieu, K. Romanjek, S. Cristoloveanu. Mobility in ultrathin SOI MOSFET and pseudo-MOSFET: impact of the potential at both interfaces// Solid-State Electronics, 2011, vol.57, pp.83-86.

COMPARISON OF MOBILITY IN THIN-FILM STRUCTURES WITH DIFFERENT DESIGN PARAMETERS

Elsa Gainullaevna Zaitseva, engineer, zaytsevaelza@yandex.ru, +7 (383) 330-67-68

Olga Victorovna Naumova, Ph.D., head of laboratory, naumova@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68

ISP SB RAS, Novosibirsk

Abstract: this study aims to found the conditions under which the same carrier distribution is achieved in thin-film structures with different design parameters, which is necessary for a correct comparison of the mobility in films. It was shown that the carrier distribution is controlled by a number of parameters which can be determined from the experimental dependences of the thin-film transistors.

Key words: mobility, thin films, silicon-on-insulator.

ТРАНСПОРТ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЛЕНОК SiO_2 С НАНОЧАСТИЦАМИ InSb

Pawel Zukowski, professor¹

Tomasz Koltunowicz, professor¹

Karolina Czarnacka, Ph. D. student²

Федотов Александр Кириллович, д.ф.-м.н., профессор³

*Тыщенко Ида Евгеньевна, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с.⁴,
tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93*

¹Lublin University of Technology, Lublin, Poland

²University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

³БГУ, г. Минск, Беларусь

⁴ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Изучены проводимость на переменном токе, емкость, угол фазового сдвига и тангенс диэлектрических потерь в МОП-КНИ структурах с наночастицами InSb , ионно-синтезированными в захороненном слое SiO_2 . Установлено изменение характера проводимости в пленках при $T=200$ К. Обнаружен экспоненциальный спад действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости пленок.

Ключевые слова: InSb , нанокристаллы, кремний-на-изоляторе, диэлектрическая проницаемость, поляризация.

Введение

Оксид кремния многие десятилетия сохраняет лидерство в качестве диэлектрика, используемого при создании КМОП-интегральных схем. Внедрение в SiO_2 металлических и полупроводниковых наночастиц позволяет модифицировать его свойства и существенно расширить области его применения в электронике [1]. В данной работе мы впервые исследовали диэлектрическую проницаемость пленок SiO_2 с ионно-синтезированными наночастицами InSb как функцию температуры и частоты.

Результаты

Наночастицы InSb формировались в захороненных слоях SiO₂ имплантацией в термически выращенный на кремнии SiO₂ толщиной 300 нм ионов In⁺ и Sb⁺ с энергией 200 кэВ дозами $8.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, последующим водородным переносом слоя Si и высокотемпературным отжигом при температуре 1000 °С в течение 30 минут. В образцах были измерены проводимость на переменном токе (σ), емкость (C_p), угол фазового сдвига, диэлектрические потери, а также рассчитаны действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты f зондирующего сигнала (50 - 5×10^6 Гц) и температуры $T = 30 - 375 \text{ К}$.

Проводимость пленок SiO₂ с наночастицами InSb имеет два участка температурной зависимости, соответствующих двум механизмам транспорта носителей зарядов. При $T < 200 \text{ К}$ транспорт носителей заряда обеспечивается прыжковой проводимостью электронов между наночастицами InSb. При $T > 200 \text{ К}$ доминирующим становится зонный механизм с энергией активации 0.07 эВ. Во всем измеренном диапазоне частот фазовый сдвиг является отрицательной величиной, не зависимо от T . Это подтверждает емкостной характер структур. Из зависимостей $C_p(f)$, $C_p(T)$, $\sigma(f)$ и $\sigma(T)$ рассчитаны ϵ' и ϵ'' . Обнаружен их экспоненциальный спад от f при всех T . Полученная зависимость объясняется формированием дипольных моментов на границе раздела InSb/SiO₂ при захвате носителей заряда наночастицами InSb.

Список использованных источников

1. Ford A.C., Yeung C.W., Chuang S., Kim H.S., Plis E., Krishna S., Hu C., Javey A., Ultrathin body InAs tunneling field-effect transistors on Si substrates // Applied Physics Letters, 2011, Vol. 98. P. 113105.

CHARGE CARRIERS TRANSPORT AND PERMITTIVITY OF SiO_2 FILMS WITH INSB NANOPARTICLES

Pawel Zukowski, Professor¹

Tomasz Koltunowicz, Professor¹

Karolina Czarnacka, Ph. D. student²

Alexander Fedotov, DSc, Professor³

*Ida Tyschenko, DSc, Associate Professor, Principal Scientist⁴,
tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93*

¹Lublin University of Technology, Lublin, Poland

²University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

³BSU, Minsk, Belarus

⁴IPP SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract: A.c. current conductivity, capacitance, phase angle and dielectric loss tangent were studied for MOS SOI structures with ion-synthesized in the buried SiO_2 layer InSb nanoparticles. Films conductivity nature change was detected at the temperature $T=200\text{K}$. An exponential decay of the real and imaginary parts of the films complex dielectric constant was found.

Key words: InSb, nano-crystals, silicon-on-insulator, dielectric constant, polarization.

УДК 538.911

<https://doi.org/10.29003/m1573.Silicon-2020/114-117>

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ

Тысченко Ида Евгеньевна, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с., ИФП СО РАН, Новосибирск, tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93

Аннотация: Термическая стабильность пленок кремния-на-изоляторе толщиной 2.2 и 4.7 нм изучалась в интервале температур отжига 800-1100 °С. Обнаружено уменьшение толщины пленок и изменение их стехиометрического состава в

пользу увеличения доли аморфной фазы с ростом температуры отжига. Обсуждаются механизмы зависимости структурной стабильности от толщины пленки.

Ключевые слова: Si, нанослои, кремний-на-изоляторе, термическая стабильность.

Введение

Современные тенденции развития электроники связаны с уменьшением размеров активных элементов интегральных схем до нескольких нанометров. С точки зрения термодинамики создание монокристаллических пленок нанометровой толщины на неупорядоченных подложках в литературе считалось невозможным в силу увеличения вклада поверхностной энергии в полную энергию пленки и изменением усредненного значения координационного числа атомов в пленке [1]. Это может привести к уменьшению температуры плавления пленки по сравнению с температурой плавления объемного кристалла.

Целью данной работы было установление физических условий термической стабильности пленок нанометровой толщины в системе кремний-на-изоляторе.

Результаты

Структуры кремний-на-изоляторе (КНИ) диаметром 100 мм с толщиной отсеченного слоя кремния 540 нм и толщиной захороненного слоя SiO_2 около 300 нм были созданы методом водородного переноса. В процессе многоступенчатого окисления в сухом и влажном кислороде слой кремния доводился до толщины 4.7 или 2.2 нм. После окисления окисел удалялся в растворе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:100), а пластины были разрезаны на образцы размером $\sim 1 \times 1 \text{ см}^2$, которые затем отжигались в печи при температуре 800-1100 °C в течение 30 минут в потоке паров N_2 . Исследования структуры пленок после отжига проводились методами сканирующей электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии.

Установлено, что структурная однородность пленок при отжиге зависит от исходной толщины пленки. Пленки Si толщиной 4.7 нм стабильны до 1000 °С, а в пленках толщиной 2.2 нм структурная неоднородность возникает уже после 800 °С. При этом эффективная толщина пленки уменьшается, а ее стехиометрический состав изменяется в пользу роста доли аморфной фазы. Анализ температурной зависимости изменения толщины пленок и роста аморфной фазы в них показал, что они происходят с одной и той же энергией активации. Для пленок толщиной 4.7 нм она составила 0.6 ± 0.2 эВ, а для пленок толщиной 2.2 нм она равна 1.6 ± 0.4 эВ. В первом случае величина энергии активации может быть обусловлена накоплением междоузельных атомов кремния в пленке, за счет проникновения в нее атомов кислорода как извне, так и из захороненного слоя SiO₂. В случае пленок меньшей толщины, доминирующим процессом изменения состава является разрыв Si-Si связей.

Список использованных источников

1. Тыщенко И.Е., Попов В.П. Кремний-на-изоляторе // Юбилейный сборник Института физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН (1964-2014). 2014. С. 541-564.

NANOMETER THICKNESS SILICON-ON-INSULATOR FILMS THERMAL STABILITY

*Ida Tyschenko, DSc, Associate Professor, Principal Scientist,
tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93
IPP SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Abstract: Thermal stability of 2.2 and 4.7 nm thick silicon-on-insulator films was studied within anneal temperature range of 800-1100°C. It was found that at the higher temperatures film thickness decreases and stoichiometric composition changes with increasing the proportion of the amorphous phase. Mechanisms of structural stability dependence upon film thickness is discussed.

Key words: Si, nanolayers, silicon-on-insulator, thermal stability.

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.29003/m1574.Silicon-2020/117-119>

СТРУКТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИК-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК ДЛЯ СВЧ, ФОТОННЫХ, НЕЙРОСЕТЕВЫХ И НАНО РАЗМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Попов Владимир Павлович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией¹, popov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93

Тыщенко Ида Евгеньевна, д.ф.-м.н., в.н.с.¹, доцент, tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-25-37

¹ ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: ПДП-структуры на основе нанослоев кремния, пара- и сегнетоэлектриков являются основой нано размерной интегральной квантовой, радио-, опто- и нейроморфной электроники, совместимой с промышленной КМОП технологией на кремнии в многофункциональных чипах.

Ключевые слова: кремний, диэлектрик, ПДП-структуры, ИС.

Основная часть

Физические пределы масштабирования полевых приборов, предложенных более чем 90 лет тому назад [1], и требования высоконадежной ЭКБ ведут к расширению функциональности и типов интегральных приборов на основе гетероструктур полупроводник-диэлектрик-полупроводник - ПДП. Повышение плотности элементов и увеличение быстродействия увеличивают тепловые потери при ограниченной тепло- и электропроводности аморфных слоев меди, требуя интеграции с монокристаллическими слоями металлов или алмаза. Получение тонких (~10 нм) эпитаксиальных слоёв, подобных по структурным и транспортным свойствам

монокристаллическому полупроводнику или диэлектрику остается, несмотря на более чем шестидесятилетнюю историю гетероструктур с металлом (М) или без него (МДМ, МДП, ПДП), технологически сложной задачей из-за разниц в структурах решеток и коэффициентов термического расширения (КТР).

Развитие метода прямого сращивания (direct bonding-DB) для формирования многослойных гетероструктур кремний-на-изоляторе (КНИ), -сапфире (КНС) позволяет получать МДП, ПДМ и ПДП нанослойные структуры, пригодные для создания нейросетевых, фотонных, СВЧ и спинтронных ИС, в том числе с квантовой обработкой информации (КОИ), на базе квантовых ям и точек АЗВ5 и А2В6, low- и high-k диэлектриков, сегнетоэлектриков и ферромагнетиков, фотонных кристаллов и волноводов на кремниевых слоях и подложках.

В ИФП СО РАН накоплен опыт формирования гетероструктур методом прямого сращивания, ионного синтеза и водородного переноса, а также создания новых ПДП гетероструктур с заданными функциональными свойствами для радиационно-стойких логических ИС экстремальной и высоконадежной электроники, для полевых сенсоров физических, химических и биологических объектов, КОИ ИС, нейросетевых ИС, матриц фотоприемников, излучателей и мультиплексоров [2, 3]. Отдельно представлены перспективы применения КНИ ИС с low-, или high-k слоями в качестве мобильных СВЧ ИС приемопередатчиков, ИС памяти или нейросетевых ИС на сегнетотранзисторах с эффективными алгоритмами обучения [4], соответственно.

Свойства структур, исследуемых по проектам РФФИ 18-42-540008, 19-29-03031, обеспечивают быстрое действие многофункциональность, и энергоэффективность ИС, не уступающие мозгу человека.

Список использованных источников

1. J.E. Lilienfeld. Method and apparatus for controlling electric currents, 1930.

2. I.E. Tyschenko, V.P. Popov. Silicon-on-insulator structures produced by ion-beam synthesis and hydrogen transfer. // In: Advances in semiconductor nanostructures. Elsevier, 2017, p. 409-436.

3. V. Popov et al., Hafnia and alumina stacks as UTBOXs in silicon-on-insulator structures. // Solid-State Electronics, 2020, 168, 107734.

4. M.S. Tarkov, A.N. Leushin, F.V. Tikhonenko, I.E. Tyschenko, V.P. Popov. Logic Elements and Crossbar Architecture Based on SOI Two-Gate Ferroelectric Transistors. // IEEE Express, EUROSOLIS, 2020, PDFeXpID6410227.

SEMICONDUCTOR-DIELECTRIC-SEMICONDUCTOR STRUCTURES FOR RF, PHOTONIC, NEURONET AND NANOSCALE INTEGRATED CIRCUITS

*Vladimir Popov, DSc., Lab Head¹, popov@isp.nsc.ru,
Ida Tyschenko, DSc, Associate Professor, Principal Scientist,
tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-93*

IPP SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract: SDS-structures based on silicon nanolayers, paraelectric and ferroelectrics are the basis for nanoscale quantum, radio, optic and neuromorphic integrated electronics compatible with industrial CMOS silicon process for multifunctional chips.

Key words: silicon, dielectric, SDS-structures, IC.

Acknowledgments: the properties of structures studied under RFPR projects 18-42-540008 and, 19-29-03031 provide energy efficiency, high-speed and multifunctional performance of ICs that are not inferior to the human brain.

СЛОИСТЫЙ In_2Se_3 НА ПОВЕРХНОСТИ $\text{Si}(111)$ С ГИСТЕРЕЗИСАМИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Пономарев Сергей Артемьевич, студент^{1,2},
s.ponomarev1@g.nsu.ru, +7 (923) 134-91-86

*Рогило Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., н.с.², rogilo@isp.nsc.ru,
+7 (383) 330-91-49*

¹Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск

²ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: В данной работе с помощью картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) изучались способы контролируемого роста двумерного In_2Se_3 на подложке $\text{Si}(111)$. Согласно экспериментальным данным уменьшение скорости осаждения увеличивает размеры двумерных островков In_2Se_3 . По двухконтактной методике была измерена температурная зависимость сопротивления пленки. При понижении температуры вблизи $T=140$ К обнаружено скачкообразное уменьшение сопротивления в ~ 1000 раз. Обратный переход происходит вблизи $T=180$ К. В интервале температур 20–40 К обнаружен второй гистерезис, происходящий без скачка сопротивления пленки.

Ключевые слова: ДБЭО, пленки халькогенидов металлов, ван-дер-Ваальсовая эпитаксия, поверхность кремния (111).

Введение

Изучение новых слоистых двумерных материалов, в частности In_2Se_3 , является динамично развивающейся областью физики конденсированного состояния. Они являются многообещающим семейством материалов для фотовольтаики, электроники и фотоники из-за перспективности использования их свойств для создания

электронных и оптоэлектронных устройств следующего поколения [2]. Однако, актуальной проблемой интеграции гетероструктур с кремниевой электроникой является поиск способов выращивания пленок In_2Se_3 с требуемой кристаллической структурой (фазой) и свойствами на кремниевой подложке.

Методика и результаты экспериментов

В данной работе с использованием *in situ* отражательной электронной микроскопии (ОЭМ) выращены пленки In_2Se_3 на подложке Si(111) при температуре $T \approx 673$ К, скоростях осаждения In : $0,9\text{--}1,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и соотношением потоков $\text{In}:\text{Se}$ в диапазоне 1:3–1:6 [1]. Наблюдавшиеся в процессе роста ДБЭО соответствовали росту слоистого In_2Se_3 . Согласно картинам ДБЭО, после выращивания около 5 нм In_2Se_3 происходило зарождение трехмерных (3D) островков. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) показано, что высота атомных ступеней на поверхности пленок составляет около 1 нм, что соответствует высоте молекулярного слоя In_2Se_3 . Согласно АСМ изображениям 3D островки формировались за счет более быстрого роста кристалла вблизи выходов на поверхность дислокаций с винтовой компонентой. Показано, что уменьшение скорости роста сопровождается уменьшением концентрации 3D островков и увеличением их линейных размеров.

Построена температурная зависимость электрического сопротивления пленки. При понижении температуры вблизи $T=140$ К обнаружено скачкообразное уменьшение сопротивления в ~ 1000 раз. Обратный переход происходит вблизи $T=180$ К. В интервале температур 20–40 К обнаружен второй гистерезис, происходящий без скачка сопротивления пленки.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 18-72-10063) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Poh S.M. [и др.]. Molecular-Beam Epitaxy of Two-Dimensional In₂Se₃ and Its Giant Electroresistance Switching in Ferroresistive Memory Junction // Nano Letters. 2018. (18). С. 6340–6346.

2. Xu M., [и др.]. Graphene-Like Two-Dimensional Materials // Chem. Rev. 2013. (113). С. 3766-3798.

LAYERED In₂Se₃ ON SI (111) SURFACE WITH HYSTERESIS OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF RESISTANCE

Sergei Artemyevich Ponomarev^{1,2}, B.Sc., s.ponomarev1@g.nsu.ru, +7 (923) 134-91-86

Dmitry Igorevich Rogilo², Ph.D., researcher, rogilo@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-91-49

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS, Novosibirsk

Abstract: In this work, the methods of controlled growth of two-dimensional In₂Se₃ on a Si (111) substrate were studied by reflection high-energy electron diffraction (RHEED). According to experimental data, the deposition rate reduction increases the size of two-dimensional In₂Se₃ islands. The temperature dependence of the film resistance was measured by the two-contact technique. At temperature decrease near T = 140 K, an abrupt decrease in resistance by a factor of ~ 1000 was found. The reverse transition occurs near T = 180 K. At T = 20–40 K the second hysteresis occurring without the film resistance jump was found.

Key words: RHEED, metal chalcogenide films, van der Waals epitaxy, Si(111) surface.

This research was performed on the equipment of CKP "Nanostruktury" and was financially supported by the Russian Science Foundation [grant number 18-72-10063].

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БУФЕРНОГО СЛОЯ SiC/POR-Si НА СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР GAN/SiC/Si(111)

Золотухин Дмитрий Сергеевич, асп.¹, zolutukhin@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Голощанов Дмитрий Леонидович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹, goloshcharov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Середин Павел Владимирович, д.ф.-м.н. проф. zolutukhin@phys.vsu.ru, paul@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Мизеров Андрей Михайлович, к.ф.-м.н., в.н.с.², andreymizerov@rambler.ru, +7 (472) 220-83-63

Леньшин Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., в.н.с. zolutukhin@phys.vsu.ru, lenshinas@mail.ru, +7 (472) 220-83-63

¹ ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж

² СПбАН РАН им. Ж.И. Алфёрова, г. Санкт-Петербург

Аннотация: В настоящей работе мы демонстрируем новый подход к формированию GaN слоев на Si(111) подложках с использованием переходного нанопористого подслоя Si(111) (por-Si), который впоследствии был модифицирован с помощью техники замещения адатомов с целью формирования буферного слоя 3N-SiC.

Ключевые слова: пористый кремний, молекулярно-пучковая эпитаксия, гетероструктуры, нитрид галлия.

Технология и методы исследования

Интеграция III-N технологии с кремниевой является актуальной задачей современной науки, так как позволит создавать принципиально устройства, используя преимущества обеих на одном чипе. Однако, формирование гетероструктур III-N/Si все еще значительно затруднено в силу различий в свойствах материалов: разница в коэффициентах температурного расширения (КТР) и параметрах решетки

приводит к генерации высокой плотности прорастающих дислокаций и прочих дефектов и ухудшает приборные характеристики конечных устройств. В силу меньшего рассогласования параметра решетки и КТР между GaN и 3H-SiC [1], а также нанопористой структуре последнего, использование 3H-SiC в качестве переходного слоя позволяет получить значительные улучшения в кристаллическом совершенстве GaN/SiC/Si(111) структуры, ее оптических и транспортных свойствах. Эпитаксиальные слои GaN на подложках двух типов выращивались в едином ростовом процессе методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (ПА МПЭ) на установке Veeco Gen 200. Por-Si слой толщиной порядка 30 нм, с диаметром пор 1-5 нм был предварительно сформирован на одной из подложек. На ФЛ спектрах отчетливо видны пики локализованные около 3.4 эВ и широкая эмиссия в желто-зеленом регионе видимого спектра, более интенсивная для GaN/SiC/por-Si/Si(111) образца. Локализация пика эмиссии около 3.4 эВ свидетельствует о гексагональной симметрии слоя. Концентрации носителей составили $9.2 \cdot 10^{17}$ и $1.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при их подвижности в $990 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $52 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для GaN/SiC/por-Si(111) и GaN/SiC/c-Si(111) образцов. Анализ УФ спектра показал, что в диапазоне длин волн 500 – 900 нм величина коэффициента преломления GaN порядка 7% выше для образца, выращенного с использованием переходного por-Si слоя. РДА анализ показал снижения уровней внутренних напряжений и вертикальных дислокаций в образце GaN/SiC/por-Si(111).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-72-10007. Доступ к оборудованию Karlsruhe Nano Micro Facility был получен при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации MD-42.2019.2

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov et al. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films// J. Phys. D., 2014, 47, 313001.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SiC / POR-Si BUFFER LAYER ON THE STRUCTURAL, OPTICAL, AND TRANSPORT PROPERTIES OF GaN / SiC / Si (111) HETEROSTRUCTURES

Dmitry Sergeevich Zolotukhin, Ph.D.¹, zolotukhin@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Dmitry Leonidovich Goloshchapov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist¹ goloshchapov@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Pavel Vladimirovich Seredin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences prof. zolotukhin@phys.vsu.ru, paul@phys.vsu.ru, +7 (472) 220-83-63

Andrey Mikhailovich Mizerov, Ph.D., senior researcher², andreymizerov@rambler.ru, +7 (472) 220-83-63

Alexander Sergeevich Lenshin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher zolotukhin@phys.vsu.ru, lenshinas@mail.ru, +7 (472) 220-83-63

¹ FGBOU VO "Voronezh State University", Voronezh

² SPbAU RAS J.I. Alferova, St. Petersburg

Abstract: In this work, we demonstrate a new approach to the formation of GaN layers on Si (111) substrates using a transition nanoporous Si (111) (por-Si) sublayer, which was subsequently modified using the adatom substitution technique in order to form a 3H- buffer layer. SiC.

Key words: porous silicon, molecular beam epitaxy, heterostructures, gallium nitride.

Acknowledgments: this work was supported by the Russian Science Foundation, grant 19-72-10007. Access to the Karlsruhe Nano

Micro Facility equipment was obtained with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation MD-42.2019.2

УДК 538.975

<https://doi.org/10.29003/m1577.Silicon-2020/126-130>

**ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ НАНОКРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ КРС
СПЕКТРОСКОПИИ В ПЛЕНКАХ А-SiO_x:H ПОСЛЕ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ**

*Терехов Владимир Андреевич, д.ф.-м.н., профессор¹,
terekhov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Теруков Евгений Иванович, д.т.н., профессор²,
Eug.Terukov@mail.ioffe.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Ундалов Юрий Константинович, к.т.н., с.н.с.²,
undalov@mail.ioffe.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Барков Константин Александрович, аспирант¹,
barkov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Середин Павел Владимирович, д.ф.-м.н., профессор¹,
paul@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Голощанов Дмитрий Леонидович, к.ф.-м.н., ведущий
инженер¹, goloshchapov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Занин Игорь Евгеньевич, к.ф.-м.н., доцент¹, iezan@mail.ru, +7
(473) 220-83-63*

*Домашевская Эвелина Павловна, д.ф.-м.н., профессор¹,
ftt@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

¹ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Аннотация: в данной работе изучалось образование нанокристаллов кремния в пленках а-SiO_x при импульсном фотонном отжиге (ИФО). Рентгеноструктурные исследования пленок SiO_x с различным содержанием кремния показали, что при ИФО образуются массивы нанокристаллов кремния существенно отличающихся от средних размеров. Более того, согласно данным спектроскопии, ИФО не приводит к полному

упорядочению структурной сети атомов кремния, а некоторые атомы, по-видимому, расположенные в небольших кластерах размером ~ 1 нм, сохраняют отклонения от межатомных расстояний и углов связи.

Ключевые слова: нанокристаллы кремния, пленки $a\text{-SiO}_x$ с нанокластерами Si, импульсный фотонный отжиг (ИФО), спектроскопия при помощи Raman Microscope.

Введение

Тонкие пленки нестехиометрического оксида кремния $a\text{-SiO}_x$ с нанокластерами кремния в настоящее время активно исследуются различными лабораториями из-за возможности эффективного управления их оптическими свойствами, как на стадии формирования, так и с помощью технологических обработок [1,2]. Наличие избыточного кремния в таких пленках приводит при высокотемпературных отжигах к росту нанокристаллов [3], что сказывается на оптических свойствах пленок SiO_x , в том числе на фотолюминесценции. Поэтому в данной работе проводились исследования формирования нанокристаллов кремния в пленках $a\text{-SiO}_x$ при импульсном фотонном отжиге (ИФО).

Эксперимент

Пленки SiO_x с содержанием нанокластеров кремния 15 мол.%, 50 мол.% и 53 мол.% были получены в ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе [4] и отожжены методом ИФО в вакууме $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ Па. Анализ средних размеров нанокристаллов проводился методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре PANalytical Empyrean B.V. с монохроматизированным $\text{Cu K}\alpha 1$ -излучением и методом спектроскопии комбинационного рассеяния света на спектрометре Raman Microscope RamMics M532 EnSpectr с использованием лазера с длиной волны 532 нм.

Результаты

Рентгенодифрактометрические исследования пленок SiOx с различным содержанием кремния показали, что при ИФО отжиге образуются массивы нанокристаллов кремния существенно разного среднего размера. Т.е. формируются кристаллиты со средним размером >100 нм, и в то же время образуется заметное количество кристаллитов с размером ~ 10 нм. В тоже время спектроскопия КРС обнаруживает наличие в пленках SiOx с исходным содержанием нанокластеров кремния 50 и 53 мол.% после ИФО нанокристаллы существенно меньших размеров от ~ 1 нм до 3-4 нм [5-7]. Более того по данным спектроскопии КРС ИФО, так же, как и термический отжиг при 1000°C [3], не приводит к полному упорядочению структурной сетки атомов кремния, и у части атомов, видимо находящихся в кластерах малых размеров ~ 1 нм, сохраняются отклонения от межатомных расстояний и углов связи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90234 и гранта FZGU-2020-0036 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания.

Список использованных источников

1. Ю.К. Ундалов, Е.И. Теруков Нанокластеры кремния, nc-Si, в матрице гидрированного аморфного субокисла кремния, a-SiOx :H ($0 < x < 2$)// ФТП, 2015, Т.49, С. 887.
2. М. В. Хенкин, Д. В. Амасев Влияние атмосферы воздуха на электрические свойства двухфазных пленок гидрогенизированного кремния// ВМУ. Сер.3. Физика. Астрономия, 2015, №4, С. 60.
3. Н.А. Власенко, Н.В. Сопинский и др. Влияние легирования фторидом эрбия на фотолюминесценцию пленок SiOx// ФТП, 2011, Т. 46, С. 338.
4. В.А. Терехов, Е.И. Теруков, и др. Состав и оптические свойства аморфных пленок a-SiOx : H с нанокластерами кремния// ФТП, 2016, Т. 50, С. 212.

5. Z. Iqbal, S. Veprek, A.P. Webb and P. Capezzuto Raman scattering from small particle size polycrystalline silicon// Sol. St.Comm., 1981, V. 37, P. 993.

6. I.H. Campbell and P.M. Fauchet the effects of microcrystal size and shape on the one phonon raman spectra of crystalline semiconductors// Sol. St. Comm., 1986, V. 58, P. 739.

7. Z. Li, W. Li, Y. Jiang, H. Cai, et. al Raman characterization of the structural evolution in amorphous and partially nanocrystalline hydrogenated silicon thin films prepared by PECVD// J.Raman Spectrosc., 2011, V. 42, P. 415.

THE NANOCRYSTALS SIZE ESTIMATION USING RAMAN SPECTROSCOPY IN A-SIOX:H FILMS AFTER CRYSTALLIZATION OF SILICON NANOCLUSTERS

*Vladimir Andreevich Terekhov, Ph.D., professor¹,
terekhov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Eugene Ivanovich Terukov, Ph.D., professor²,
Eug.Terukov@mail.ioffe.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Yurii Konstantinovich Undalov, Ph.D., senior researcher²,
undalov@mail.ioffe.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Konstantin Aleksandrovich Barkov, Ph.D. student¹,
barkov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Pavel Vladimirovich Seredin, Ph.D., professor¹, paul@phys.vsu.ru,
+7 (473) 220-83-63*

*Dmitry Leonidovich Goloshchapov, Ph.D., lead engineer¹,
goloshchapov@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Igor Evgenievich Zanin, Ph.D., assistant professor¹,
iezan@mail.ru, +7 (473) 220-83-63*

*Evelina Pavlovna Domashevskaya, Ph.D., professor¹,
ftt@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

¹*Voronezh State University, Voronezh*

²*Ioffe Institute, St Petersburg*

Abstract: The α -SiO_x thin films with silicon nanoclusters are currently being actively studied by various laboratories due to the possibility of efficient control of their optical properties, both at the

stage of formation and using technological treatments. The presence of excess silicon in such films leads to the growth of nanocrystals during high-temperature annealing, which affects the optical properties of SiO_x films, including photoluminescence. Therefore, in this work, we studied the formation of silicon nanocrystals in $\alpha\text{-SiO}_x$ films during Pulse Photon Annealing (PPA). X-ray diffraction studies of SiO_x films with different silicon contents have shown that, upon PPA annealing, arrays of silicon nanocrystals of significantly different average sizes are formed. Moreover, according to the Raman spectroscopy data, PPA does not lead to complete ordering of the structural network of silicon atoms, and some of the atoms, apparently located in small clusters of ~ 1 nm, retain deviations from interatomic distances and bond angles.

Key words: silicon nanocrystals, $\alpha\text{-SiO}_x$ films with Si nanoclusters, pulse photon annealing, PPA, Raman spectroscopy

The reported study was funded by RFBR, project number № 19-32-90234.

Acknowledgments: the part of work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia Federation under the grand No. FZGU-2020-0036.

УДК 539.233

<https://doi.org/10.29003/m1578.Silicon-2020/130-133>

**СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ $\text{Si}(111)$ ПРИ
АДСОРБЦИИ Sn В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР
И ЭЛЕКТРОМИГРАЦИИ**

Петров Алексей Сергеевич, аспирант¹,
alexey_petrov@isp.nsc.ru, +7 (913) 782-39-22

Роголо Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., н.с.¹, rogilo@isp.nsc.ru,
+7 (383) 330-91-49

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: впервые визуализированы структурные изменения на поверхности Si(111) непосредственно в процессе осаждения Sn при $T=200-800^{\circ}\text{C}$. Обнаружено, что при $T>650^{\circ}\text{C}$ атомы Si, вышедшие из ступени, участвуют в формировании структуры $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$. Показано влияние электромиграции на процесс заполнения террас поверхности Si(111)- $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ фазой “1×1”-Sn. Атомы Sn на поверхности Si(111)- $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ обладают эффективным положительным зарядом.

Ключевые слова: *in situ* CBВ ОЭМ, поверхность Si(111), осаждение Sn, структурные переходы, электромиграция

Введение

Олово (Sn) занимает особое место в полупроводниковых технологиях. Помимо применения в составе твёрдых растворов с Si и Ge, оно используется при создании барьера Шоттки [1] или как сурфактант [2] на поверхности Si. Изучение фундаментальных процессов диффузии и электромиграции атомов Sn на кристаллической поверхности Si даст информацию, необходимую для создания морфологически совершенных слоёв Sn. Однако, обычные методики анализа структуры поверхности Si не позволяют визуализировать изменения непосредственно в процессе адсорбции, десорбции или электромиграции Sn.

Методика и результаты

Методом *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (CBВ ОЭМ) исследованы процессы на эшелонированной поверхности Si(111)- (7×7) с террасами шириной до 10 мкм при монослойном ($1\text{ MC} = 7,8\times 10^{14}\text{ см}^{-2}$) осаждении Sn и температурах подложки до 800°C . На ОЭМ изображениях зафиксированы изменения контраста террас при достижении покрытий в $1/3\text{ MC}$ и $1,1\text{ MC}$ Sn, что соответствовало структурным переходам $(7\times 7)\Rightarrow(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ и $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})\Rightarrow“1\times 1”$, наблюдаемым в то же время на дифракционных картинах. В отсутствие внешнего потока Sn происходил обратный переход “1×1” $\Rightarrow(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$. Структура

($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) стабильна при $T=200-850^\circ\text{C}$ и исчезает при $T \geq 900^\circ\text{C}$. В процессе структурного перехода $(7 \times 7) \Rightarrow (\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ при $T > 650^\circ\text{C}$ происходит выход на террасу атомов Si, выражающийся в сдвиге ступени, а уменьшение расхода Sn на формирование данной структуры указывает на то, что при данных T структура ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) является смесью атомов Sn и Si. При $T > 750^\circ\text{C}$ становится существенна десорбция Sn с поверхности Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$), что выражается в увеличении расхода Sn при формировании фазы “ 1×1 ”. Изменение полярности электрического тока, протекающего через образец, приводило к смене направления фронта заполнения террас фазой “ 1×1 ”-Sn на противоположенное. Показано, что домены фазы “ 1×1 ”-Sn дрейфуют по поверхности Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) в сторону отрицательного потенциала. Сделан вывод о наличии эффективного положительного заряда у атомов Sn на поверхности Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-72-30023) на оборудовании ЦКП «Наноструктуры».

Список использованных источников

Griffiths C.L. [и др.]. Effect of surface reconstruction on Fermi-level pinning in the Sn on Si(111) system // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 1993. №11(4). С. 1559-1563.

Dolbak A.E. [и др.]. Effect of adsorbed Sn on Ge diffusivity on Si (111) surface // Cent. Eur. J. Phys. 2008. №6(3). С. 634-637.

STRUCTURAL CHANGES ON SI(111) SURFACE DURING SN ADSORPTION AT CONDITIONS OF ELEVATED TEMPERATURES AND ELECTROMIGRATION

Alexey Sergeevich Petrov, Ph.D. student,
alexey_petrov@isp.nsc.ru, +7 (913) 782-39-22

Rogilo Dmitry Igorevich, Ph.D., researcher, rogilo@isp.nsc.ru,
+7 (383) 330-91-49

¹ISP SB RAS, Novosibirsk

Abstract: For the first time structural changes on Si(111) surface have been visualized directly during Sn deposition at $T=200\text{--}800^\circ\text{C}$. Si atoms detached from step edges were founded to participate in $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ structure formation at $T>650^\circ\text{C}$. Electromigration influence on terraces filling of Si(111)- $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ surface by “1×1”-Sn phase was shown. Sn atoms on Si(111)- $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})$ surface have positive effective charge.

Key words: *in situ* UHV REM, Si(111) surface, Sn deposition, structural transitions, electromigration.

Acknowledgments: this research was performed on the equipment of CKP “Nanostruktury” and was financially supported by the Russian Science Foundation [grant number 19-72-30023].

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.29003/m1579.Silicon-2020/133-136>

ОЦЕНКА ДОЗЫ АМОРФИЗАЦИИ КРЕМНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ЛЕГКИМИ ИОНАМИ

Окулич Евгения Викторовна, м.н.с.¹, eoikulich@nifti.unn.ru,
+7 (930) 706-07-57

Окулич Виктор Иванович, к.ф.-м.н., доцент²,
victorokulich@mail.ru, +7 (952) 457-79-86

Тетельбаум Давид Исаакович, д.ф.-м.н., профессор, в.н.с.¹,
tetelbaum@hys.unn.ru

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

²Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС,
г. Нижний Новгород

Аннотация: представлены результаты расчета дозы аморфизации кремния легкими ионами (He^+ , B^+ , N^+ , Si^+ и P^+) в зависимости от параметров ионной имплантации.

Ключевые слова: ионная имплантация, аморфизация кремния, облучение легкими ионами, доза аморфизации.

Введение

Вопрос оценки дозы аморфизации ($\Phi_{\text{ам}}$) Si при ионном облучении от широкого комплекса условий режима имплантации остается открытым. В работе на основе модели накопления точечных дефектов проведены расчеты $\Phi_{\text{ам}}$ в зависимости от массы и энергии ионов, температуры, плотности ионного тока.

Методика расчета

Расчет для ионов He^+ , B^+ , N^+ , Si^+ и P^+ проводился на основе диффузионно-коагуляционной (ДК) модели накопления и диффузии точечных дефектов [1] для энергий ионов (50 – 100кэВ), плотности ионного тока (0.4–10мкА/см²), температуры (100–500К). Генерация вакансий рассчитывалась в гауссовом приближении с учетом интенсивности их образования в приближении Кинчина-Пиза.

Результаты

Полученные результаты свидетельствуют о существенной зависимости $\Phi_{\text{ам}}$ от указанных факторов, в частности, от плотности ионного тока (j) (рис.1). Определены пределы применимости использования ДК модели. Исследована зависимость $\Phi_{\text{ам}}$ от поверхностной пленки SiO_2 .

Выводы

Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными показало возможность использования ДК модели для оценки $\Phi_{\text{ам}}$ Si при облучении легкими ионами.

Список использованных источников

1. Окулич Е.В., Окулич В.И., Тетельбаум Д.И. Расчет влияния плотности ионного тока и температуры на кинетику

накопления точечных дефектов при облучении кремния легкими ионами // ФТП, 2018, 52 (9). С 967-972.

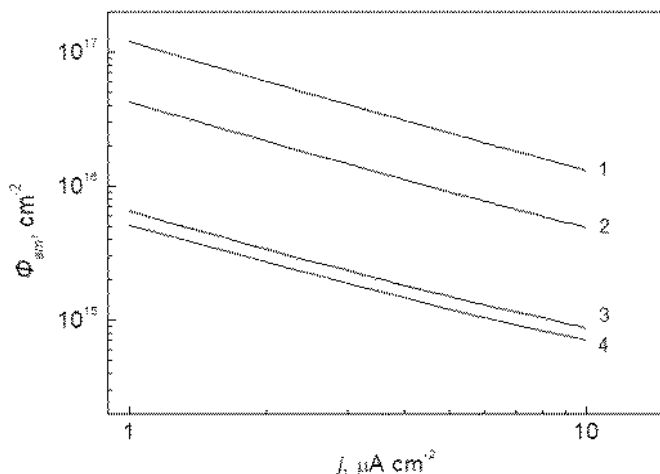


Рисунок 1 – Зависимость Φ_{am} от j при $T = 300$ К для ионов B^+ (1), N^+ (2), Si^+ (3), P^+ (4) с энергией 100 кэВ

ESTIMATION OF THE DOSE OF SILICON AMORPHIZATION IN A WIDE RANGE OF ION IMPLANTATION PARAMETERS WITH LIGHT IONS

*Evgeniya Victorovna Okulich*¹, junior science researcher,
eokulich@nifti.unn.ru, +7 (930) 706-07-57

*Victor Ivanovich Okulich*², associate professor

*David Isaakovich Tetelbaum*¹, leading researcher

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod

² Nizhny Novgorod Institute of Management - branch of RANEPa, Nizhny Novgorod

Abstract: There are presented the results of calculating the dose of silicon amorphization by light ions (He^+ , B^+ , N^+ , Si^+ , and P^+)

depending on the parameters of ion implantation. A method for calculating the dose of amorphization of silicon in the region of the gate dielectric is proposed.

Key words: ion implantation; amorphization of silicon; irradiation with light ions; amorphization dose; amorphization of silicon dioxide.

УДК 621.3.049.771.12

<https://doi.org/10.29003/m1580.Silicon-2020/136-138>

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННЫХ БАРЬЕРОВ В СИСТЕМЕ МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В МЕТОДЕ GAP FILLING

*Орлов Андрей Алексеевич, младший научный сотрудник¹,
студент², aorlov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99*

*Резванов Аскар Анварович, к. ф.-м. н., начальник
лаборатории¹, arezvanov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99*

*Гвоздев Владимир Александрович, инженер-технолог¹,
vgvozdev@niime.ru, +7 (495) 229-70-99*

*Кузнецов Павел Игоревич, инженер-технолог¹,
pkuznecov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99*

*Серегин Дмитрий Сергеевич, к. т. н., начальник отдела
технологических исследований³, d_seregin@mirea.ru, +7 (495)
215-65-65*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

³РТУ МИРЭА, г. Москва

Аннотация: в работе предлагаются и исследуются материалы для диффузионных барьеров в методе gap filling для предотвращения диффузии меди через открытые концы проводников.

Ключевые слова: low-k диэлектрик, gap filling, dual damascene.

Введение

Альтернативой технологии формирования системы медной металлизации Dual Damscene [1] с использованием low-k диэлектриков может быть рассмотрен подход gap filling, который позволяет исключить повреждение диэлектрика при плазмохимическом травлении (ПХТ). Данный метод основан на предварительном формировании медных проводников и последующим заполнением диэлектриком зазоров между ними [2]. Основными проблемами в подходе gap filling являются формирование диффузионного барьера между открытыми участками меди и диэлектриком и поиск материала для такого барьера. Необходимыми требованиями к диффузионным барьерам являются: хорошая адгезия к нижележащим слоям; отсутствие диффузии и электромиграции меди, минимальная толщина. Важно, также, обеспечивать хорошую равномерность нанесенного барьера при минимальной толщине, что трудно достигается, например, при химическом осаждении из газовой фазы (PECVD). В качестве материалов для диффузионных барьеров потенциально могут быть рассмотрены следующие соединения: $SiCN$ ($k = 4.8$), $CuSiN$ ($k = 4.6$), AlN ($k = 9.0$).

Основная часть

Целью данной работы является исследование диффузионного барьера из материала AlN , который наносился методом атомно-слоевого осаждения (ALD) на сплошные слои меди и структуры, представляющие собой медные линии с расстоянием между ними до 700 нм. Толщина барьера для разных структур составляет 6 и 10 нм. Для оценки применимости и эффективности данного метода вместе со структурами с low-k диэлектриком ($k = 2.3$) были сформированы аналогичные структуры спутники, но с более плотным диэлектриком ($k = 3.3$). Измерения образцов проводились методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также снятием вольтамперных и фарад частотных характеристик.

Выводы

Основными результатами работы являются отработка нанесения равномерного диффузионного барьера на открытые участки меди и отсутствие видимой атомарной диффузии меди в диэлектрик (на всех образцах) при толщине диффузионного барьера больше 6 нм.

Список использованных источников

1. Валеев А.С., Красников Г.Я., Гвоздев В.А., Кузнецов П.И. // патент на изобретение RUS 2548523 17.12.2013

2. L. Zhang, J.-F. de Marneffe, N. Heylen, G. Murdoch [и др.]. Damage free integration of ultralow-k dielectrics by template replacement approach. Appl. Phys. Lett. 107, 092901 (2015).

FORMATION OF DIFFUSION BARRIERS IN THE COPPER METALLIZATION SYSTEM IN THE GAP FILLING METHOD

Andrey Alekseevich Orlov^{1,2}, junior researcher, student, aorlov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99

Askar Anvarovich Rezvanov^{1,2}, Ph.D.D., head of laboratory, arezvanov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99

*Vladimir Alexandrovich Gvozdev*¹, process engineer, vgvozdev@niime.ru, +7 (495) 229-70-99

Pavel Igorevich Kuznetsov, process engineer¹, pkuznecov@niime.ru, +7 (495) 229-70-99
Dmitry Sergeevich Seregin, Ph. D., head of the Department of technological research³, d_seregin@mirea.ru, +7 (495) 215-65-65

¹MERI, Russia, Moscow, Zelenograd

²MIPT (NRU), Moscow Region, Dolgoprudny

Annotation: The paper proposes and studies materials for diffusion barriers in the gap filling method to prevent copper diffusion through open ends of conductors.

Key words: low-k dielectric; gap filling; dual damascene.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В КРЕМНИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СВЧ СИГНАЛА

*Ромодин Михаил Сергеевич, младший научный сотрудник¹,
аспирант², mikhail.romodin@phystech.edu, +7 (985) 751-74-10*

*Баранов Глеб Владимирович, к.ф.-м.н., начальник
лаборатории², gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42*

*Дорофеев Алексей Анатольевич, ведущий научный
сотрудник², adorofoev@niime.ru, +7 (916) 555-03-67*

*Панасенко Петр Васильевич, заместитель генерального
директора², rpanasenko@niime.ru, +7 (985) 132-43-29*

*Федотов Сергей Дмитриевич, к.т.н., ведущий научный
сотрудник³, fedotov@epiel.ru, +7 (968) 354-32-04*

*Царев Александр Владимирович, ведущий научный
сотрудник², atsarev@niime.ru, +7 (916) 275-22-20*

¹МФТИ, г. Долгопрудный

²АО «НИИМЭ», г. Москва

³АО «ЭПИЭЛ», г. Москва

Аннотация: Проанализированы основные механизмы возникновения потерь СВЧ сигнала, которые образуются в объеме Si и на границе Si с гетероструктурой AlGaIn/GaN СВЧ НЕМТ. Предложены методы их снижения, определены требования к резистивности Si подложки с учетом особенностей роста гетероструктуры.

Ключевые слова: GaN на Si, СВЧ НЕМТ, диэлектрические потери

Введение

Применение Si подложки в СВЧ приложениях имеет существенные технические ограничения, однако без сомнения является коммерчески выгодным [1], и вследствие чего исследования и разработки в этом направлении непрерывно

идут и по сей день. Технические ограничения главным образом обусловлены высоким уровнем затухания СВЧ мощности в линиях передач, реализованных на Si. Максимальное значение удельного сопротивления коммерчески доступного кремния составляет около 40 кОм*см, что в сравнении с традиционно используемыми в СВЧ материалами подложек (GaAs, SiC, Al₂O₃ и др.) является довольно низким и приводит к большим потерям.

Дискретное исполнение Si СВЧ приборов и конструктивно-топологические решения Si СВЧ МИС с короткими линиями передачи сигнала позволяют минимизировать потери, что подтверждается наличием на рынке ряда продуктов выполненных по SiGe БиКМОП и Si КМОП технологиям [2]. Однако развитие технологий изготовления III-N соединений на Si подложке и разработка на их основе многофункциональных МИС X- и Ka- диапазонов, крайне привлекательных для СВЧ приложений [3], требует оценки потерь СВЧ мощности в линиях передач на основе Si.

Методика исследования

В настоящей работе методами трехмерного компьютерного электромагнитного моделирования, а также экспериментальной верификацией анализируются потери СВЧ мощности в Si подложках с различным уровнем резистивности и на границе Si – гетероструктура AlGa_{0.3}N/GaN, предназначенной для создания СВЧ НЕМТ, а также обсуждаются методы снижения потерь.

Выводы

На основе полученных результатов авторы делают вывод, что Si может рассматриваться в качестве подложки для СВЧ НЕМТ на основе AlGa_{0.3}N/GaN при значении удельного сопротивления 5 кОм*см и выше.

Список использованных источников

1. Баранов Г.В., Дорофеев А.А., Красников Г.Я., Леоненков Е.И., Панасенко П.В. Анализ приборных требований к эпитаксиальным структурам GaN на Si под НЕМТ для силовых и СВЧ-приложений //Микроэлектроника-2019. Технологии и компоненты микро- и нанoeлектроники. – 2019. – С. 147-148.

2. Yang W. et al. The microwave performances of SiGe/Si HBT based on the high resistivity substrate //2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – IEEE, 2005. – Т. 1. – С. 654-657.

3. Ромодин М.С., Баранов Г.В., Дорофеев А.А. Анализ механизма потерь СВЧ сигнала в НЕМТ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN на кремнии//Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18-24 ноября 2019 года. Электроника, фотоника и молекулярная физика. – М.: МФТИ, 2019. – С. 275-277.

INVESTIGATION OF LOSSES IN SILICON AT MICROWAVE FREQUENCIES

*Mikhail Sergeevich Romodin, Junior Researcher¹, Ph.D.-student²,
mikhail.romodin@phystech.edu, +7 (985) 751-74-10*

*Gleb Vladimirovich Baranov, Ph.D. (Phys.-Math.), Head of
Laboratory¹, gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42*

*Aleksei Anatolievich Dorofeev, Leading Researcher¹,
adorofeev@niime.ru, +7 (916) 555-03-67*

*Petr Vasilievich Panasenko, Ph.D. (Techn.), Deputy General
Director¹, ppanasenko@niime.ru, +7 (985) 132-43-29*

*Sergei Dmitrievich Fedotov, Ph.D. (Techn.), Leading Researcher³,
fedotov@epiel.ru, +7 (968) 354-32-04*

*Tsarev Aleksandr Vladimirovich, Leading Researcher¹,
atsarev@niime.ru, +7 (916) 275-22-20*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

³JSC Epiel, Moscow

Abstract: In this work basic mechanisms of microwave losses in silicon substrate and at the interfacial Si/heterostructure AlGaN/GaN for HEMTs and MMIC were investigated. Methods for reducing of losses were proposed. Requirements to resistivity of silicon substrate taking into account the characteristics of growth AlGaN/GaN heterostructure were defined.

Key words: GaN on Si, HEMT for microwave applications, MMIC, dielectric losses.

УДК 621.794.449

<https://doi.org/10.29003/m1582.Silicon-2020/142-145>

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССЕ ГЛУБОКОГО КРИОГЕННОГО
ТРАВЛЕНИЯ**

Мирошкин Ярослав Андреевич, младший научный сотрудник¹, студент², miroshkin.yaroslav@gmail.com, +7 (915) 314-06-80

Резванов Аскар Анварович, к.ф.-м.н., начальник лаборатории¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: Данная работа посвящена исследованию процессов взаимодействия химически активных частиц с поверхностью кремния, в процессе глубокого анизотропного травления методом Сгуо. Предложен метод количественного расчета кинетики частиц, базирующийся на адсорбционно-десорбционной модели Лангмюра-Хиншенвульда

Ключевые слова: глубокое травление кремния, кинетика, криогенное травление, кинетика взаимодействия с поверхностью, метод Лангмюра – Хиншенвульда.

Введение

В данной работе рассматривается взаимодействие химически активных частиц с поверхностью кремния в процессе глубокого анизотропного травления методом Cryo. Представлено количественное описание кинетических процессов, происходящих на поверхности и в объеме протравливаемых структур основанное на методе Лангмюр-Хиншенвульда.

Описание работы

Гетерогенное взаимодействие частиц с поверхностью включает в себя три последовательные стадии – адсорбцию ХАЧ (химически активных частиц) на поверхности, химическую реакцию и десорбцию образующихся продуктов реакции, каждая из которых может быть лимитирующей [1]. Реальная кинетика процесса травления будет определяться закономерностями протекания наиболее медленной из трех названных гетерогенных стадий [2].

Для описания кинетики взаимодействия ХАЧ плазмы с поверхностью часто используется адсорбционно-десорбционная модель гетерогенного процесса, основанная на теории активных центров Лангмюра-Хиншенвульда. Поверхность обрабатываемого материала рассматривается как совокупность активных центров, способных присоединять ХАЧ из объема плазмы [3]. Попадающая на поверхность частица адсорбируется с вероятностью, зависящей от природы частиц, температуры и состояния поверхности (рисунок 1).

В данной работе представлен анализ влияния различных параметров системы ПХТ на скорость травления в криогенном процессе.

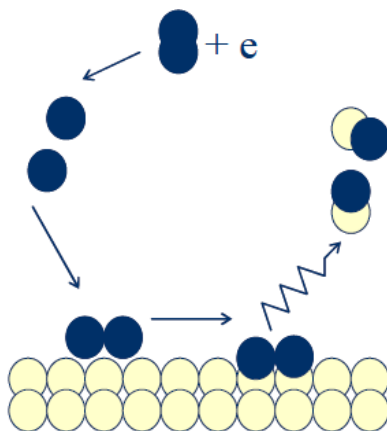


Рисунок 1 – Схематичное представление взаимодействия ХАЧ с поверхностью

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012.
2. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. – Иваново: Иван. гос. химико-технол. ун-т, 2006.
3. Belen R. J. et al. Feature-scale model of Si etching in SF₆/O₂ plasma and comparison with experiments //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2005. – Т. 23. – №. 5. – С. 1430-1439.

INVESTIGATION OF THE KINETICS OF INTERACTION OF CHEMICALLY ACTIVE PARTICLES WITH THE SILICON SURFACE DURING DEEP CRYOGENIC ETCHING

Yaroslav Andreevich Miroshkin, junior researcher¹, student², miroshkin.yaroslav@gmail.com, +7 (915) 314-06-80

Askar Anvarovich Rezvanov, candidate of physical and mathematical Sciences, head of the laboratory ¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: This work is devoted to the study of the interaction of chemically active particles with the silicon surface in the process of deep anisotropic etching using the Cryo method. A method is proposed for quantitative estimation of kinetics of particles based on the adsorption-desorption model of Langmuir adsorption kinetics.

Key words: deep etching of silicon, kinetics, cryogenic etching, kinetics of interaction with the surface, Langmuir method.

УДК 538.945, 538.935

<https://doi.org/10.29003/m1583.Silicon-2020/145-149>

ПЕРЕНОС ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ТОКА ПОВЕРХНОСТНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЙЛЕВСКИХ ПОЛУМЕТАЛЛОВ

Девятков Эдуард Валентинович, профессор РАН, д.ф.-м.н., доцент, заместитель директора, ИФТТ РАН, г. Черноголовка, dev@issp.ac.ru, +7 (916) 041-95-38

Аннотация: В данной работе представлены эксперименты по исследованию переноса заряда топологическими поверхностными состояниями магнитных и немагнитных Вейлевских полуметаллов. Для выделения вклада поверхностных состояний используется стационарный и нестационарный эффект Джозефсона, для чего реализованы гибридные структуры сверхпроводник-топологический полуметалл-сверхпроводник.

Ключевые слова: Вейлевские топологические полуметаллы, поверхностные состояния, ферромагнетики, эффект Джозефсона.

Введение

Подобно другим топологическим материалам, Вейлевские полуметаллы характеризуются топологически защищёнными поверхностными состояниями – Ферми-арками, соединяющими проекции вейлевских точек на поверхностную зону Брюллиэна в k -пространстве [1]. В отличие от геликоидальных поверхностных состояний в топологических изоляторах [2], поверхностные состояния в вейлевских полуметаллах являются киральными, как в черновском изоляторе (режим квантового эффекта Холла) [1]. Наличие Ферми-арок было экспериментально продемонстрировано в ARPES измерениях, например, для трёхмерных кристаллов MoTe_2 и WTe_2 [3,4].

Результаты

В данной работе мы экспериментально исследовали электронный транспорт между двумя сверхпроводящими контактами на поверхности магнитного Вейлевского полуметалла $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, находящимися на расстоянии 5 мкм. Для магнитно разупорядоченного состояния $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$, мы наблюдаем лишь процесс Андреевского отражения вблизи каждого контакта, что, однако, означает высокую прозрачность интерфейса индий- $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$. После намагничивания образца внешним магнитным полем, образец демонстрирует выраженный аномальный эффект Холла. В этом режиме мы обнаружили джозефсоновский ток между 5 мкм разделёнными индиевыми контактами, с необычными зависимостями максимального тока от магнитного поля и температуры. Поскольку аномальный эффект Холла в магнитных Вейлевских полуметаллах связывается с наличием спин-поляризованных поверхностных токонесущих состояний, мы заключаем, что именно эти топологически защищённые состояния дают

основной вклад в перенос триплетного джозефсоновского тока.

Для немагнитного вейлевского полуметалла WTe_2 , мы обнаружили, что характер подавления критока магнитным полем качественно различается для разных ориентаций поля по отношению к плоскости SNS перехода, в частности, продемонстрирована картина осцилляций, известная для джозефсоновского интерферометра. Этот факт, как и наблюдение дробных ступеней Шапиро под микроволновым облучением (т.е. сложного характера ток-фазного соотношения), указывает на существование и интерференцию нескольких каналов переноса джозефсоновского тока. Анализ показывает, что джозефсоновский ток переносится поверхностными состояниями на противоположных гранях образца.

В то же время, мы не наблюдаем исчезновения нечётных ступеней Шапиро даже при максимальных мощностях СВЧ излучения, что указывает на киральный, а не геликоидальный (как в топологических изоляторах) характер поверхностных состояний.

Подробнее см. [5,6]

Список использованных источников

1. N. P. Armitage, E. J. Mele, and A. Vishwanath, // Rev. Mod. Phys. - 2018, vol. 90, - pp. 15001.
2. M. Z. Hasan and C. L. Kane, // Rev. Mod. Phys. - 2010, vol. 82, - pp. 3045.
3. Ch. Wang, Y. Zhang, J. Huang, и соавторы // Phys. Rev. B – 2016, vol. 94, - pp. 241119(R).
4. Y. Wu, D. Mou, N.H. Jo, и соавторы // Phys. Rev. B – 2016, vol. 94, - pp. 121113(R).
5. O. O. Shvetsov, V. D. Esin, Yu. S. Barash, A. V. Timonina, N. N. Kolesnikov, and E. V. Deviatov // Phys. Rev. B — 2020, vol. 101, - pp. 035304.
6. O.O. Shvetsov, A. Kononov, A.V. Timonina, N.N. Kolesnikov, E.V. Deviatov // EPL — 2018, vol. 124, - pp. 47003.

JOSEPHSON CURRENT TRANSFER BY WEYL TOPOLOGICAL SEMIMETALS SURFACE STATES

Eduard Devyatov, Professor RAS, DSc., Associate Professor, Deputy Director, dev@issp.ac.ru, +7 (916) 041-95-38

ISSP RAS, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

Abstract: Experiments on the study of topological surface states of magnetic and nonmagnetic Weyl semimetals charge transfer are presented. For surface states contribution the stationary and nonstationary Josephson effect realized at superconductor-topological semi-metal-superconductor hybrid structures is applied.

Key words: Weyl topological semimetals, surface states, ferromagnetics, Josephson effect.

УДК 538.975

<https://doi.org/10.29003/m1584.Silicon-2020/149-152>

**ВОЗМОЖНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ФАЗЫ
Al₃Si ПРИ ИОННО-ЛУЧЕВОМ И МАГНЕТРОННОМ
НАПЫЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК Al-Si**

*Домашевская Эвелина Павловна, д.ф.-м.н., профессор¹,
ftt@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

Терехов Владимир Андреевич, д.ф.-м.н., профессор¹

Занин Игорь Евгеньевич, к.ф.-м.н., доцент¹

Барков Константин Александрович, аспирант¹

¹ФГБОУ ВО «ВГУ», г. Воронеж

Аннотация: При магнетронном и ионно-лучевом способах получения композитных пленок Al-Si могут формироваться метастабильные фазы, такие как Al₃Si. В настоящей работе проводились исследования области устойчивости фазы Al₃Si в зависимости от состава ионно-лучевых пленок Al_xSi_{1-x}. С помощью методов рентгеновской дифракции и ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии в ионно-лучевых плёнках Al_{1-x}Si_x обнаружено формирование упорядоченного раствора Al₃Si с примитивным типом элементарной ячейки кубической сингонии Pm3m и параметром решетки, равным 4.085 Å, при этом дальний порядок достаточно устойчив к изменению элементного состава.

Ключевые слова: метастабильная фаза Al₃Si, атомное и электронное строение, ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия.

Введение

Согласно диаграмме состояний системы Al-Si она относится к простому эвтектическому типу с пренебрежимой

растворимостью Al в Si (≤ 0.016 ат.%) и достаточно малой растворимостью Si в Al (1.5 ат.% при 577 °C) [1], поэтому пленки Al-Si при содержании Si 1.5 ат.% являются композитами, состоящими из алюминия, избыточного микро- и нанокристаллов кремния и кремния растворенного в алюминии. Однако литературные данные показывают, что при сверхбольших скоростях охлаждения растворов Al-Si возможно образование метастабильных фаз [2], которые внесены в международную систему данных.

При магнетронном и ионно-лучевом способах получения композитных пленок частицы распыляемого вещества падают на подложку с очень большой энергией $\sim 2\text{-}10$ эВ, что более чем на порядок превышает энергию частиц, испаряющихся с поверхности расплава. Поэтому при осаждении таких горячих частиц на холодную подложку можно ожидать образование метастабильных фаз.

Основная часть

В работе [3] с использованием рентгеновской дифрактометрии с монохроматизированным $\text{Cu } \alpha_1$ – излучением и ультрамягкого рентгеновского спектрометра-монохроматора РСМ-500 были проведены исследования особенностей фазового состава композитных пленок $\text{Al}_x\text{Si}_{1-x}$ различного состава, полученных магнетронным и ионно-лучевым распылением, и было обнаружено, что в магнетронной пленке $\text{Al}_{0.73}\text{Si}_{0.27}$ кроме фаз алюминия и нанокристаллического кремния, со средним размером нанокристаллитов около 20 нм, наблюдаются рефлексы дополнительной фазы Al_3Si . Поэтому в настоящей работе проводились исследования области устойчивости фазы Al_3Si в зависимости от состава ионно-лучевых пленок: $\text{Al}_{0.55}\text{Si}_{0.45}$, $\text{Al}_{0.62}\text{Si}_{0.38}$ и $\text{Al}_{0.75}\text{Si}_{0.25}$. В результате исследований методом рентгеновской дифракции в ионно-лучевых пленках $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ обнаружены только рефлексы фазы Al_3Si при отсутствии рефлексов кремния и алюминия. Анализ распределения валентных состояний кремния и алюминия показал образование низшего силицида алюминия.

Выводы

Проведенный расчет структуры упорядоченного твердого раствора Al_3Si дал значения межплоскостных расстояний близкие к экспериментальному набору межплоскостных расстояний. Таким образом сделан вывод о формировании упорядоченного раствора Al_3Si с примитивным типом элементарной ячейки кубической сингонии $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ и параметром решетки, равным 4.085 Å. Кроме того, дальний порядок в ионно-лучевых плёнках $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ достаточно устойчив к изменению элементного состава.

Работа поддержана грантом FZGU-2020-0036 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания.

Список использованных источников

1. J.L. Murray, A.J. McAlister, The Al-Si (Aluminum-Silicon) system, Bull. Alloy Phase Diagrams. 5 (1984) 74–84.
2. Кушнерева, А.К. и др. Неорганические материалы, 1970, Т. VI, №10, С.1867-1868.
3. V.A. Terekhov et. al, Formation and Electronic Structure Peculiarities in the $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ Film Composites under the Conditions of Magnetron and Ion-Beam Sputtering, Phys. Solid State. 60 (2018) 1021–1028.

FORMATION POSSIBILITY OF THE Al_3Si METASTABLE PHASE DURING ION-BEAM AND MAGNETRON DEPOSITION OF COMPOSITE AL-SI FILMS

*Evelina Pavlovna Domashevskaya, Ph.D., professor¹,
ftt@phys.vsu.ru, +7 (473) 220-83-63*

Vladimir Andreevich Terekhov, Ph.D., professor¹

Igor Evgenievich Zanin, Ph.D., assistant professor¹

Konstantin Aleksandrovich Barkov, Ph.D. student¹

¹*Voronezh State University, Voronezh*

Abstract: Metastable phases such as Al_3Si can form in Al-Si composite films obtained by magnetron and ion-beam sputtering. In this work, we investigated the stability region of the Al_3Si phase depending on the composition of the ion-beam $\text{Al}_x\text{Si}_{1-x}$ films. Using X-ray diffraction and Ultrasoft X-ray Emission Spectroscopy, an ordered Al_3Si solution with a primitive unit cell of the cubic system Pm3m and a lattice parameter of 4.085 Å was found in $\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x$ ion-beam films. Studies have shown that the long-range order is quite resistant to changes in the elemental composition.

Key words: metastable phase Al_3Si , atomic and electronic structure, Ultrasoft X-ray Emission Spectroscopy.

Acknowledgments: the reported study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia Federation under the grand No. FZGU-2020-0036.

УДК 537.9, 537.5

<https://doi.org/10.29003/m1585.Silicon-2020/152-158>

ЛАЗЕРНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ФРАГМЕНТИРОВАНИЕ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ

Редькин Сергей Викторович к.т.н., ведущий научный сотрудник¹, sergeiredckin@yandex.ru, +7 (915) 130-94-84

Мальцев Петр Павлович д.т.н., профессор, научный руководитель¹, isvch@isvch.ru, +7 (916) 165-30-63

Гамкрелидзе Сергей Анатольевич д.т.н., профессор, директор¹, gamkrelidze@isvch.ru, +7 (916) 713-22-99

¹ИСВЧПЭ РАН, Москва

Аннотация: Проведены работы по созданию технологии лазерного плазмохимического фрагментирования алмаза и сапфира на кристаллы. В экспериментах использовались лазеры: на парах меди с длинами волн 510,6нм и 578,2нм; ультрафиолетовый лазер с длиной волны 355нм. В качестве

рабочих сред использовались: кислород (O_2), водород (H_2), аргон (Ar), HCl, HF, F_2 , CF_4 . Диапазон рабочего давления – от атмосферного до 1×10^{-3} Торр. Техническим результатом является возможность лазерного плазмохимического фрагментирования пластин поликристаллического алмаза и сапфира без «выброса» (грат) материала подложек на сформированные приборы, стенки и окна технологической камеры, без модификации материала подложек.

Ключевые слова: поликристаллический алмаз, сапфир, оптический пробой, плазмохимическое травление пластина.

Введение

В настоящее время, при переходе к нано нормам и нано слоям топологических элементов создаваемых электронных приборов особо актуальной становится операция фрагментирования пластин на кристаллы. Все существующие, на данный момент, методы – механические, лазерные не обеспечивают повышенные требования к этой операции – отсутствие выброса материала подложки (грат) на поверхность с сформированными приборами, отсутствие или минимизация «замороженных» механических или термонапряжений в кристаллах, которые при внешних экстремальных условиях эксплуатации приборов «разряжаются», что приводит к выходу приборов из-за механических повреждений (подложка треснит). С учётом этого, проектировщики закладывают широкие «дорожки» для осуществления операции резки. Это уменьшает полезное использование площади пластин для размещения приборов, а значит удорожает их.

Целью настоящей работы была разработка технологий исключающих выброс материала подложек (грат), уменьшение ширины реза, исключение остаточных термонапряжений в стенках реза (кристалла). Поставленная цель решалась посредством локального плазмохимического травления [1]. Для создания плазмы использовалось физическое явление – оптический пробой газа. В качестве газов использовались химически активные среды с материалом подложки, которые

переводили их в газовую фазу и удалялись с помощью вакуумной системы, т.е. классический плазмохимический процесс.

Экспериментальная часть

Все наши эксперименты проводились на разработанных нами макетных установках. С помощью оптической системы мы фокусировали лазерный луч с требуемой длиной волны на пластину, с помощью вакуумной системы создавали условия для оптического пробоя среды и перемещая пластину осуществляли локальный процесс её плазмохимического травления. Диаметр плазменного образования (в фокусе) составлял 5 – 20 мкм (в зависимости от длины волны лазера, расходимости пучка и т.д. и т.п.). Поскольку при химической реакции в обрабатываемой пластине не создаются механические напряжения и материал подложки не выбрасывается на поверхность кристалла, тем самым мы решили поставленную задачу. Результаты экспериментов представлены на рисунках 1 – 5.

Заключение

Разработаны технологии лазерного плазмохимического фрагментирования пластин поликристаллического алмаза и сапфира. На технологию лазерного плазмохимического фрагментирования пластин поликристаллического алмаза ИСВЧПЭ РАН получен патент РФ, а на соответствующую резку сапфира подана заявка на патент РФ.

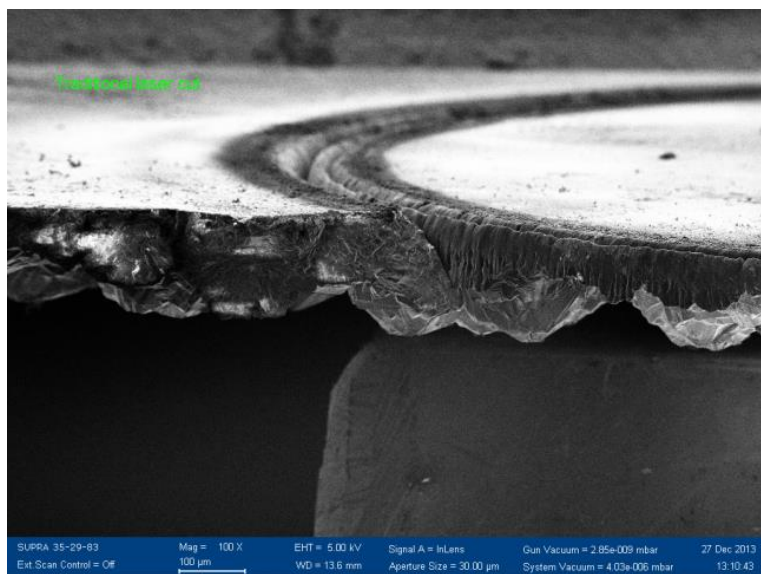


Рисунок 1 – Традиционная лазерная резка
поликристаллического алмаза при атмосферном давлении

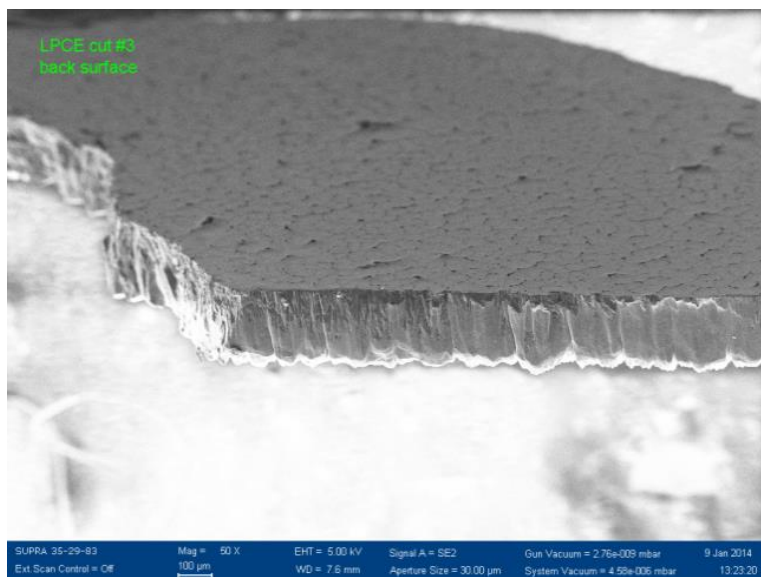


Рисунок – 2 Лазерная плазмохимическая резка
поликристаллического алмаза

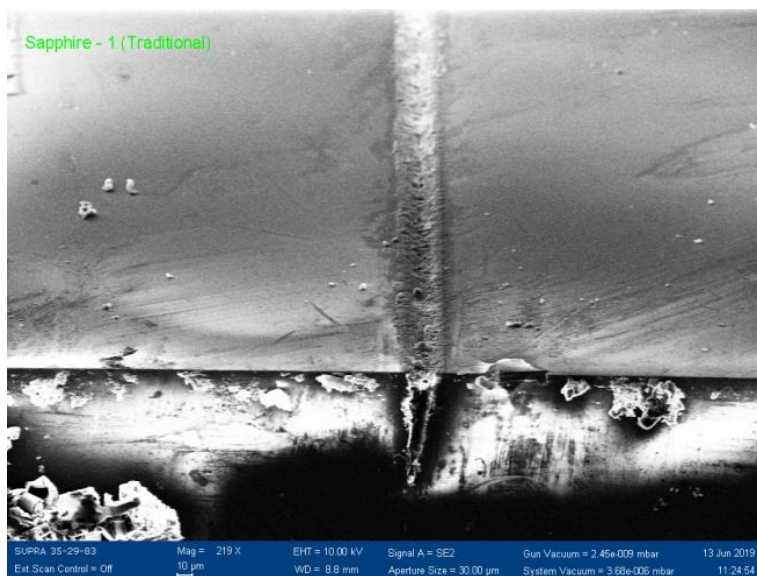


Рисунок 3 – Традиционная лазерная резка сапфира

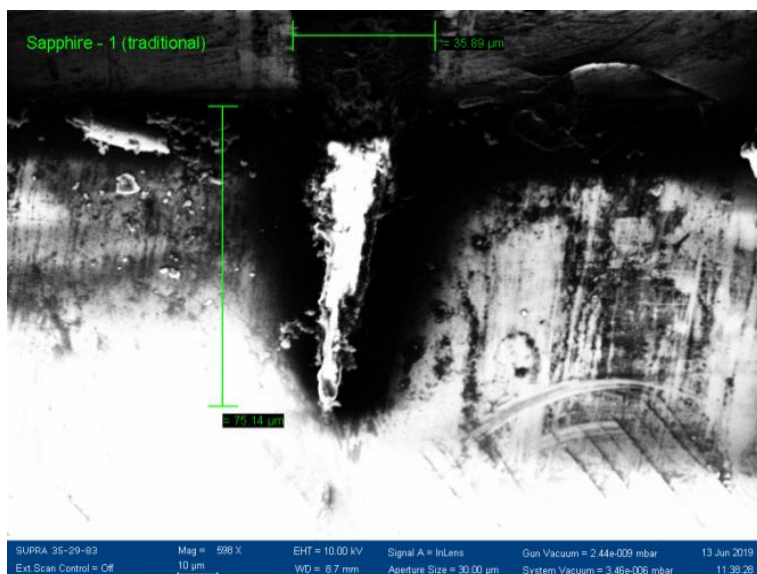


Рисунок 4 – Традиционная лазерная резка сапфира

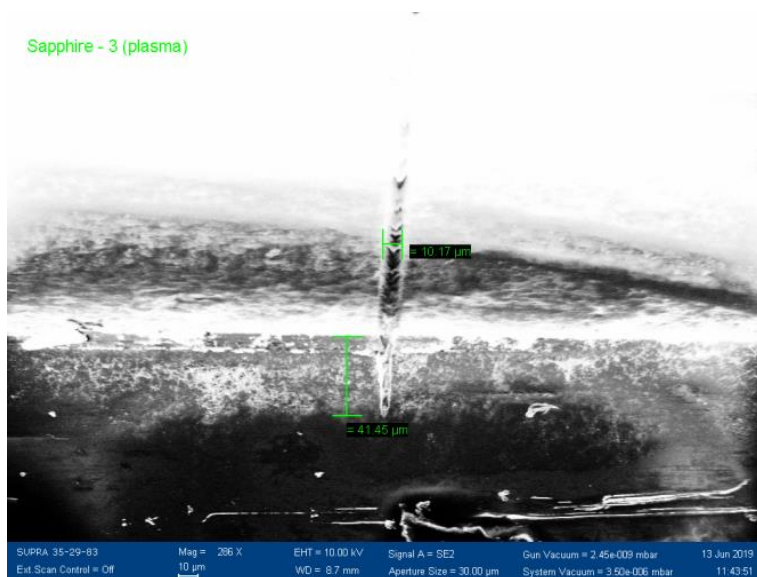


Рисунок 5 – Лазерная плазмохимическая резка сапфира

Список использованных источников

1. Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин: Патент 2537101 РФ: МПК H01 21/302 // Аристов В.В., Мальцев П.П., Редькин С.В., Скрипниченко А.С., Павлов В.Ю. 27.12.2014. Бюл. №36.

LASER PLASMA-CHEMICAL FRAGMENTATION OF PLATES INTO CRYSTALS

Sergey Viktorovich Redkin, Ph.D., Senior Researcher¹,
sergeiredckin@yandex.ru, +7 (915) 130-94-84

Petr Pavlovich Maltsev, Doctor of Engineering Sciences, professor,
scientific supervisor¹, isvch@isvch.ru, +7 (916) 165-30-63

Sergey Anatolievich Gamkrelidze, Doctor of Engineering Sciences,
professor, director¹, gamkrelidze@isvch.ru, +7 (916) 713-22-99

¹IUHFSE RAS, Moscow

Abstract: A technology for laser plasma-chemical fragmentation of diamond and sapphire into crystals has been developed. The following lasers were used in the experiments:

- on copper vapors with wavelengths of 510.6 nm and 578.2 nm;
- ultraviolet laser with a wavelength of 355 nm.

Oxygen (O₂), hydrogen (H₂), argon (Ar), HCl, HF, F₂, CF₄ were used as working media. Working pressure range varied from atmospheric pressure to 1x10⁻³ Torr. The technical result is possibility of laser plasma-chemical fragmentation of polycrystalline diamond and sapphire plates without substrate material “ejection” (burr) onto the formed devices, walls and ports of technological chamber, without modifying the substrate material.

Key words: polycrystalline diamond, sapphire, optical-induced breakdown, plasma-chemical etching, plate.

УДК 539.23

<https://doi.org/10.29003/m1586.Silicon-2020/158-160>

ОБОБЩЕННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ДВУМЕРНЫХ И НУЛЬМЕРНЫХ СТРУКТУР КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

*Лозовой Кирилл Александрович, к. ф.-м. н., доцент¹,
lka@sibmail.com, +7 (913) 115-13-79*

*Дирко Владимир Владиславович, аспирант¹,
vovenmir@gmail.com, +7 (923) 436-50-44*

¹Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация: В данной работе проводится всестороннее рассмотрение влияния зависимости упругих напряжений и поверхностных энергий от толщины осажденного материала на эпитаксиальное формирование двумерных слоев и квантовых точек по механизму Странского–Крастанова.

Ключевые слова: двумерные материалы, квантовые точки, молекулярно-лучевая эпитаксия, кремний, германий.

Введение

Важнейшую роль при описании процессов роста эпитаксиальных наноструктур по механизму Странского–Крастанова играют понятия равновесной и критической толщины перехода от двумерного к трехмерному росту [1]. Первая величина определяет толщину смачивающего слоя осаждаемого материала, при которой фазовый переход 2D-3D становится энергетически возможным. Вторая же определяет толщину смачивающего слоя, при которой зарождение трехмерных островков идет наиболее интенсивно и которая может быть зарегистрирована экспериментально по изменению картины дифракции быстрых электронов. Она определяется из уравнения кинетического баланса процессов осаждения атомов на подложку и потребления атомов смачивающего слоя растущими островками.

Теоретическая модель

В данной работе строится кинетическая модель роста двумерных слоев и квантовых точек по механизму Странского–Крастанова, учитывающая влияние зависимости упругих напряжений и поверхностных энергий от толщины осажденного материала [2]. В качестве модельной системы для проведения теоретических расчетов используется зарождение и рост квантовых точек германия на поверхности кремния (100). На основе полученных зависимостей от толщины поверхностных энергий и рассогласования по параметру решетки между осаждаемым материалом и подложкой строится кинетическая модель для расчета параметров формируемых структур, обобщающая ранее использовавшуюся модель Мюллера–Керна. Рассматривается изменение свободной энергии при переходе атомов из смачивающего слоя в островок в таких системах. Равновесная и критическая толщины смачивающего слоя впервые рассчитываются в предположении зависимости поверхностных энергий и

рассогласования решеток от толщины осажденного материала. В этом приближении получен ряд неожиданных результатов, уточняющих традиционные термодинамические модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-72-00019.

Список использованных источников

1. Lozovoy K. A., Kokhanenko A. P., Voitsekhovskii A. V. Generalized Muller–Kern formula for equilibrium thickness of a wetting layer with respect to the dependence of the surface energy of island facets on the thickness of the 2D layer // Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, T. 17. C. 30052–30056.

2. Zhou Y., Lloyd A., Smith R., Lozovoy K. A., Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P. Molecular dynamics simulations of the growth of Ge on Si // Surface Science, 2020, T. 696. C 121594 (1–9).

GENERALIZED KINETIC MODEL OF GROWTH OF TWO- AND ZERO-DIMENSIONAL STRUCTURES OF SILICON AND GERMANIUM

Kirill Aleksandrovich Lozovoy, associate professor,
lka@sibmail.com, +7 (913) 115-13-79

Vladimir Vladislavovich Dirko, post-graduate student,
vovenmir@gmail.com, +7 (923) 436-50-44

¹*Tomsk State University, Tomsk*

Abstract: In this work, a comprehensive consideration of the influence of the dependence of elastic stresses and surface energies on the thickness of the deposited material on the epitaxial formation of two-dimensional layers and quantum dots by the Stranski–Krastanow mechanism is carried out.

Key words: two-dimensional materials, quantum dots, molecular beam epitaxy, silicon, germanium.

The reported study was funded by Russian Science Foundation according to the research project No. 19-72-00019.

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЙ РОСТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК CaSi_2

Кацюба Алексей Владимирович, ведущий инженер¹,
kasyuba@isp.nsc.ru, +7 (983) 126-84-15

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корреспондент
РАН, д.ф.-м.н., зав. Лабораторией¹, *dvurech@isp.nsc.ru*

Камаев Геннадий Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
kamaev@isp.nsc.ru

Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., с.н.с.¹,
volodin@isp.nsc.ru

Кириенко Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
victor@isp.nsc.ru

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Исследовалась кристаллическая структура пленок, формируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) CaSi_2 на $\text{Si}(111)$ при облучении электронами. Методом комбинационного рассеяния света (КРС) установлено, что на границе подложки кремния и эпитаксиально растущей пленки CaF_2 под воздействием электронного пучка происходит формирование пленки CaSi_2 .

Ключевые слова: CaF_2 , CaSi_2 , Si, молекулярно-лучевая эпитаксия, облучение электронами.

Введение

В последнее время среди силицидов, которые можно выращивать эпитаксиально на кремнии, CaSi_2 удостоился внимания, поскольку он имеет слоистую кристаллическую структуру, состоящую из гексагонального бислоя Si и тригонального монослоя Ca. Эта структурная особенность CaSi_2 представляет интерес, поскольку может применяться для синтеза новых 2D структур на основе кремния.

Целью данной работы является исследование воздействия электронного пучка с энергией 20 кэВ и плотностью тока 50 мкА/см² на плёнку CaF₂ в процессе эпитаксии на поверхности Si. Показано, что при росте CaF₂ на Si в области воздействия пучка электронов меняется морфология поверхности и химический состав пленки. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) установлено, что на границе подложки кремния и эпитаксиально растущей плёнки CaF₂ под воздействием электронного пучка происходит формирование плёнки CaSi₂. В таблице представлены частоты фононных мод полученные в настоящей работе, а также экспериментальные и теоретические данные для объёмного кристалла CaSi₂ пространственной группой R3m.[1]

Таблица 1 – Положения пиков КРС от участка поверхности в месте облучения электронами в эксперименте и данные теории

Модовая симметрия и участвующие атомы	Частоты фононных мод, см ⁻¹ (наш эксперимент)	Частоты фононных мод для CaSi ₂ , см ⁻¹ (эксперимент) [1]	Частоты фононных мод для CaSi ₂ , см ⁻¹ (теория) [1]
A1g(Si ₂)	346	349	343
A1g(Si)	388	393	371
Eg(Si)	418	427	429

Выводы

Как видно из представленных в таблице данных, положения пиков КРС от участка поверхности в месте падения пучка электронов хорошо согласуются как с теоретическими, так и экспериментальными данными, полученными в работе [1] для объёмного кристалла CaSi₂.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S.M. Castillo, Z. Tang, A.P. Litvinchuk, A. M. Guloy. Lattice Dynamics of the Rhombohedral Polymorphs of CaSi_2 . Inorg. Chem., 55, 10203–10207, 2016.

RADIATION-INDUCED GROWTH EPITAXIAL CaSi_2 FILM

Aleksey Vladimirovich Kacyuba¹, design engineer,
kacyuba@isp.nsc.ru, +7 (983)-126-84-15

Anatoly Vasilevich Dvurechenskii^{1,2}, Doc. phys.-math. sci.,
Professor, RAS Corresponding member, dvurech@isp.nsc.ru

Gennady Nikolaevich Kamaev^{1,2}, Ph.D, kamaev@isp.nsc.ru

Vladimir Alexeyevich Volodin^{1,2}, d.ph.-m.s., volodin@isp.nsc.ru

Viktor Vladimirovich Kirienko, senior scientist ISP SB RAS,
victor@isp.nsc.ru, +7 (913) 986-93-59

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract: In this work investigated crystal structure of films formed by molecular beam epitaxy (MBE) of CaSi_2 on Si (111), under electron irradiation by the method of Raman light scattering (RS), it was found that a CaSi_2 film is formed at the interface between the silicon substrate and the epitaxially growing CaF_2 film under the influence of an electron beam.

Key words: CaF_2 , CaSi_2 , Si, Molecular-Beam Epitaxy Electron-beam irradiation

Acknowledgments: the work was funded by Russian Scientific Foundation (grant 19-12-00070).

СТРУКТУРНО И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИ СОВЕРШЕННЫЕ ГЕТЕРОПАРЫ КРЕМНИЙ-САПФИР С HIGH-K МЕЖСЛОЙНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

*Антонов Валентин Андреевич, ведущий инженер-технолог¹,
ava@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-25-37*

*Попов Владимир Павлович, д.ф.-м.н., заведующий
лабораторией¹, popov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-25-37*

*Тарков Сергей Михайлович, ведущий инженер-электроник¹,
ser-tarkov@yandex.ru, +7 (383) 333-25-37*

*Тыщенко Ида Евгеньевна, д.ф.-м.н., доцент, ведущий
научный сотрудник¹, tys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-25-37*

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: в работе проведены исследования особенностей формирования межслойной гетерограницы кремний-сапфир, полученной методом прямого сращивания, как с промежуточным аморфным диэлектриком (оксиды Hf, Zr, Al; AlN), так и без него. Приводятся результаты структурных и электрофизических исследований указанных структур.

Ключевые слова: кремний, сапфир, гетеропары, high-k диэлектрики.

Содержание работы

Нами разработан новый, совместимый с DeleCut технологией КНИ, способ переноса слоя кремния на пластины сапфира и поликристаллического корунда, основанный на «горячем» соединении в вакууме поверхностей гетеропар водородно-ковалентными связями после ионно-плазменной активации.

Также было предложено перед сращиванием проводить нанесение слоёв high-k диэлектриков на рабочую поверхность кремниевой и (или) сапфировой подложек или формировать барьерный слой нитрида алюминия на сапфировой подложке

ионно-плазменными азотными обработками. Такой подход позволяет не только избежать формирования чувствительного к ионизирующему излучению и ухудшающего теплоотвод промежуточного слоя оксида кремния между кремнием и сапфиром, но и контролировать величину встроенного заряда на гетерогранице кремний-сапфир, возникающего при отжиге из-за окисления кремния.

Образцы структур КНС, полученные описанным способом, продемонстрировали нормальные сток-затворные характеристики псевдо-МДП-транзисторов на их основе с подвижностью, как в объёмном кремнии. Исследование поперечных срезов этих структур методом просвечивающей электронной микроскопии выявило структурное совершенство как перенесённых ультратонких плёнок кремния, так и гетерограницы с high-k диэлектриком.

Также выяснено, что высокотемпературные отжиги могут приводить к деградации транспортных свойств приборного слоя кремния.

Проводимости слоёв кремния-на-сапфире (КНС) со встроенными на гетерогранице тонкими диэлектрическими слоями исследованы методом псевдо-МОП транзистора [1]. К истоку и стоку прикладывалось тянущее напряжение, во всех случаях 10 В. На затвор подавалась развёртка до ± 6000 В со ступенчатым изменением напряжения 2-500 В/с. Расчёт методом Y -функций позволил установить значения подвижности носителей заряда, величин встроенного заряда и плотности состояний на гетерогранице. Наибольшие значения подвижности составляли 172 и 88 $\text{см}^2/(\text{Вс})$ для электронов и дырок, соответственно.

Работа поддержана проектом РФФИ № 19-42-543012.

Список использованных источников

1. Cristoloveanu S., Munteanu D., Liu M. A Review of the Pseudo-MOS Transistor in SOI Wafers: Operation, Parameter Extraction, and Applications // IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, #5 (47), p. 1018-1027

STRUCTURAL AND ELECTROPHYSICALLY PERFECT SILICON-SAPPHIRE HETEROPAIRS WITH A HIGH-K INTERLAYER DIELECTRIC

Valentin Andreevich Antonov, Leading Process Engineer, ISP SB RAS, Novosibirsk, ava@isp.nsc.ru, +7(383)333-25-37

Vladimir Pavlovich Popov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, ISP SB RAS, Novosibirsk, popov@isp.nsc.ru, +7(383)333-25-37

Sergey Mikhailovich Tarkov, Leading Electronic Engineer, ISP SB RAS, Novosibirsk, ser-tarkov@yandex.ru, +7(383)333-25-37

Ida Evgenievna Tyschenko, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Leading Researcher, ISP SB RAS, Novosibirsk, lys@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-25-37

Abstract: This work investigates the features of the formation of a silicon-sapphire interlayer heterointerface obtained by direct splicing, both with an intermediate amorphous dielectric (Hf, Zr, Al; AlN oxides) and without it. The results of structural and electrophysical studies of these structures are presented.

Key words: silicon, sapphire, heteropairs, high-k dielectrics.

Acknowledgments: this work was founded by the RFBR project No. 19-42-543012.

УДК 621.315.592:546.28

<https://doi.org/10.29003/m1589.Silicon-2020/166-170>

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ TSV СТРУКТУР

Долгополов Владимир Миронович, к.т.н., начальник лаборатории¹, step455@mail.ru, +7 (916) 874-97-22

Иракин Павел Александрович, ведущий инженер-технолог¹

irakinp@gmail.com, +7 (905) 548-46-19

*Варакин Виктор Михайлович, инженер-технолог 2
категории¹, VarakinVM@yandex.ru, +7 (901) 406-06-89*

¹ АО НИИТМ, г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Целью данной работы было усовершенствование существующей технологии глубокого анизотропного травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных TSV-структур, а именно поднятие селективности к маске и уменьшение шероховатости поверхностей.

Ключевые слова: глубокое травление кремния, «Bosch»-процесс, трехмерная сборка, 3D-сборка, гладкие стенки, низкая частота, высокая селективность.

Эксперимент

Отработка реактора и технологии для глубокого травления кремния проводились на базе конструктива установки ПЛАЗМА ТМ 200-02, разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения».

Разряд зажигается в реакционной камере (диаметром 400 мм). ИСР источником с помощью ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность до 3 кВт) через согласующее устройство. Для задания необходимого отрицательного смещения на охлаждаемый электрод-подложкодержатель от отдельного НЧ генератора (частота до 600 кГц, мощность до 300 Вт) через согласующее устройство подавалось смещение. Высоковакуумная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов обеспечивала предельный остаточный вакуум $1 \cdot 10^{-3}$ Па.

В данном эксперименте была изменена с высокой (13,56 МГц) на низкую (50-600 кГц) частота подачи отрицательного смещения на охлаждаемый электрод-подложкодержатель от отдельного генератора с целью уменьшения шероховатости

поверхностей травления и увеличения селективности травления к маске фоторезиста.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились на пластинах диаметром 200 мм. На пластинах предварительно были сформированы маски из оксида кремния толщиной 0,6 мкм и фоторезиста толщиной 3,15 мкм. На фоторезисте присутствуют отверстия диаметрами 8 и 12 мкм.

Основные характеристики процесса травления пластин диаметром 200 мм:

Средняя скорость травления кремния: $\approx 2,27 \text{ мкм/мин}$;

Равномерность травления, измеренная в стандартных 5 точках: $\approx \pm 1,75\%$;

Средняя селективность к маске: $\approx 32:1$;

Подтрав под маску: $\approx 236 - 570 \text{ нм}$;

Угол наклона профиля: $\approx 90 \pm 0,5^\circ$;

Величина «scallop» менее 40 нм;

Выводы

Получены значения неоднородности процесса травления в пределах $\approx \pm 1,75 \%$, глубокие отверстия с аспектным соотношением 7-12 и снижением шероховатости стенок со 130 нм до 40 нм, при скорости травления кремния $\approx 2,3 \text{ мкм/мин}$, а также увеличена селективность травления к маске с 20 до 32, что позволяет применять установку для промышленного производства.

Список использованных источников

1. «Исследование и разработка оборудования и технологии глубокого травления кремния», О.П. Гуцин и др. Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение, стр. 561-564.

2. «Ключевые процессы технологии микросистемной техники: плазмохимические процессы глубокого

анизотропного травления кремния», И.И. Амиров и др. Нанотехнологии и наноматериалы, №4(66) июль-август, стр. 8-13.

3. Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В., «Анизотропное травление глубоких канавок в кремнии во фторсодержащей плазме», 2008 год, стр. 653-656.

4. Oxford Plasma Technology, «Deep Si Etching at room temperature: the "Bosch" process». URL: http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_1.htm (дата обращения: 18.01.2020).

5. Oxford Plasma Technology, «High Rate Bosch Process by ICP Accelerator». URL: http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_acc.htm (дата обращения: 18.01.2020).

6. Samsung begins to produce 64GB DDR4 modules based on TSV chips. URL: <http://www.kitguru.net/components/memory/anton-shilov/samsung-begins-to-produce-64gb-ddr4-memory-modules-based-on-tsv-chips/> (дата обращения: 18.01.2020).

7. Micron's 320GB/sec Hybrid Memory Cube comes to market in 2013, threatens to finally kill DDR SDRAM. URL: <http://www.extremetech.com/computing/152465-microns-320gbsec-hybrid-memory-cube-comes-to-market-in-2013-threatens-to-finally-kill-ddr-sdram> (дата обращения: 18.01.2020).

ADVANCED PROCESS OF DEEP ANISOTROPIC ETCHING OF SILICON WITH A HIGH ASPECT RATIO FOR THE FORMATION OF TSV STRUCTURES

Vladimir Mironovich Dolgoplov: Ph.D.¹, head of the laboratory, step455@mail.ru

Pavel Aleksandrovich Irakin ¹, leading engineer-technologist, irakinp@gmail.com

Viktor Mikhailovich Varakin ¹, engineer-technologist, VarakinVM@yandex.ru, +7(901)-406-06-89

¹ Research institute of precision machine manufacturing (NIITM), Moscow, Zelenograd

Abstracts: The aim of this work was to improve the existing technology of deep anisotropic etching of silicon for its application in the manufacture of three-dimensional TSV structures, namely, to increase the selectivity to the mask and reduce the surface roughness.

Key words: deep silicon etching, “Bosch” process, three dimensional assembly, 3D-assembly, smooth walls, low frequency, high selectivity.

УДК 537.311.4

<https://doi.org/10.29003/m1590.Silicon-2020/170-172>

ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНЫХ КОНТАКТНЫХ ОКОН

Горохов Сергей Александрович, младший научный сотрудник, АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград, студент магистратуры, МФТИ, г. Долгопрудный, serega.goroxow@yandex.ru, +7 (925) 624-37-79

Аннотация: в работе исследуются возможные барьерные слои (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta) для формирования контактных окон к транзисторным структурам из меди.

Ключевые слова: контактное окно, барьерные слои, сопротивление, адгезия.

Введение

До сих пор для заполнения контактных окон к транзисторной структуре используется вольфрам, несмотря на его более высокое удельное сопротивление, чем у меди. Связано это с тем, что медь быстро диффундирует в кремнии и образует глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Поэтому переход к использованию меди для заполнения контактов требует разработки надежных барьерных слоев.

Описание работы

В работе были рассмотрены адгезионные свойства меди к различным материалам, на основании чего отобраны кандидаты, подходящие в качестве барьерных слоев для формирования контактных окон из меди. Был проведен эксперимент с нанесением выбранных слоев на пластину, последующим отжигом, и исследованием его влияния на поверхностное сопротивление (рис. 1) и шероховатость поверхности.



Рисунок 1 – Результаты поверхностных сопротивлений структур по отношению к аналогичным структурам на SiO_2

На основании результатов были отобраны многослойные структуры, обладающие лучшими адгезионными и барьерными свойствами (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta). После чего были изготовлены пластины с контактными окнами и исследовано влияние некоторых параметров процессов осаждения барьерных слоев и зародышевого слоя меди на заполнение контактных окон с большим аспектным отношением.

Список использованных источников

1. Способ изготовления медной многоуровневой металлизации СБИС: пат. 2420827 Рос. Федерация. № 2010100321/28 / Красников Г.Я., Валеев А.С., Шелепин Н.А., Гуцин О.П., Воротилов К.А., Васильев В.А., Аверкин С.Н.; заявл. 01.11.2010 ; опубл. 06.10.2011.

2. Горохов С.А. Расчет сопротивления элементов металлизации глубоко субмикронных СБИС // Международный форум «Микроэлектроника-2019»: сборник тезисов конф., пгт Гурзуф, 23-25 сентября 2019 г.

3. Khandelwal A., Wu F., Or J., Lai K., Gelatos J., Chang M. Evaluation of diffusion barriers for 32nm Cu contact metallization // Nanochip Technology Journal. 2006. Vol. 4(3). P. 2-5.

INVESTIGATION OF BARRIER LAYERS FOR THE FORMATION OF COPPER VIAS

Sergey Alexandrovich Gorokhov^{1,2}, junior researcher,
serega.goroxow@yandex.ru, +7 (925) 624-37-79

¹ *JSC MERI, Moscow, Zelenograd*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

Abstract: The paper investigates possible barrier layers (Ti/TiN/Ti, Ti/TiN/Ta, TaN/Ta) for forming vias to transistor structures made of copper.

Key words: vias, barrier layers, resistance, adhesion.

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ

Зюзин Сергей Сергеевич, научный сотрудник¹, аспирант²,
szyuzin@niime.ru, +7 (929) 595-79-45

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н.,
профессор, начальник управления РПТН¹, egornev@niime.ru,
+79039696097

Резванов Аскар Анварович, к.ф.-м.н., начальник
лаборатории¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98

Панин Виталий Вячеславович, к. т. н., начальник ОИиИЗ,
vita-panin@yandex.ru, +7 (929) 609-47-01

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

² МФТИ, г. Москва

³ АО НИИТМ, г. Москва, Зеленоград

Аннотация: в данной работе рассматриваются существующие методы атомно-слоевого осаждения плёнок кобальта, рутения и их оксидов для применения их в различных целях в области микроэлектроники.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, ALD, кобальт, рутений, RAM.

Введение

В данной работе представлен обзор работ по атомно-слоевому осаждению (ALD, atomic layer deposition) кобальта, рутения и их оксидов на кремниевые подложки. ALD используется для нанесения сверхтонких однородных слоёв различных структур (например, зародышевых слоёв металлов для их последующего нанесения), Особенное внимание учёных в последние годы привлекает использование ALD при 3D-интеграции, которая является одним из перспективных методов для уменьшения размеров СБИС [1].

Для этого требуются, в частности, высококачественные диффузионные барьеры и тонкие равномерные зародышевые слои металлов (меди и т.п.). В качестве зародышевого слоя для меди рассматривается кобальт из-за его высокой электропроводности и увеличения эффективного пространства для заполнения покрытия [2]. Традиционно, для нанесения диффузионных и зародышевых слоёв использовался метод PVD (physical vapor depositon, физическое газофазное осаждение), однако при достижении размеров 30нм и ниже этот метод малоэффективен, что позволяет изучить ALD как его замену.

Также атомно-слоевое осаждение всё более широко используется для производства различных видов памяти. Тонкие плёнки рутения являются потенциальными кандидатами для электродов в DRAM, FRAM и MRAM [3,4], для затворов в MOSFET благодаря относительно высокой работе выхода.

Выводы

Для нанесения плёнок кобальта, рутения и их в основном используются металлоорганические прекурсоры (например, $\text{Co}(\text{EtCp})_2$ и RuCp_2) в сочетании с плазмой аммиака или кислорода. Температурные окна процесса лежат в пределах от 150 до 400 °С, типичные скорости осаждения – $\sim 0.5 \text{ \AA}/\text{цикл}$. Требуется дальнейшее изучение процессов осаждения данных металлов и их оксидов с целью улучшения параметров плёнок, уменьшения температуры осаждения и возможного увеличения скорости осаждения.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.
2. Nogami T. et al. CVD Co and its application to Cu damascene interconnections //2010 IEEE International Interconnect Technology Conference. IEEE, 2010. С. 1-3.

3. Bandaru J., Sands T., Tsakalakos L. Simple Ru electrode scheme for ferroelectric (Pb, La)(Zr, Ti) O₃ capacitors directly on silicon //Journal of applied physics, 1998. T. 84, №. 2. C. 1121-1125.

4. Heinrich B. Magnetic nanostructures. From physical principles to spintronics //Canadian Journal of Physics, 2000. T. 78, №. 3. C. 161-199.

ATOMIC LAYER DEPOSITION OF THIN FILMS OF METAL AND THEIR OXIDES

*Sergey Sergeevich Zyuzin, research assistant¹, Ph.D. student²,
szyuzin@niime.ru, +7 (929) 595-79-45*

*Evgeniy Sergeevich Gornev, corresponding member of RAS,
Dr.Eng.Sc., professor, head of PTD management¹, egornev@niime.ru,
+7 (903) 969-60-97*

*Askar Anvarovich Rezvanov, Cand.Phys.Math.Sc., head of
laboratory¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98*

*Vitaliy Vyacheslavovich Panin, Cand.Tech.Sc., head of R&T
department³, vita-panin@yandex.ru, +7 (929) 609-47-01*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

³ JSC NIITM, Moscow, Zelenograd

Abstract: In this paper existing methods of atomic layer deposition of thin films of cobalt, ruthenium and their oxides are considered for their application for various purposes in the field of microelectronics.

Key words: atomic layer deposition, ALD, cobalt, ruthenium, RAM.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛА SPIN-ON-CARBON ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕТОДА САМОСОВМЕЩЕННОГО ДВОЙНОГО ПАТТЕРНИРОВАНИЯ

Тихонова Елена Дмитриевна, студент¹, младший научный сотрудник², yelena.tikhonova@phystech.edu, +7 (190) 447-02-96

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям, egornev@niime.ru

¹МФТИ, г. Москва

²АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: В данной работе были разобраны преимущества использования метода самосовмещенного двойного паттернирования совместно с фотолитографией в глубоком ультрафиолете, и выявлен многообещающий материал Spin-on-carbon в качестве слоя, на котором будет сформирован первоначальный рисунок структуры. Также был представлен метод обработки и защиты первоначального профиля линий регулярных структур с помощью использования принципа суперпозиции постоянного тока в камере с емкостно – связанной плазмой.

Ключевые слова: самосовмещенный метод двойного паттернирования (*SADP*), *Spin-on-carbon* (*SOC*), фотолитография в глубоком ультрафиолете (*EUV*).

Использование Spin-on-carbon в качестве материала для формирования мандрел в методе SADP

В настоящее время продолжается движение в сторону уменьшения критических размеров транзисторов. В связи с этим растет интерес к фотолитографии в глубоком ультрафиолете (*Extreme ultraviolet lithography, EUV*), поскольку ее использование помогает значительно улучшить разрешение

технологического процесса. Однако при переходе к технологиям 5 нм и менее возможностей только лишь *EUV* - литографии для обеспечения требуемого разрешения рисунка оказывается недостаточно. Возникает необходимость применения метода самосовмещенного двойного паттернирования (*Self-aligned double patterning, SADP*) совместно с экстремальной ультрафиолетовой литографией [1].

Однако совместное использование данных технологий приводит к увеличению себестоимости пластины. Чтобы скомпенсировать эту проблему можно использовать новые материалы, например, *Spin – on – carbon (SOC)* в качестве слоя, на котором будут сформированы первоначальные линии, мандрелы. Данный материал очень многообещающ по сравнению со своими аналогами в силу своей дешевизны и высокой селективности по отношению к спейсеру (материалу из оксида или нитрида кремния).

Однако и при использовании данного материала могут возникать проблемы. При осаждении спейсера первичный рисунок может быть искажен, поскольку обычно он наносится методом плазмохимического осаждения, а кислородосодержащая плазма способна поглощать углерод и таким образом менять форму первоначальных линий.

Использование принципа суперпозиции тока в камере с емкостно – связанной плазмой для улучшения разрешения

Для того, что *SOC* не приводил к дальнейшим дефектам, необходимо разработать метод обработки первоначального профиля линий. В данной работе будет подробно исследован метод защиты данного профиля с помощью использования принципа суперпозиции постоянного тока в камере с емкостно-связанной плазмой [2]. С помощью данного метода образуется тонкая пленка, которая выступает в качестве защитного слоя во время нанесения спейсера, как показано на рисунке 1.

Помимо этого, в данной работе было выяснено, что такая обработка благоприятно повлияет на профиль и

шероховатость линий. Таким образом, было показано, что метод сохранения первоначального профиля линий с помощью использования принципа суперпозиции постоянного тока в камере с емкостно – связанной плазмой помогает улучшить SADP.

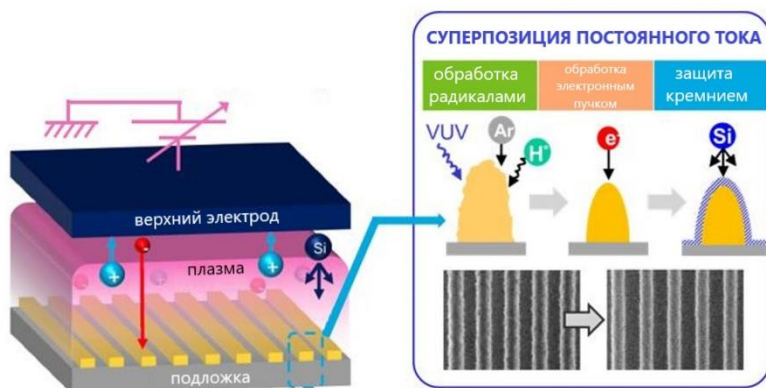


Рисунок 1 – Схематическое изображения метода суперпозиции постоянного тока при облучении плазмой [2]

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Гущин О.П., Литаврин М.В., Горнев Е.С. Некоторые аспекты самосовмещенного паттернирования в иммерсионной литографии // Электронная Техника. Серия 3: Микроэлектроника. 201. С. 42-53.

2. Caitlin Philippi, Sophie Thibaut, Andrew Metz, Akiteru Ko, Angélique Raley, Peter Biolsi Improvement of self-aligned dual patterning using spin-on carbon mandrel // Proc. SPIE, Advanced Etch Technology for Nanopatterning IX, 113290T, 03.04.20.

IMPROVEMENT OF SELF-ALIGNED DOUBLE PATTERNING USING SPIN-ON-CARBON MATERIAL

Elena Dmitrievna Tikhonova, student¹, junior research scientist²,
yelena.tikhonova@phystech.edu, +7 (910) 447-02-96

Evgeny Sergeevich Gornev, RAS corresponding member, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Deputy Head of the Priority Technological

¹*MIPT, Moscow*

²*AO "NIIME", Moscow, Zelenograd*

Abstract: In this paper the advantages of using self-aligned double patterning in conjunction with extreme ultraviolet photolithography were analyzed, and a promising spin-on-carbon material used as the layer for the original pattern of the structure to be formed was identified. In addition, a method to treat and protect the shape of the initial profile of regular structure lines by using a direct current superposition on a capacitively-coupled plasma chamber was presented.

Key words: self-aligned double patterning (SADP), spin-on-carbon (SOC), extreme ultraviolet lithography (EUV).

УДК 537.533.9

<https://doi.org/10.29003/m1593.Silicon-2020/179-182>

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТОВ
ЭЛЕКТРОННОГО РЕЗИСТА HSQ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ
ПРОЯВЛЕНИЯ**

*Татаринцев Андрей Андреевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
tatarintsev@ftian.ru*

*Шишлянников Антон Валерьевич, аспирант², научный
сотрудник ОРТП³, doublepandls@gmail.com, +7 (967) 038-74-20*

*Руденко Константин Васильевич, д.ф.-м.н., зам. директора
по научной работе¹, rudenko@ftian.ru*

*Рогожин Александр Евгеньевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
alexander.rogozhin@gmail.com*

*Иешкин Алексей Евгеньевич, к.ф.-м.н., с.н.с.⁴,
ieshkin@physics.msu.ru*

¹*ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, г. Москва*

²МФТИ, г. Долгопрудный

³АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

⁴МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация: В работе было проведено исследование зависимости значения контраста негативного электронного резиста на основе водород-силсеквиоксана в процессе проявления в водном щелочно-солевом растворе NaOH-NaCl при различных температурах, а также было проведено аналогичное исследование для широко распространенного метода проявления в 25% растворе ТМАН.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография, негативный электронный резист, HSQ, резистивная маска, контрастность резиста, щелочно-солевое проявление, температура проявления.

Введение

Электронно-лучевая литография как исследовательский инструмент позволяет создавать структуры приборов нанoeлектроники вплоть до суб 10-нм критических размеров. Однако для достижения подобного разрешения необходим учет дозовых характеристик используемого резиста, таких как чувствительность – минимально необходимая доза экспонирования, и контрастность, которая характеризует крутизну графика дозовой зависимости. С использованием метода проявления резиста HSQ в щелочно-солевом растворе, иначе называемого высококонтрастным методом, удалось получить линии шириной до 10 нм с полушагом 30 нм [1], а также линии шириной до 5 нм [2].

Основная часть

В данной работе было проведено исследование контраста электронного резиста HSQ от температуры проявления. Проявитель помещался в термостат для задания необходимой температуры. После достижения теплового равновесия осуществлялся процесс проявления проэкспонированной пластины в водном растворе 1% NaOH и 4% NaCl. Время

проявления составляло 4 мин. Остаточная толщина резиста в зависимости от дозы облучения для конкретной температуры проявления исследовалась при помощи атомно-силового микроскопа. На основе полученных результатов были построены кривые контраста, которые свидетельствуют, что для щелочно-солевого проявления при повышении температуры проявителя от +22 °С до +40 °С наблюдается повышение контраста на 45%. Увеличение контраста было обнаружено также при понижении температуры проявления до +10 °С – на 27% по сравнению с температурой проявления +22 °С. Таким образом установлено немонотонное изменение контраста проявления резиста HSQ от температуры проявления. При проявлении в ТМАН значение контраста было ниже, чем при щелочно-солевом проявлении.

Выводы

Температура проявления электронного резиста HSQ является дополнительным фактором, позволяющим управлять контрастом резиста. Наблюдалось максимальное увеличение значение контраста на 45% относительно нормальной температуры проявления +22 С. При этом установлена немонотонная зависимость величины контраста от температуры проявления. Перспективным оказывается использование пониженных температур проявления, что требует проведения дополнительных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 19-37-90083.

Список использованных источников

1. Yang J. K. W., Berggren K.K. Using high-contrast salty development of hydrogen silsesquioxane for sub-10-nm 10-nm half-pitch lithography. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2007. V. 25. № 6. P. 2025-2029.
2. Yang J. K. W., Cord B., Duan H., Berggren K.K., Klingfus J., Nam S.-W., Kim K.-B., Rooks M.J. Understanding of hydrogen silsesquioxane electron resist for sub-5-nm-half-pitch lithography.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CONTRASTS OF THE ELECTRON HSQ RESIST AT DIFFERENT METHODS OF DEVELOPMENT

*Andrey Andreevich Tatarintsev, Ph.D., senior researcher¹,
tatarintsev@ftian.ru*

*Anton Valerievich Shishlyannikov, Ph.D. student², researcher³,
doublepands@gmail.com, +7 (967) 038-74-20*

*Konstantin Vasilievich Rudenko, doctor of science, Deputy
Director for Research¹, rudenko@ftian.ru*

*Alexander Evgenievich Rogozhin, Ph.D., senior researcher¹,
alexander.rogozhin@gmail.com*

*Alexey Evgenievich Yeshkin, Ph.D., senior researcher⁴,
ieshkin@physics.msu.ru*

*¹ Valiev Institute of Physics and Technology, Russian Academy of
Sciences, Moscow, 117218 Russia*

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

³ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Abstract: In this work a study of the dependence of the contrast value of a negative electron resist based on hydrogen-silsesquioxane was carried out in the process of development in an aqueous alkaline-salt solution of NaOH-NaCl at different temperatures, and a similar study was carried out for a widespread method of development in a 25% TMAH solution.

Key words: electron beam lithography, negative electron resist, HSQ, resistive mask, resist contrast, alkaline salt development, development temperature.

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-37-90083).

ЗАВИСИМОСТЬ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ТОЛЩИНЫ ОСАЖДЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ РОСТЕ ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИИ

Коханенко Андрей Павлович, доктор физико-математических наук, профессор¹, kokh@mail.tsu.ru, +7 (960) 974-56-23

Дирко Владимир Владиславович, аспирант¹, voventmir@gmail.com, +7 (923) 436-50-44

Лозовой Кирилл Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент¹, lka@sibmail.com, +7 (913) 115-13-79

¹Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация: В данной работе методом дифракции быстрых электронов определены зависимости величины упругих напряжений от толщины осажденного материала при росте квантовых точек германия на кремнии. Показано, что относительная величина рассогласования решеток между осаждаемым материалом и подложкой в этой системе достигает величины в 12,5 %.

Ключевые слова: двумерные материалы, квантовые точки, молекулярно-лучевая эпитаксия, кремний, германий.

Введение

Гетероструктуры с квантовыми точками получили широкое применение в наноэлектронике и нанофотонике для создания фотодетекторов, солнечных элементов и светоизлучающих устройств [1]. Основным методом создания наноструктур с двумерными слоями и квантовыми точками является молекулярно-лучевая эпитаксия. Самоорганизация квантовых точек возможна только в том случае, когда имеется рассогласование по постоянной решетки между осаждаемым материалом и подложкой. В этом случае квантовые точки

растут по так называемому механизму Странского–Крастанова. Этот механизм заключается в том, что сначала реализуется послойный рост одного материала на поверхности другого, а затем, когда толщина осаждаемого материала достигнет определенной критической толщины, происходит переход от двумерного к трехмерному росту.

Результаты и их обсуждение

В данной работе методом дифракции быстрых электронов определены зависимости величины упругих напряжений от толщины осажденного материала при росте квантовых точек германия на кремнии. Синтез проводился в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100», оснащенной двумя электронно-лучевыми испарителями для кремния и германия. Аналитическая часть камеры состоит из масс-спектрометра, кварцевого измерителя толщины, инфракрасного пирометра и дифрактометра быстрых электронов с энергией 28 кВ. Синтез проводился при температуре подложки $T = 450^\circ\text{C}$, скорости роста германия $0,03 \text{ МС/с}$ и уровне давления остаточных газов в камере эпитаксии $1 \cdot 10^{-9}$ торр. В процессе напыления германия до толщины в 2 монослоя вид картины качественно не изменяется, что соответствует образованию смачивающего слоя, повторяющего структуру подложки. Затем происходит резкий рост эффективная величина рассогласования решеток до значения 12,5 %. Этот рост соответствует накоплению упругих напряжений в слое германия. Затем начинается процесс интенсивного формирования островков, что проявляется в виде резкого уменьшения рассогласования и выхода его на постоянное значение около 4 %, характерного для ненапряженных германия и кремния.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Izhnin I. I., Fitsych O. I., Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Lozovoy K. A., Dirko V. V. Nanostructures with Ge-Si quantum dots for infrared photodetectors // Opto-Electronics Review, 2018, T. 26. С. 195–200.

DEPENDENCE OF ELASTIC STRESSES ON THE THICKNESS OF THE DEPOSITED MATERIAL FOR GERMANIUM GROWTH ON SILICON

Andrey Pavlovich Kokhanenko, professor, kokh@mail.tsu.ru, +7 (960) 974-56-23

Vladimir Vladislavovich Dirko, post-graduate student, vovenmir@gmail.com, +7 (923) 436-50-44

Kirill Aleksandrovich Lozovoy, associate professor, lka@sibmail.com, +7 (913) 115-13-79

¹Tomsk State University, Tomsk

Abstract: In this work, the dependences of the elastic stresses on the thickness of the deposited material during the growth of germanium quantum dots on silicon have been determined by the fast electron diffraction method. It is shown that the relative value of the lattice mismatch between the deposited material and the substrate in this system reaches 12.5%.

Key words: two-dimensional materials, quantum dots, molecular beam epitaxy, silicon, germanium.

The reported study was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state task No. 0721-2020-0048).

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПЛЕНОК CaSi_2 ,
ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОМ
ЭПИТАКСИАЛЬНОМ РОСТЕ CaF_2 НА Si**

Кацюба Алексей Владимирович, ведущий инженер,
kasyuba@isp.nsc.ru, +7 (983) 126-84-15

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корреспондент
РАН, д.ф.-м.н., зав. Лабораторией¹, dvurech@isp.nsc.ru

Камаев Геннадий Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
kamaev@isp.nsc.ru

Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., с.н.с.¹,
volodin@isp.nsc.ru

Кириенко Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
victor@isp.nsc.ru

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Исследовалась кристаллическая структура пленок, формируемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) CaSi_2 на $\text{Si}(111)$ при облучении электронами [1]. Методом комбинационного рассеяния света (КРС) установлено, что с увеличением толщины пленки CaF_2 происходит структурный переход в пленке CaSi_2 пространственной группы $R\bar{3}m$ от 3-х слойного к 6-ти слойному трансляционному периоду кристаллической решетки (от $3R$ к $6R$).

Ключевые слова: CaF_2 , CaSi_2 , Si, фазовые переходы облучение электронами.

Введение

В работе [1] нами было показано, что на подложке $\text{Si}(111)$ в процессе эпитаксиального роста методом МЛЭ CaF_2 в условиях воздействия электронного пучка с энергией 20 кэВ формируется пленка CaSi_2 . Известно несколько родственных полиморфов CaSi_2 : пространственной группы $R\bar{3}m$,

пространственной группы $R\bar{3}m$ и пространственной группы $R3m$ с 3-х слойным и 6-ти слойным трансляционным периодом кристаллической решетки $3R$ и $6R$ соответственно[2].

Целью данной работы является исследование кристаллической структуры формирующейся пленки $CaSi_2$ под воздействием электронного пучка на границе подложки кремния и эпитаксиальной пленки CaF_2 .

Для исследования, методом МЛЭ выращивались образцы с разной толщиной пленки CaF_2 при температуре $550^\circ C$. Далее образцы облучались в течение 4 минут сфокусированным электронным пучком, который приводит к образованию $CaSi_2$ (подробная методика приведена в работе [1]). Затем методом КРС снимались спектры в облучённой электронами области.

Наличие характерных пиков на всех образцах в областях 345 см^{-1} , 385 см^{-1} и 414 см^{-1} указывает на формирование $CaSi_2$ пространственной группы $R\bar{3}m$. В отличие от $3R$ $CaSi_2$ спектр КРС полиморфа $6R$ имеет дополнительные активные частоты фононных мод, связанные с колебанием атомов Ca , в области 205 см^{-1} , благодаря понижению кристаллографической симметрии Ca [2]. Наличие этого пика наблюдалось на образцах с толщиной облучаемой пленки CaF_2 более 20 нм.

Выводы

Обнаружено, что облучение пучком электронов с энергией 20 кэВ при температуре $550^\circ C$ структуры CaF_2/Si с эпитаксиальной пленкой CaF_2 выращенной методом МЛЭ, приводит к формированию на границе раздела CaF_2/Si пленок $CaSi_2$ пространственной группы $R\bar{3}m$. Установлено, что при увеличении толщины пленки CaF_2 в пленке $CaSi_2$ происходит структурный переход от 3-х слойного к 6-ти слойному трансляционному периоду кристаллической решетки (от $3R$ к $6R$).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00028.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A.V. Kacyuba, A.V. Dvurechenskii, G.N. Kamaev, V.A. Volodin, A.Y. Krupin. Radiation-Induced epitaxial CaSi_2 film growth at the molecular-beam epitaxy of CaF_2 on Si. *Materials Letters*. V. 268, p.127554, 2020.
2. S.M. Castillo, Z. Tang, A.P. Litvinchuk, A. M. Guloy. Lattice Dynamics of the Rhombohedral Polymorphs of CaSi_2 . *Inorg. Chem.*, 55,10203–10207, 2016.

CRYSTAL STRUCTURE OF CaSi_2 FILMS FORMED UPON RADIATION-STIMULATED EPITAXIAL GROWTH OF CaF_2 ON SI

Aleksey Vladimirovich Kacyuba¹, design engineer,
kacyuba@isp.nsc.ru, +7 (983)-126-84-15

Anatoly Vasilevich Dvurechenskii^{1,2}, Doc. phys.-math. sci.,
Professor, RAS Corresponding member, dvurech@isp.nsc.ru

Gennady Nikolaevich Kamaev^{1,2}, Ph.D, kamaev@isp.nsc.ru

Vladimir Alexeyevich Volodin^{1,2}, d.ph.-m.s, volodin@isp.nsc.ru

Viktor Vladimirovich Kirienko, senior scientist ISP SB RAS,
victor@isp.nsc.ru, +7 (913) 986-93-59

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

² Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract: The crystal structure of films formed by molecular beam epitaxy (MBE) CaSi_2 on Si (111) under electron irradiation was investigated [1]. It was found by the method of Raman scattering (RS) that with an increase in the thickness of the CaF_2 film, a structural transition occurs in the CaSi_2 film of the space group $R\bar{3}m$ from the 3-layer to 6-layer translational period of the crystal lattice (from 3R to 6R).

Key words: CaF_2 , CaSi_2 , Si, phase transitions, Molecular-Beam Epitaxy, electron-beam irradiation

Acknowledgments: the work was funded by RFBR and the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" (project No. 20-21-00028).

Секция 4 «Физика кремниевых квантово-размерных структур для нано- и оптоэлектроники, фотоники, спинтроники и логических элементов для квантовых вычислений»

УДК 538.958

<https://doi.org/10.29003/m1596.Silicon-2020/189-192>

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ДЛЯ
ЦЕЛЕЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Терещенко Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
tan@issp.ac.ru, +7 (496) 522-46-85

Королев Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., н.с.²,
dmkoroлев@phys.unn.ru

Хорошева Мария Анатольевна, к.ф.-м.н., н.с.¹, khor@issp.ac.ru,
Никольская Алена Андреевна, м.н.с.²,
alena.nikolskaya.1994@mail.ru

Михайлов Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., зав. лаб.²,
mian@nifti.unn.ru

Белов Алексей Иванович, к.ф.-м.н., н.с.², belov@nifti.unn.ru
Тетельбаум Давид Исаакович, д.ф.-м.н., профессор, в.н.с.²,
tetelbaum@phys.unn.ru

¹ИФТТ РАН, г. Черноголовка

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Аннотация: рассматриваются новые подходы к увеличению эффективности дислокационного излучения в кремнии, перспективного для использования в целях оптоэлектроники. Обсуждается аномальная температурная зависимость люминесценции дислокационных структур в кремнии, сформированных путем имплантации ионов Si⁺ и модифицированных ионным легированием бором с различными дозами.

Ключевые слова: кремний, дислокационная люминесценция, оптоэлектроника, имплантация.

Введение

Создание эффективного светодиода на основе кремния является одной из нерешенных проблем современной оптоэлектроники. Одним из возможных решений этой проблемы является использование излучательной рекомбинации на глубоких энергетических состояниях, связанных с дислокациями в кремнии. Среди различных методов генерации дислокаций особое место занимает создание центров дислокационной люминесценции (ДЛ) методом имплантации ионов кремния с последующей термообработкой. Наряду с тем, что этот метод является наиболее совместимым со CMOS технологией, он позволяет проводить модификацию параметров центров ДЛ в широких пределах с помощью изменения режимов облучения, дополнительного ионного легирования и термообработки. Однако, одним из главных препятствий к практическому использованию ДЛ является ее сильное температурное гашение.

Результаты

В данной работе показано, что процедура алюминиевого геттерирования (AlG), как и аналогичные геттерированию термообработки исследуемых дислокационных структур радикально влияют на температурную зависимость интенсивности линии D1 ДЛ [1, 2]. В образцах, подвергнутых AlG, наблюдается кратное возрастание интенсивности линии D1 в температурном интервале 6 - 100 K независимо от концентрации бора. Термообработка образцов, идентичная AlG, приводит к возникновению интенсивных максимумов на температурной зависимости, положение которых коррелирует с содержанием имплантированного бора. Установлено, что в обоих случаях примесь бора играет ключевую роль в возникновении наблюдаемых особенностей температурной зависимости ДЛ. Благодаря обнаруженному аномальному

поведению люминесценции стало возможным получать технологичным способом светоизлучающие структуры, в которых интенсивность линии D1 при возрастании температуры от 6К до 270К падает всего в несколько раз.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (грант №17-02-01070), а также частично в рамках государственного задания ИФТТ РАН. Д.С. Королев благодарит за поддержку Совет по грантам Президента РФ (стипендия СП-1147.2018.3).

Список использованных источников

1. Nikolskaya, D. Korolev, A. Tereshchenko, V. Pavlenkov, S. Nagornykh, A. Belov, V. Vasiliev, A. Mikhaylov, D. Tetelbaum Temperature dependence of dislocation-related photoluminescence (D1) of self-implanted silicon subjected to additional boron implantation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Vol. 472. – P. 32–35. – DOI:10.1016/j.nimb.2020.03.032

2. Tereshchenko, D. Korolev, M. Khorosheva, A. Mikhaylov, A. Belov, A. Nikolskaya, D. Tetelbaum The Effects of Aluminum Gettering and Thermal Treatments on the Light-Emitting Properties of Dislocation Structures in Self-Implanted Silicon Subjected to Boron Ion Doping // Physica Status Solidi A. – 2019. – Vol. 216, Iss. 17. – P. 1900323. – DOI:10.1002/pssa.201900323

NEW APPROACHES TO INCREASING THE EFFICIENCY OF LIGHT-EMITTING STRUCTURES BASED ON SILICON FOR OPTOELECTRONICS PURPOSES

Alexey Nikolaevich Tereshchenko¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), senior researcher, tan@issp.ac.ru, +7 (496) 522-46-85

Dmitriy Sergeevich Korolev², Ph.D. (Physics and Mathematics), researcher, dmkorolev@phys.unn.ru

Maria Anatolievna Khorosheva¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), researcher, khor@issp.ac.ru,

Alena Andreevna Nikolskaya², junior researcher, alena.nikolskaya.1994@mail.ru

*Alexey Nikolaevich Mikhaylov*², Ph.D. (Physics and Mathematics),
head of laboratory, mian@nifti.unn.ru

*Alexey Ivanovich Belov*², Ph.D. (Physics and Mathematics),
researcher, belov@nifti.unn.ru

*David Isaakovich Tetelbaum*², Dr. S., Professor, Leading Researcher,
tetelbaum@phys.unn.ru

¹ISSP RAS, Chernogolovka

²Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni
Novgorod

Abstract: new approaches to increasing the efficiency of dislocation radiation in silicon, which is promising for use in optoelectronics, are considered. The anomalous temperature dependence of the luminescence of dislocation structures in silicon formed by implantation of Si⁺ ions and modified by ion doping with boron at different doses is discussed.

Key words: silicon, dislocation related luminescence, optoelectronics, implantation.

Acknowledgments: the research was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project №17-02-01070), in part by the ISSP RAS- Russian Government contracts, and the fellowship of the President of the Russian Federation (SP-1147.2018.3).

УДК 538.97

<https://doi.org/10.29003/m1597.Silicon-2020/192-195>

УСИЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ GE/SI КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

*Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корр. РАН, д. ф.-
м.н., проф., зав. лабораторией¹, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-
24-66*

*Зиновьев Владимир Анатольевич, к. ф.-м. н., с.н.с¹,
zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24*

*Зиновьева Айгуль Фанизовна, к.ф.-м.н., с.н.с¹, aigul@isp.nsc.ru,
+7 (383) 333-26-24*

*Ненашев Алексей Владимирович, к. ф.-м. н., с.н.с¹,
nenashev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24*

*Кацюба Алексей Владимирович, м.н.с¹, kacyuba@isp.nsc.ru,
+7 (383) 333-26-24*

*Мудрый Александр Викторович, к. ф.-м. н., г.н.с²,
mudryi@physics.by, +37517284-12-29*

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск

Аннотация: Получено многократное усиление фотолуминесценции (ФЛ) Ge/Si квантовых точек (КТ) в структурах с наночастицами серебра. Эффект усиления объяснен увеличением скорости излучательной рекомбинации носителей заряда, локализованных на КТ.

Ключевые слова: Плазмоника, квантовые точки, фотолуминесценция.

Введение

В последнее время наблюдается прогресс на пути создания эффективных излучателей на базе материалов IV группы [1]. Повышенное внимание привлекают SiGe наноструктуры с КТ, в которых из-за неопределенности по импульсу ослабляется запрет на прямые оптические переходы. Одним из подходов к увеличению квантовой эффективности излучателей на основе SiGe КТ является использование принципов плазмоники. В данной работе представлены результаты по исследованию ФЛ от SiGe КТ в гибридных структурах с наночастицами серебра.

Результаты и обсуждение

Структуры созданы в процессе самоорганизации при эпитаксии на подложках Si(001) со встроенными под поверхность SiGe КТ. Измерения ФЛ демонстрируют

многократное увеличение интенсивности ФЛ от SiGe КТ (QD на рис. 1), при этом сигнал от смачивающего слоя (WL на рис. 1) не усиливается. Последнее свидетельствует о том, что эффект происходит за счёт увеличения скорости излучательной рекомбинации электронов и дырок, локализованных на КТ. Расчеты показывают, что коэффициент усиления может быть увеличен в несколько раз за счет оптимизации параметров металлических наночастиц. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070).

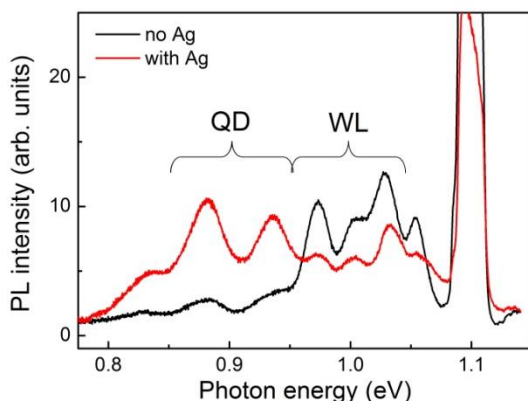


Рисунок 1 – Спектры ФЛ, полученные при 10 К.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070).

Список использованных источников

1. Brehm M., Grydlik M. Site-controlled and advanced epitaxial Ge/Si quantum dots: fabrication, properties, and applications // Nanotechnology, 2017, V. 28, P. 392001.

ENHANCEMENT OF PHOTOLUMINESCENCE OF GE / SI QUANTUM DOTS IN EPITAXIAL STRUCTURES WITH SILVER NANOPARTICLES

Anatoly Vasilievich Dvurechenskii ¹, Corresponding Member of RAS, Doctor of Science, Professor, Head of Laboratory, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-66

Vladimir Anatolievich Zinovyev ¹, Ph.D., Senior Researcher, zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aigul Fanizovna Zinovieva ¹, Ph.D., Senior Researcher, zinovieva_71@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aleksey Vladimirovich Nenashev ¹, Ph.D., Senior Researcher, nenashev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aleksey Vladimirovich Kacyuba ¹, Junior Researcher, kacyuba@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aleksandr Victorovich Mudryi ², Ph.D., Senior Researcher, mudryi@physics.by, +37517 284-12-29

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk

²Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, Minsk

Abstract: A multiple enhancement of the photoluminescence (PL) of Ge/Si quantum dots (QDs) in structures with silver nanoparticles was obtained. The amplification effect is explained by an increase in the rate of radiative recombination of charge carriers localized at QDs.

Key words: plasmonics, quantum dots, photoluminescence.

Acknowledgments: This work is funded by the Russian Science Foundation (grant 19-12-00070).

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Зиновьев Владимир Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Смагина Жанна Викторовна, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
smagina@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Зиновьева Айгуль Фанизовна, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
zinovieva_71@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корр. РАН, д.ф.-
м.н., профессор, зав. лаборатории¹, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383)
333-2624

Мудрый Александр Викторович, к.ф.-м.н., г.н.с.²,
mudryi@physics.by, +37517 284-12-29

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск

Аннотация: В работе приведены результаты сравнительного исследования фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных структур Ge/Si с квантовыми точками (КТ), созданными с применением ионного облучения, и структур с нанокластерами Ge, сформированными в результате имплантации ионов Ge в кремний и последующего отжига.

Ключевые слова: эпитаксия, квантовые точки, ионное облучение, германий, кремний, фотолюминесценция.

Введение

Результаты недавних исследований показывают, что применение ионного облучения в процессе эпитаксиального роста приводит к многократному усилению ФЛ GeSi КТ [1]. До сих пор не ясен механизм наблюдаемого эффекта. Было высказано предположение, что усиление происходит за счёт

введения глубоких центров, через которые идет процесс излучательной рекомбинации. Для определения механизма усиления ФЛ в настоящей работе проведен сравнительный анализ спектров ФЛ от структур с ионно-модифицированными GeSi КТ и структур с нанокластерами Ge, полученными в результате имплантации Ge в Si и последующего термического отжига.

Результаты и обсуждение

Структуры с нанокластерами Ge были получены в результате облучения подложек Si(001) ионами Ge⁺ с энергией 80 кэВ и дозой ~ 10¹⁵ см⁻² и последующего отжига в диапазоне 600° – 900°С. На рис. 1 приведены спектры ФЛ облученных образцов, снятые при 78 К. Наблюдаются широкие полосы G1 ~ 0.94 эВ и G2 ~ 0.78 эВ, связанные с дефектами структуры, включающими в себя имплантированные атомы Ge. Положение этих полос практически совпадает с положением полос ФЛ от эпитаксиальных структур с GeSi КТ, полученными с использованием ионного облучения, что позволяет сделать вывод о подобии механизмов излучательной рекомбинации в обоих типах структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-52-00016) и БРФФИ (грант №Ф20Р-082).

Список использованных источников

1. Grydlik M. et al. Lasing from glassy Ge quantum dots in crystalline Si. // ACS photonics 2016, v. 3, p. 298-303.

LIGHT EMMITTING RECOMBINATION IN HETEROSTRUCTURES GE/SI WITH QUANTUM DOTS FORMED WITH USING ION BEAM RADIATION

Vladimir Anatolievich Zinovyev¹, Ph.D., Senior Researcher, zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Zhanna Victorovna Smagina¹, Ph.D., Senior Researcher, smagina@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aigul Fanizovna Zinovieva ¹, Ph.D., Senior Researcher,
zinovieva_71@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

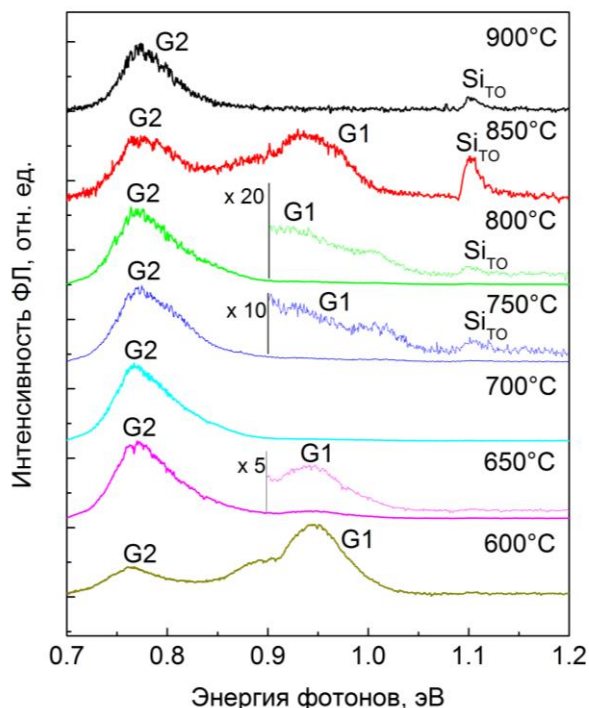


Рисунок 1 – Спектры ФЛ образцов кремния, облученных ионами Ge⁺ и отожжённых при температурах 600°–900°C

Anatoly Vasilievich Dvurechenskii ¹, Corresponding Member of RAS, Doctor of Science, Professor, Head of Laboratory,
dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-66

Aleksandr Victorovich Mudryi ², Ph.D., Senior Researcher,
mudryi@physics.by, +37517 284-12-29

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk

²Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
Minsk

Abstract: This work devotes to a comparative study of the photoluminescence of Ge/Si epitaxial structures with quantum dots created with using ion beam irradiation and structures with Ge nanoclusters formed as a result of the implantation of Ge ions into silicon and subsequent annealing.

Key words: epitaxy, quantum dots, ion irradiation, germanium, silicon, photoluminescence.

Acknowledgments: this work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 20-52-00016) and the BRFFR (Grant No. F20R-082).

УДК 538.9

<https://doi.org/10.29003/m1599.Silicon-2020/199-202>

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ИОННО- СИНТЕЗИРОВАННЫХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ ФАЗУ 9R-SI

Королев Дмитрий Сергеевич, к. ф.-м. н., н. с.^{1,2},
dmkorolev@phys.unn.ru, +7 (920) 252-73-52

Никольская Алена Андреевна, м. н. с.², аспирант²,
nikolskaya@nifti.unn.ru

Михайлов Алексей Николаевич, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией², mian@nifti.unn.ru

Белов Алексей Иванович, к. ф.-м. н., н. с.², belov@nifti.unn.ru

Конаков Антон Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент²,
konakov_anton@mail.ru

Муртазин Ренат Ильдарович, студент²,
renat.murtazin96@mail.ru

Павлов Дмитрий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой², pavlov@unn.ru

Тетельбаум Давид Исаакович, д. ф.-м. н., профессор, в. н. с.²,
tetelbaum@phys.unn.ru

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Аннотация: Приводятся результаты по исследованию фотолюминесценции ионно-синтезированных образцов, содержащих фазу 9R-Si, излучающих на длине волны ~ 1235 нм. Обсуждаются структурные особенности полученных наноструктур и механизм наблюдаемой люминесценции.

Ключевые слова: кремний, фаза 9R-Si, ионно-лучевой синтез, люминесценция.

Введение

Переход от электрических к оптическим системам передачи данных в интегральных схемах, изготовленных по кремниевой технологии, является весьма перспективным для улучшения производительности современных нанoeлектронных устройств [1]. Одним из факторов, ограничивающих развитие кремниевой оптоэлектроники, является отсутствие эффективных источников излучения на основе кремния. Возможным способом решения этой проблемы может быть создание включений другой фазы кремния, обладающей интенсивной люминесценцией. В настоящей работе приводятся данные по исследованию структуры и фотолюминесцентных свойств включений фазы 9R-Si, синтезированных при облучении образцов SiO_2/Si тяжелыми ионами с последующей термообработкой.

Результаты

Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) образцов SiO_2/Si , облученных ионами Kr^+ и отожженных при 800°C , выявило образование включений новой фазы в подложке Si на границе раздела с оксидной пленкой. Расшифровка данных ПЭМ выявила образование включений гексагональной фазы 9R-Si. Исследование фотолюминесцентных свойств синтезированных образцов выявило наличие новой полосы люминесценции при ~ 1235 нм [2]. Проведено исследование этой линии с привлечением различных спектроскопических методик. Предполагается, что формирование новой фазы происходит под действием

механических напряжений, релаксация которых в процессе отжига происходит в форме фазового превращения.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-32-20168).

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009, №1 (102). С 2-5.

2. Nikolskaya A.A. et al. Photoluminescence of silicon at 1235 nm produced by irradiation of SiO₂/Si with Kr⁺ ions and subsequent high-temperature annealing // Surface and Coatings Technology, 2020, V. 386. P 125496.

LUMINESCENT PROPERTIES OF ION-SYNTHESIZED STRUCTURES WITH 9R-SI PHASE

*Dmitry Sergeevich Korolev, Ph.D., Research Scientist^{1,2},
dmkorolev@phys.unn.ru, +7 (920) 252-73-52*

*Alena Andreevna Nikolskaya, Junior Research Scientist², Ph.D.
student², nikolskaya@nifti.unn.ru*

*Alexey Nikolaevich Mikhaylov, Ph.D., Head of Laboratory²,
mian@nifti.unn.ru*

*Alexey Ivanovich Belov, Ph.D., Research Scientist²,
belov@nifti.unn.ru*

*Anton Alexeevich Konakov, Ph.D., Associate Professor²,
konakov_anton@mail.ru*

Renat Ildarovich Murtazin, student², renat.murtazin96@mail.ru

*Dmitriy Alexeevich Pavlov, DSc, professor, Head of department²,
pavlov@unn.ru*

*David Isaakovich Tetelbaum, DSc, professor, Leading Research
Scientist², tetelbaum@phys.unn.ru*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Lobachevsky University, Nizhny Novgorod

Abstract: The results of the study of the photoluminescence of ion-synthesized samples containing the 9R-Si phase and emitting

light at a wavelength of ~ 1235 nm are presented. The structural features of the obtained nanostructures and the mechanism of the observed luminescence are discussed.

Key words: silicon, 9R-Si phase, ion synthesis, luminescence.

Acknowledgments: this work was supported by the RFBR (Grant No. 18-32-20168).

УДК 538.958

<https://doi.org/10.29003/m1600.Silicon-2020/202-204>

**УСИЛЕНИЕ ФОТОТОКА КОМПОЗИТНЫМИ МЕТАЛЛ-
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТАПОВЕРХНОСТЯМИ В
ФОТОПРИЕМНИКАХ НА БАЗЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК GE/SI**

Кириенко Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
victor@isp.nsc.ru, +7 (913) 986-93-59

Якимов Андрей Иннокентьевич, д.ф.-м.н., з.н.с.¹,
yakimov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-28-32

Блошкин Алексей Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
bloshkin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-66

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корреспондент
РАН, д.ф.-м.н., зав. Лабораторией¹, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383)
333-26-24

Уткин Дмитрий Евгеньевич, м.н.с.^{1,2}, utkinde@isp.nsc.ru, +7
(383) 330-78-86

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, г.
Новосибирск

Аннотация: Разработан и продемонстрирован высокоэффективный плазмонный фотодетектор Ge/Si с квантовыми точками Ge, содержащий композитную

метаповерхность, которая совмещает в себе субволновую металлическую решетку и массив диэлектрических микролинз.

Ключевые слова: Si, Ge, фотодетектор.

Введение

Большинство существующих исследований оптических резонансных явлений в субволновых дифракционных решетках ограничены металлическими плазмонными периодическими структурами. В настоящее время наблюдается рост интереса к резонансным диэлектрическим элементам поскольку они предлагают альтернативу металлическим плазмонным решеткам [1].

Основная часть

В работе в качестве развития существующих подходов предложена и реализована оригинальная конструкция плазмонного фотодетектора Ge/Si, содержащая гибридную метаповерхность, которая совмещает в себе двумерные металлические плазмонные решетки и трехмерный фотонный кристалл. Гибридная структура состоит из регулярного массива кремниевых столбов, выступающих через субволновые отверстия в периодически перфорированной золотой пленке на верхней части детектора.

Выводы

На основе предложенного подхода показано, что на длине волны 4.4 мкм детекторы на основе гетероструктур с гибридными метаповерхностями демонстрируют 15-ти кратное увеличение пиковой чувствительности относительно фотоприемников без субволновой метаповерхности. Установлено, что усиление поля и рост чувствительности являются следствием интерференции поверхностного плазмонного резонанса и дифракционной аномалии Рэлея[2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00070).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R. Jiang, B. Li, C. Fang, and J. Wang. Metal/Semiconductor Hybrid Nanostructures for Plasmon-Enhanced Applications // Advanced Materials, 2014, v. 26, p.5274.
2. A. Yakimov, V. Kirienko, A. Bloshkin, A. Dvurechenskii, and D. Utkin. Quantum dot based mid-infrared photodetector enhanced by a hybrid metal-dielectric optical antenna // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020) v. 53, p. 335105.

PHOTOCURRENT ENHANCEMENT IN A MID-INFRARED QUANTUM DOT PHOTODETECTOR COUPLED WITH A HYBRID METAL-DIELECTRIC GRATING STRUCTURE

Viktor Vladimirovich Kirienko, senior scientist ISP SB RAS, victor@isp.nsc.ru, +7 (913) 986-93-59

Andrey Innokentyevich Yakimov, chief researcher, ISP SB RAS, yakimov@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-28-32

Alexey Alexandrovich Bloshkin, senior scientist ISP SB RAS, bloshkin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-66

Anatoly Vasilyevich Dvurechenskii, prof. ISP SB RAS, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Dmitry Yevgenyevich Utkin, junior researcher, ISP SB RAS, utkinde@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-78-86

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090 Novosibirsk, Russian

²Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russian

Abstract: Many studies are dedicated to the problem of optical anomalies, focusing mainly on the case of metallic gratings. In the mean time, there is an increasing interest in resonant all-dielectric elements, as they offer a low-loss alternative to plasmonic structures.

Key words: Si, Ge, photodetector

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 19-12-00070).

УПОРЯДОЧЕННЫЕ ГРУППЫ Ge(Si) КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА КНИ-ПОДЛОЖКАХ, ВСТРОЕННЫХ В ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Смагина Жанна Викторовна, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
smagina@isp.nsc.ru, +7 (913) 756-26-15

Зиновьев Владимир Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Степихова Маргарита Владимировна, к.ф.-м.н., с.н.с.²,
mst@ipm.sci-nnov.ru, +7 (910) 121-58-20

Рудин Сергей Алексеевич, м.н.с.¹, *rudin@isp.nsc.ru*

Родякина Екатерина Евгеньевна, к.ф.-м.н., н.с.¹,
rodyakina@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-90-82

Новиков Алексей Витальевич, к.ф.-м.н., зам. директора по
ИТР², *anov@ipm.sci-nnov.ru, +7 (910) 793-84-03*

Двуреченский Анатолий Васильевич, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.,
профессор, зав. лабораторией¹, *dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-
24-66*

¹ ИФП СО РАН, г. Новосибирск

² ИФМ РАН – филиал ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация: Приведены экспериментальные и расчетные данные по созданию упорядоченных групп Ge(Si) квантовых точек на структурированных КНИ-подложках. Исследованы люминесцентные свойства полученных структур, в том числе встроенных в фотонные кристаллы.

Ключевые слова: SiGe гетероструктуры, квантовые точки, упорядочение, люминесценция, фотонный кристалл.

Введение

В кремниевой оптоэлектронике и нанофотонике одним из перспективных направлений считается создание гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками (КТ), обладающих

высокоэффективной люминесценцией в ближней инфракрасной области спектра $\sim 1.3 - 1.7$ мкм [1, 2]. При создании наноструктур с КТ используются разные технологии, целью которых является достижение однородности по размерам, форме, составу и пространственному упорядочению КТ. В данной работе представлены экспериментальные и расчетные результаты по самоорганизации упорядоченных групп Ge(Si) КТ на структурированной поверхности кремния на изоляторе (КНИ). Также представлены результаты исследований люминесцентных свойств групп КТ, в том числе встроенных в ФК.

Результаты и обсуждение

Для получения структур с группами пространственно упорядоченных Ge(Si) КТ использовались КНИ-подложки. Методами электронной литографии и плазмохимического травления на подложке создавался рисунок, который представлял собой периодическую последовательность ямок, в виде квадратных или гексагональных решёток с периодом от 0.5 до 4 мкм с шагом 0.1 нм. Затем на структурированных подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии проводили рост многослойной Ge/Si структуры с КТ. Установлены зависимости пространственного расположения КТ от параметров ямок, периода их расположения на подложке и типа решётки. Методом Монте-Карло проведено моделирование гетероэпитаксиального роста Ge на подложках Si(100) с ямками. Излучательные свойства образцов с группами упорядоченных Ge(Si) КТ исследовались методом микро-ФЛ. Показано, что интенсивность сигнала от упорядоченных групп КТ выше, чем от одиночных КТ. Обнаружено, что для структур с упорядоченными группами КТ, расположенных вокруг ямок с периодом 1 мкм относительно друг друга, наблюдается интенсивный сигнал ФЛ с тонкой структурой из резонансных линий в области свечения Ge(Si) КТ. Такого типа спектры ФЛ обычно наблюдаются для структур с КТ, встроенных в фотонные кристаллы [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №19-42-540002-р_а, №18-29-20016-мк, Правительства Новосибирской области и Госзадания №0306-2019-0019. За предоставление измерительного оборудования авторы благодарят ЦКП "ВТАН" НГУ.

Список использованных источников

1. Dvurechenskii A.V., Yakimov A.I. Silicon-Based Nanoheterostructures with Quantum Dots. // *Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications*, Ed. by A.V.Latyshev, A.V.Dvurechenskii, A.L.Aseev. Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London New York, 2017, P. 59 – 99.

2. Zinovyev V.A., Zinovieva A.F., Kuchinskaya P.A., Smagina Zh.V., Armbrister V.A., Dvurechenskii A.V., Borodavchenko O.M., Zhivulko V.D., and Mudryi A.V. Strain-induced improvement of photoluminescence from the groups of laterally ordered SiGe quantum dots // *Applied Physics Letters*, 2017, v. 110, P. 102101.

3. Смагина Ж.В., Новиков А.В., Степихова М.В., Зиновьев В.А., Родякина Е.Е., Ненашев А.В., Сергеев С.М., Перетокин А.В., Кучинская П.А., Шалеев М.В., Гучев С.А., Двуреченский А.В. Люминесценция пространственно упорядоченных одиночных и групп самоформирующихся Ge(Si) наностроек, встроенных в фотонные кристаллы // *Физика и техника полупроводников*, 2020, №8(54), С. 708-715.

ORDERED GROUPS OF GE (SI) QUANTUM DOTS ON SOI-SUBSTRATES INTEGRATED INTO PHOTONIC CRYSTALS

Zhanna Viktorovna Smagina ¹, Ph.D., senior researcher, smagina@isp.nsc.ru, +7 (913) 756-26-15

Vladimir Anatolievich Zinovyev ¹, Ph.D., senior researcher, zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Margarita Vladimirovna Stepikhova ², Ph.D., senior researcher, mst@ipm.sci-nnov.ru, +7 (910) 121-58-20

Sergey Alexeevich Rudin ¹, junior researcher, rudin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

*Ekaterina Evgenievna Rodyakina*¹, Ph.D., researcher,
rodyakina@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-90-82

*Alexey Vitalievich Novikov*², Ph.D., Deputy Director for Science
and Technology, *anov@ipm.sci-nnov.ru*, +7 (910) 793-84-03

*Dvurechenskii Anatolii Vasilievich*¹, corresponding member RAS,
head of laboratory, *dvurech@isp.nsc.ru*, +7 (383) 333-24-66

¹ *ISP SB RAS, Novosibirsk*

² *IPM RAS - branch of the IAP RAS, Nizhny Novgorod*

Abstract: Experimental and calculated data on the creation of ordered groups of Ge (Si) quantum dots on structured SOI substrates are presented. The luminescence properties of the obtained structures, including those embedded in photonic crystals, are investigated.

Key words: SiGe heterostructures, quantum dots, ordering, luminescence, photonic crystal.

Funding: This work was supported by RFBR (Grant No 19-42-540002-p_a and No 18-29-20016-мк), The Government of Novosibirsk Region, and by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project 0306-2019-0019).

Acknowledgments: Authors thank the NSU Multiple-access Center "VTAN" for the provision of measurement equipment.

УДК 538.911, 538.915

<https://doi.org/10.29003/m1602.Silicon-2020/208-211>

ПРОВОДИМОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ МЕЗАРЕЗИСТОРОВ В УСЛОВИЯХ ДЖОУЛЕВА РАЗОГРЕВА

Камаев Геннадий Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
kamaev@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-52-57

Ашихмина Маргарита Андреевна, студент²,
zaharovamargo6a@mail.ru, +7 (923) 230-80-57

Черкаев Алексей Сергеевич, старший преподаватель²,
cherkaev_as@mail.ru, +7 (383) 346-08-75

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²НГТУ, г. Новосибирск

Аннотация: В работе представлены результаты по влиянию геометрических факторов и поверхностных состояний на границах раздела в процессы электронного транспорта в тонких пленках кремния на диэлектрике. Проведенные с помощью САПР TCAD Sentaurus расчеты зависимости относительного изменения сопротивления мезарезисторов ($\Delta R/R$) от приложенной мощности показали, что определяющий вклад в проводимость вносят ловушки с «мелкими» состояниями, наличие которых приводит к немонотонной зависимости $\Delta R/R$.

Ключевые слова: кремний, границы зёрен, поверхностные состояния, температурный коэффициент сопротивления.

Введение

Межкристаллические границы и поверхность привносят ловушечные состояния и глубокие уровни, которые играют доминирующую роль в определении электрических свойств пленок поликристаллического кремния (poly-Si). При переходе к субмикронным размерам наблюдаемый в экспериментах температурный ход сопротивления (ТКС) мезарезистора может иметь немонотонный вид [1]. С уменьшением размеров уменьшается площадь рассеяния выделяемого тепла. Можно ожидать, что джоулев нагрев будет вносить значительный вклад в проводимость poly-Si мезарезисторов на диэлектрике.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на тестовых структурах с набором мезарезисторов разной ширины, изготовленных на основе пленок моно- и poly-Si с диэлектрической изоляцией, которая обеспечивалась слоем SiO₂. На части этих резисторов формировалась «решетка»,

которая представляла собой цепь включенных параллельно субмикронных полос шириной $\sim 0,7 \mu\text{m}$. Во всех случаях наблюдается немонотонный ход кривых зависимости $\Delta R/R$ от прикладываемой мощности с проявлением участков с отрицательным ТКС. Увеличение площади поверхности к объему влечет за собой более сильное изменение $\Delta R/R$, связанное с ростом вклада поверхностных состояний на границе Si/SiO₂. Определяющий вклад в проводимость мезарезисторов на poly-Si вносят поверхностные состояния на межзеренных границах.

Вычислительные эксперименты в среде TCAD Sentaurus [2] показали, что определяющий вклад в проводимость вносят ловушки с «мелкими» состояниями на границе раздела Si/SiO₂ и на межзеренных границах. Дополнительный учет носителей заряда, высвобождаемых с ловушек при нагреве, позволяет адекватно описать наблюдаемые зависимости, когда с изменением температуры меняются величина ТКС и его знак.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-01278).

Список использованных источников

1. V. I. Saburova, G. N. Kamaev, A. S. Cherkaev, V. A. Gridchin. Modeling of the temperature dependence of polycrystalline-Si conductivity in TCAD Sentaurus environment // XIV International scientific-technical conference “Actual Problems of Electronic Instrument Engineering”, 2018, V.1, Part 1, p.109-112.

2. Technology Computer Aided Design (TCAD) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Synopsys. URL: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html> (дата обращения: 01.06.2020).

THE CONDUCTIVITY OF SILICON MESARESISTORS IN JOULE HEATING CONDITIONS

Gennadiy Nikolaevich Kamaev¹, Ph.D., senior research fellow, kamaev@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-52-57

Margarita Andreevna Ashikhmina ², student,
zaharovamargo6a@mail.ru, +7 (923) 230-80-57
Alexey Sergeevich Cherkaev ², senior lecturer,
cherkaev_as@mail.ru, +7 (383) 346-08-75

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The article presents the results on the influence of geometric factors and surface states at the interfaces on the processes of electronic transport in thin silicon films on dielectric. TCAD Sentaurus calculations of the mesaresistors relative change resistance ($\Delta R/R$) on the applied power, have shown the decisive role of traps with "shallow" states in the film conductivity. Their presence leads to a nonmonotonic dependence $\Delta R/R$.

Key words: silicon, grain boundaries, interfacial states, temperature coefficient of resistance.

Acknowledgments: This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-07-01278).

УДК 535.417

<https://doi.org/10.29003/m1603.Silicon-2020/211-214>

СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ИЗ GESBTE НА ВОЛНОВОДЕ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ-НА- ИЗОЛЯТОРЕ

Миннуллин Рамиль Талгатович, научный сотрудник¹,
аспирант², ramil.minnullin@phystech.edu, +7 (926) 690-61-47

Барабаненков Михаил Юрьевич, д. ф.-м. н, главный научный
сотрудник³, главный специалист¹, barab@iptm.ru

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: В работе рассматривается дифракционная решетка из материала с изменяемым фазовым состоянием (GeSbTe) на волноводе структуры кремний-на-изоляторе в качестве потенциального компонента оптической энерго-независимой памяти. Приводятся спектры отражения структур волновод-решетка, рассчитанные с применением метода матричного уравнения Риккати. Определены параметры, соответствующие возбуждению резонансной моды в решетке, способствующему уменьшению энергетических затрат на изменение фазы GeSbTe.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, дифракционная решетка, материалы с переключаемой фазой, GST, оптическая память.

Введение

В настоящее время ведутся активные разработки в области оптической энергонезависимой памяти на основе материалов с изменяемым фазовым состоянием (phase-change materials, PCM) [1]. Перспективным материалом являются сплавы Ge-Sb-Te (GST) разной стехиометрии. Принцип работы такого устройства основан на изменении пропускной способности (прозрачности) волновода при переходе входящего в его состав GST элемента из кристаллической фазы в аморфную и наоборот. В ряде работ (см., например, [2]) предложено исполнение GST элемента в виде тонкой пленки, нанесенной на поверхность полоскового волновода. В данной работе мы рассматриваем использование дифракционной решетки из GST в качестве альтернативы сплошной пленке. Такой подход может предоставить несколько преимуществ: 1) уменьшение энергии электромагнитного (ЭМ) излучения, необходимой для осуществления оптически индуцированного фазового перехода GST; 2) увеличение эффективности захвата затухающего «хвоста» волноводной моды слоем GST; 3) обеспечение простого способа

проверки фазового состояния GST на основе спектров отражения структуры.

Результаты

В данной работе рассматриваются дифракционные решетки из GST, расположенные на поверхности волноводов структуры кремний-на-изоляторе. Основным подходом к исследованию таких структур является изучение их спектров отражения. Расчет спектров отражения (рис. 1) был произведен с помощью метода матричного уравнения Риккати в теории многократного рассеяния ЭМ волн в неоднородных средах [3]. Были определены параметры, соответствующие возбуждению резонансной моды в дифракционной решетке, что способствует уменьшению энергетических затрат на изменение фазового состояния.

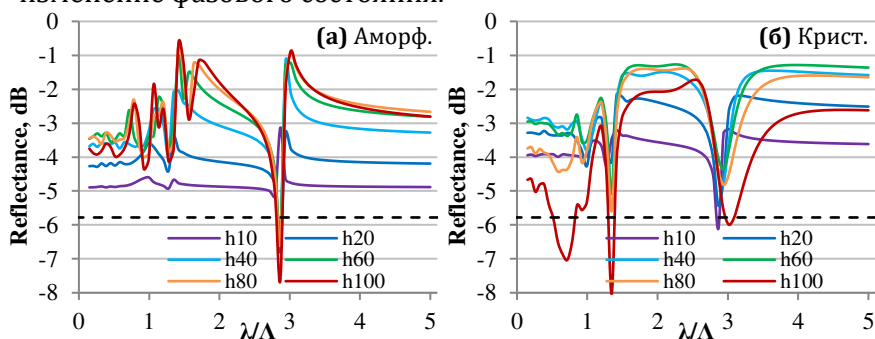


Рисунок 1 – Спектры отражения GST дифракционной решетки на КНИ волноводе при нормальном падении ТЕ поляризованной волны (длина волны 1.55 мкм) в случае аморфной (а) и кристаллической (б) фазы и разных высотах решетки (h в нм)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-03040.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015, №4(177) С. 60–64.
2. Ríos C. et al., Integrated all-photonics non-volatile multi-level memory // Nature Photonics, 2015, 9, 725–732.
3. Barabanenkov Yu.N., Barabanenkov M.Yu., Energy invariants of composition rules for scattering and transfer matrices of propagating and evanescent electromagnetic waves in dielectric structures // PIERS Online, 2006, 2, 10–12.

REFLECTION SPECTRA OF GE-SB-TE DIFFRACTION GRATING ON A SILICON-ON-INSULATOR WAVEGUIDE

*Ramil Talgatovich Minnullin, junior researcher¹, Ph.D. student²,
ramil.minnullin@phystech.edu, +7 (926) 690-61-47*

*Mikhail Yurievich Barabanenkov, Dr, leading researcher^{1,3},
barab@iptm.ru*

¹JSC MERI, Zelenograd, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

³Institute of Microelectronics Technology of RAS, Chernogolovka

Abstract: In this work a diffraction grating made of a phase-change material (GeSbTe) and placed on a silicon-on-insulator waveguide is considered as a potential component of the optical non-volatile memory cell. Reflection spectra of such waveguide-grating structures are calculated with use of the Matrix Riccati Equation technique. Parameters corresponding to the excitation of a resonant mode inside the grating, which can help decreasing the energy budget for switching the GeSbTe phase, are determined.

Key words: silicon photonics, diffraction grating, phase-change materials, GST, optical memory.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No.19-29-03040.

МОДИФИКАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ОТЖИГАМИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*Черкова Светлана Глебовна, к.ф.-м.н., н.с.¹,
cherkova@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-70*

*Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, снс^{1,2},
volodin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-70*

*Скуратов Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., рук. сектора³,
skuratov@jinr.ru, +7 (49621) 6-36-84*

*Кривякин Григорий Константинович, инженер-
исследователь^{1,2}, krivyakin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-70*

*Камаев Геннадий Николаевич, к.ф.-м.н., снс¹,
kamaev@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-52-57*

¹ИФП СО РАН, г. Новосибирск

²НГУ, г. Новосибирск

³ОИЯИ, г. Дубна

Аннотация: Исследованы оптические и структурные свойства кремния, облученного высокоэнергетичными ионами Хе. В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) при низких температурах наблюдается широкий пик в области 1.3 – 1.5 мкм. С ростом дозы облучения от $5 \cdot 10^{10}$ до 10^{13} см⁻² происходит спад и сужение пика ФЛ. Отжиг при температуре 400 °С приводит к многократному (до 35 раз) усилению сигнала.

Ключевые слова: фотолюминесценция, дефекты в кремнии, быстрые тяжелые ионы.

Введение

Создание излучателя на основе кремния остается актуальной задачей. Одним из возможных и широко обсуждаемых путей решения этой проблемы является инженерия фотоизлучающих дефектов. Активно изучается

дислокационная люминесценция [1, 2]. Мы применили облучение кремния ионами Хе с энергией 167 МэВ. Для таких частиц характерны высокие уровни потерь на ионизацию и вдоль траектории иона возможен локальный разогрев до температур, превышающих температуру плавления.

Результаты и обсуждение

Образцы высокоомного кремния с ориентацией (111) облучались ионами $^{132}\text{Xe}^{26+}$ с энергией 167 МэВ в диапазоне флюенсов от $5 \cdot 10^{10}$ до 10^{13} см⁻² на циклотроне ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна). Пробег ионов Хе составлял ~19.9 мкм, потери на ионизацию достигали 12.5 кэВ/нм (www.srim.org). Свойства образцов контролировались с помощью методик ФЛ ($\lambda_{\text{ex}}=325$ нм) и высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ).

Облучение приводило к появлению в спектрах ФЛ при криогенных температурах широкого пика в области 1150-1600 нм (1.1-0.77 эВ). С ростом дозы ионов сигнал ФЛ падает и максимум смещается в длинноволновую область. После отжига 400 °С, 1 ч. происходит многократное (до 35 раз) усиление ФЛ. Наблюдается набор узких линий, которые в литературе связывают с ФЛ от мелких междоузельных кластеров: X (1.033 эВ), W (1.018 эВ), W' (1.0048 эВ), а также полосы R (0.901 эВ), приписываемой {311} дефектам, и C (0.79 эВ) (C-O комплексы). Широкий максимум можно разложить на, так называемые, «дислокационные» пики D1-D4 (0.81–0.99 эВ) [1, 2]. Наличие дефектов дислокационного типа подтверждают снимки ВРЭМ. Обсуждается роль сильной ионизации в процессах дефектообразования.

Работа выполнена по госзаданию №0306-2019-0019.

Список использованных источников

1. Соболев Н.А. Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией// ФТП, 2010, т. 44(1).С. 3-25.

2. Fedina L.I., Gutakovskii A.K., Shamirzaev T.S. On the structure and photoluminescence of dislocations in silicon // J. Appl. Phys., 2018, v. 124. P. 053106.

LOW-TEMPERATURE ANNEALING OF LIGHT-EMITTING DEFECTS IN SILICON, IRRADIATED WITH SWIFT HEAVY IONS

*Svetlana Glebovna Cherkova*¹, Ph.D., researcher, *cherkova@isp.nsc.ru*, +7 (383) 333-24-70

Vladimir Alekseevich Volodin^{1,2}, doctor of science, professor, senior researcher, *volodin@isp.nsc.ru*, +7 (383) 333-24-70

*Vladimir Alekseevich Skuratov*³, doctor of science, team leader, *skuratov@jinr.ru*, +7 (49621) 6-36-84

Gregory Konstantinovich Krivyakin^{1,2}, researcher, *krivyakin@isp.nsc.ru*, +7 (383) 333-24-70

*Gennadiy Nikolaevich Kamaev*¹, Ph.D., senior researcher, *kamaev@isp.nsc.ru*, +7 (383) 330-52-57

¹ ISP SB RAS, Novosibirsk

² NSU, Novosibirsk

³ JINR, Dubna

Abstract: The optical and structural properties of silicon irradiated with swift heavy Xe ions are investigated. In the photoluminescence (PL) spectra at low temperatures, a broad peak is observed in the range 1.3 - 1.5 μm . With an increase in the irradiation dose from 5×10^{10} to 10^{13} cm^{-2} , the PL peak decreases and became narrows. Annealing at a temperature of 400° C leads to multiple signal amplification (up to 35 times).

Key words: photoluminescence, defects in silicon, swift heavy ions.

Acknowledgments: This work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project 0306-2019-0019).

ОСОБЕННОСТИ РОСТА СЛОЕВ CaSi_2 НА ПОДЛОЖКАХ $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$

Зиновьев Владимир Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Зиновьева Айгуль Фанизовна, к.ф.-м.н., с.н.с.¹,
zinovieva_71@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Кацюба Алексей Владимирович, м.н.с.¹, kacyuba@isp.nsc.ru,
+7 (383) 333-26-24

Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н., с.н.с.¹,
volodin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-70

Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корр. РАН, д.ф.-
м.н., проф., зав. лаборатории¹, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-
24-66

¹ ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: В работе приведены результаты по росту слоев CaSi_2 на подложках $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$.

Ключевые слова: эпитаксия, двумерные материалы.

Введение

В последнее время растет интерес к созданию слоев CaSi_2 на кремниевых подложках. Это интерес связан с потенциальной возможностью получения графеноподобных кремниевых структур. Эти материалы должны иметь электронную структуру с прямой запрещенной зоной, что должно приводить к эффективной фотолюминесценции в видимом диапазоне. Недавно было обнаружено, что слои кремния, интеркалированные в CaSi_2 , проявляют электронные свойства, характерные для графеноподобных материалов. Обычно слои CaSi_2 выращивают на подложках $\text{Si}(111)$, в данной работе нами проведено исследование особенностей роста на $\text{Si}(001)$.

Результаты и обсуждение

Формирование структур проводилось при осаждении слоев CaF_2 в температурном диапазоне $500^\circ\text{-}600^\circ\text{C}$. В течение всего времени эпитаксиального роста проводилось облучение электронами в кристаллографическом направлении $[110]$ с ускоряющим напряжением 20 кВ, и плотностью тока 50 мкА/см². Скорость осаждения CaF_2 составляла 0.3 Å/с. Выращенные структуры были исследованы методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и комбинационного рассеяния света (КРС). На рис.1 представлены результаты АСМ исследования поверхности выращенных образцов в местах воздействия электронным пучком и без него. В первом случае на поверхности формируются нанопроволоки, лежащие в плоскости и ориентированные в направлениях типа $[110]$. Во втором случае поверхность имеет стандартный вид, характерный для поверхности CaF_2 с ямками треугольной формы. Спектры КРС снятые в области воздействия электронным пучком, имеют существенные отличия от спектров КРС, измеренных на CaF_2 . Наблюдаются три пика в области 418 см^{-1} , 388 см^{-1} и 346 см^{-1} , характерные для кристаллических слоев CaSi_2 [1].

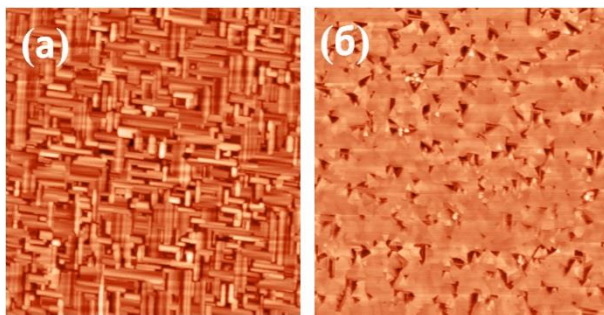


Рисунок 1 – АСМ-изображение ($5 \times 5\text{ мкм}^2$) рельефа поверхности эпитаксиальной пленки $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$ в области воздействия электронного пучка (а) и без него (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-52-00016), БРФФИ (грант №Ф20Р-082) и госзадания №0306-2019-0019.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kacyuba A.V., Dvurechenskii A.V., Kamaev G.N., Volodin V.A., Krupin A.Y. Radiation-Induced epitaxial CaSi_2 film growth at the molecular-beam epitaxy of CaF_2 on Si// Materials Letters. 2020, v. 268, p.127554.

FEATURES OF THE GROWTH OF CaSi_2 LAYERS ON $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$ SUBSTRATES

Vladimir Anatolievich Zinovyev¹, Ph.D., Senior Researcher, zinoviev@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Aigul Fanizovna Zinovieva¹, Ph.D., Senior Researcher, zinovieva_71@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Kacyuba Aleksey Vladimirovich¹, Junior Researcher, kacyuba@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-26-24

Vladimir Alekseevich Volodin¹, Doctor of Science, Senior Researcher, volodin@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-70

Anatoly Vasilievich Dvurechenskii¹, Corresponding Member of RAS, Doctor of Science, Professor, Head of Laboratory, dvurech@isp.nsc.ru, +7 (383) 333-24-66

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk

Abstract: In this work the results on the growth of CaSi_2 layers on $\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$ substrates are presented.

Key words: epitaxy, two-dimensional materials.

Acknowledgments: this work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 20-52-00016), the BRFFR (Grant No. F20R-082) and partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 0306-2019-0019).

Секция 5 «Моделирование процессов роста кремния и структур на его основе, применение TCAD и SPICE-моделей»

УДК 538.91

<https://doi.org/10.29003/m1606.Silicon-2020/221-223>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СЛОЕВ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ, НА МИКРОРЕЛЬЕФНУЮ ПОДЛОЖКУ

Евдокимов Владимир Лукьянович, научный сотрудник, АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград, vevdokimov@niime.ru, +7 (905) 702-65-66

Аннотация: предложены выражения для профиля слоев, осаждаемых из газовой фазы в траншеях и на гребнях рельефа интегральных схем.

Ключевые слова: осаждение из газовой фазы, моделирование профиля слоев.

Введение

Транзисторные структуры интегральных схем субмикронного уровня [1] имеют развитый рельеф, требующий его качественного покрытия. Профиль слоев, осаждаемых при низком давлении, зависит от кинетики доставки и химической реакции реагента [2,3].

Описание модели

Для малых степеней заполнения реагентом в условиях непрерывно обновляемой поверхности, профиль определяется соотношением потоков поверхностной диффузии (f_d) и химического превращения (f_s) адсорбированного реагента. Коэффициент конформности (s) определяется показателем подвижности адсорбата (K_{II}) и коэффициентом неравномерности доставки к участкам рельефа (K_I), как

$$S = K_F \cdot (1 + K_{II}),$$

$$K_{II} = f_d / f_s = (a / \lambda^*)^2 \cdot z^{-1} e^{(E_a - Q_d) / RT},$$

$$K_F = 2\pi^{-1} \cdot \arcsin[w \cdot (w^2 + 4h^2)^{-1/2}],$$

где w и h – ширина и глубина траншей рельефа, a – длина одиночного перескока диффундирующей молекулы, $z (= 4)$ – число направлений перескока, T – температура подложки, R – универсальная газовая постоянная, Q_d и E_a – энергии активации диффузии и химической реакции, λ^* – длина свободного пробега молекул адсорбата. На регулярном рельефе и смежном участке подложки (Рисунок 1) профиль зависит от коэффициента загрузки (χ). Для диффузионного режима роста $\chi = \delta / (L_2 + 2nh)$, и для переходного диффузионно-кинетического $\chi^* = \chi \cdot (1 + k)$, где $k = f_d / (f_d + f_s)$, δ – толщина пограничного газового слоя, n – количество гребней с траншеями. На рисунке представлены расчетные профили слоев SiO_2 и Si_3N_4 , осажденных, соответственно, пиролизом $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ и аммонолизом SiCl_2H_2 – оба в диффузионном ($\chi = 0.50$) и переходном ($f_d = f_s$, $\chi^* = 0.75$) режимах, для $f_d = 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $T = 1000 \text{ К}$, $L_2 = 0.5 \text{ см}$, $h = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ (50 нм), $w = 0.5h$, $\delta = 0.3 \text{ см}$, $n = 10^4$ и $L_1 = \delta$.

Заключение

Предложенная модель может быть использована для анализа и оптимизации процессов газофазного осаждения слоев на микрорельефные структуры интегральных схем.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Москва: Техносфера, 2011.
2. Васильев В.Ю. Применение методов химического осаждения тонких слоёв из газовой фазы для микросхем с технологическими нормами 0,35-0,18 мкм. Часть 5. Схемы

роста и корреляция закономерностей осаждения и свойств тонких слоёв // Электронная техника. 2015. Серия 2. С. 48-63.

3. Евдокимов В.Л. Молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы // Электронная техника. 2017. Серия 3, вып. 4. С. 42-55.

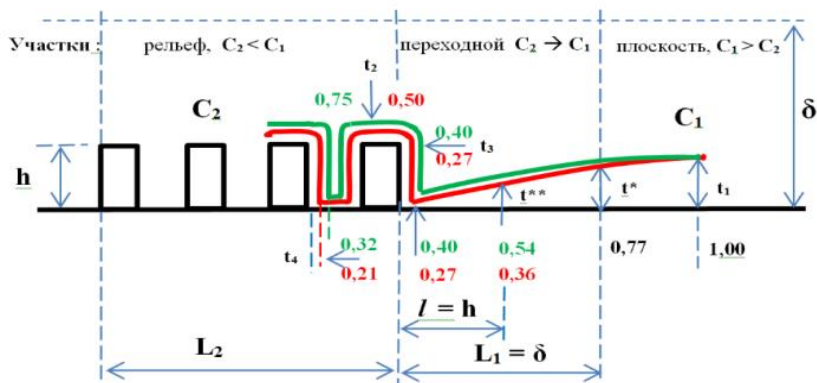


Рисунок 1 – Профили слоев SiO_2 и Si_3N_4 на рельефе (L_2) и смежном участке (L_1) для $\chi = 0.50$ (красная линия) и $\chi = 0.75$ (зеленая линия). В точках $l \gg h$, $t_1 = 1.00$ усл. ед.

MODELING THE TOPOLOGICAL NON-UNIFORMITY OF THE LAYERS DEPOSITED FROM THE GAS PHASE ON A SUBSTRATE MICRORELIEF

Vladimir Lukyanovich Evdokimov, research scientist, JSC NIIME, Zelenograd, vevdokimov@niime.ru, +7 (905) 702-65-66

Abstract: expressions are proposed for the profile of layers deposited from the gas phase in trenches and on terrain ridges of integrated circuits.

Key words: gas phase deposition, layer profile modeling.

МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орленсон Вульф Борисович, аспирант физико-технического института¹, wolf.orson@mail.ru, +7 (978) 791-75-81

Мазинов Алим Сеит-Аметович, к.т.н., доцент кафедры радиофизики и электроники физико-технического института¹, mazinovas@cfuv.ru

Шевченко Алексей Иванович, к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники физико-технического института¹, shevshenkoai@cfuv.ru

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь

Аннотация: Представлена модель для расчёта спектров поглощения полупроводниковых материалов. Модель основана на расчёте закона дисперсии.

Ключевые слова: оператор Гамильтона, уравнение Шрёдингера, плоские волны, спектр поглощения, кристаллическая решётка, переходы.

Введение

Спектр поглощения полупроводниковых материалов является одной из важнейших характеристик. Его параметры позволяют судить о возможности получения различных оптоэлектронных приборов: фотодетекторов, фотопреобразователей и др. Исходя из этого, создание физико-математической модели расчёта спектральных зависимостей является актуальной задачей [1].

Описание модели

Для определения спектра поглощения полупроводников необходимо найти закон дисперсии электронной волны. Закон

дисперсии вычисляется в результате решения уравнения Шрёдингера рассматриваемого кристалла:

$$\hat{H}\psi = E\psi. \quad (1)$$

В данной работе уравнение (1) решается методом разложения по плоским волнам. В этом методе волновые функции электрона ψ представлены в базисе плоских волн, а оператор Гамильтона выражается соотношением [2,3]:

$$\hat{H}_{p,q} = \left(\hbar^2 / 2m \right) \left((k_x - K_p)^2 + (k_y - K_q)^2 \right) \delta_{K_p, K_q} + u(K_p - K_{p'}, K_q - K_{q'}), \quad (2)$$

где \hbar – постоянная Планка, m – масса электрона, δ_{K_p, K_q} – дельта символ Кронекера, k_x, k_y – волновые векторы внутри первой зоны Брюллиэна: $k_x = [-\pi/\Lambda_x, \pi/\Lambda_x]$, $k_y = [-\pi/\Lambda_y, \pi/\Lambda_y]$ и $K_p = -(2\pi r/\Lambda_x)x$; $K_q = -(2\pi q/\Lambda_y)y$, p, q – номера пространственных гармоник $p = q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty$, Λ_x и Λ_y – периоды решётки вдоль осей x и y . Функция потенциальной энергии имеет следующий вид:

$$u(K_p, K_q) = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} U(x_i, y_j) \exp(-j \cdot (K_p \cdot x_i + K_q \cdot y_j)), \quad (3)$$

где K_p, K_q – x и y компоненты волнового вектора, N_x, N_y – количество точек разбиения модельного пространства. $U(x_i, y_j)$ – двумерная функция потенциальной энергии. Зависимость коэффициента поглощения рассчитывается исходя из вероятностей энергетических переходов:

$$P_{i \rightarrow f} = (\psi_i^*, \psi_f), \quad (4)$$

где $P_{i \rightarrow f} \in [0, 1]$, ψ_i, ψ_f – начальные и конечные волновые функции соответствующих переходов. Каждому переходу соответствует своя частота поглощённого фотона $P_{i \rightarrow f} \rightarrow \omega$.

Выводы

Представленная модель является перспективной для использования применительно к кремнию. Она позволяет вносить в кристаллическую решётку различного рода дефекты и оценивать динамику их влияния на спектр поглощения.

Список используемых источников

1. Mazinov A., Shevchenko A. The offset of the quantum interband transitions in non-crystalline semiconductors // Opt. Quant. Electron. 2015. Vol. 47 (7). P. 1659–1669.

2. Старостенко В.В., Орленсон В.Б., Мазинов А.С., Ахрамович Л.Н. Квантово-механический подход к описанию взаимодействия СВЧ-электромагнитного излучения с тонкими проводящими плёнками // ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 9. С. 43–47.

3. Некрашевич С.С., Гриценко В.А. Электронная структура оксида кремния (обзор) // ФТТ. 2014. Т. 56, вып. 2. С. 209–223.

MODEL FOR CALCULATION OF THE OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

Vulf Borisovich Orlenson, postgraduate student,
wolf.orson@mail.ru.

Alim Seit-Ametovich Mazinov¹, Ph.D., Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronics, mazinovas@cfuv.ru, +7 (978) 768-49-67

Alexey Ivanovich Shevchenko, Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Radiophysics and Electronics, shevshenkoai@cfuv.ru.

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation.

Abstract: A model for calculating the absorption spectra of semiconductor materials is presented. The model is based on the dispersion law calculation.

Key words: Hamilton operator, Schrödinger equation, plane waves, absorption spectrum, crystal cell, transitions.

TCAD МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ SELBOX И DSOI КМОП КНИ ЯЧЕЕК ПАМЯТИ

Попов Дмитрий Александрович, старший преподаватель, МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва, da.popov@hse.ru, +7 (926) 532-02-46

Аннотация: Проведено смешанное TCAD-SPICE моделирование удара тяжелой заряженной частицы в ячейку памяти на основе КНИ КМОП транзисторов. Исследовалась зависимость критического значения линейных потерь энергии от температуры для трех конфигураций 0,24 мкм КНИ МОП-транзисторов: традиционный КНИ, Selective BOX и Double SOI. Было показано, что отказоустойчивость ячеек на основе Double SOI МОПТ значительно повышается при отрицательном смещении на нижнем затворе.

Ключевые слова: одиночные сбои, TCAD-SPICE моделирование, DSOI, SELBOX, высокая температура.

Введение

Одним из условий надежной работы аэрокосмического оборудования и устройств специального назначения является высокая отказоустойчивость ячеек памяти к удару тяжелой заряженной частицы [1]. Одним из критических параметров, влияющих на отказоустойчивость, является температура, при которой происходит воздействие. Так как основные параметры транзистора и физических процессов образования треков частиц сильно зависят от температуры [2].

Полученный результат

В работе проведено моделирование трех ячеек памяти на основе 0,24 мкм КНИ МОПТ различных конфигураций. Первая конфигурация стандартный КНИ МОПТ. Вторая – КНИ МОПТ с окном в скрытом оксиде в районе канала. Третья – КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде.

Промоделированная зависимость критического значения линейных потерь энергии от температуры представлена на рисунке 1.

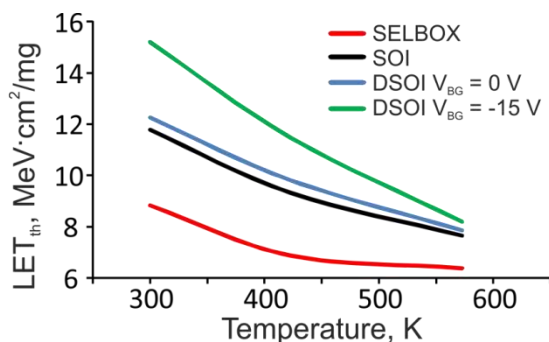


Рисунок 1 – Зависимость критического значения линейных потерь энергии от температуры

Выводы

Из рассмотренных конструкций КНИ МОПТ с дополнительным слоем кремния в скрытом оксиде при отрицательном смещении является наиболее стойкой к воздействию тяжелой заряженной частицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00898) и совместного российско-китайского гранта (грант № 20-57-53004).

Список использованных источников

1. Patterson R. L., et al. Electronic Components for Use in Extreme Temperature Aerospace Applications // 12th International Components for Military and Space Electronics Conference (CMSE 08), San Diego, California, February 11-14, 2008.
2. Truyen D., et al., Temperature Effect on Heavy-Ion Induced Parasitic Current on SRAM by Device Simulation: Effect on SEU Sensitivity // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 54, № 4, 2007, pp. 1025-1029.

TCAD SIMULATION OF SELBOX AND DSOI CMOS SRAM FAILURE

Dmitry Alexandrovich Popov, Senior Lecture MIEM NRU HSE, Moscow, da.popov@hse.ru, +7 (926) 532-02-46

Abstract: A mixed TCAD-SPICE simulation of the heavy ion impact into a SRAM on SOI CMOS transistors was carried out. The dependence of the threshold LET on temperature was investigated for three configurations of 0.24 μm SOI MOSFET: traditional SOI, Selective BOX and Double SOI. The radiation hardness of SRAM on Double SOI MOSFETs is significantly improved by applying a negative bias to the additional silicone layer has been shown.

Key words: SEU, TCAD-SPICE simulation, DSOI, SELBOX, high temperature.

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR (grant No. 18-07-00898), and RFBR and NSFC (grant No. 20-57-53004).

УДК 621.382.32

<https://doi.org/10.29003/m1609.Silicon-2020/229-232>

SPICE МОДЕЛИ СУБМИКРОННЫХ КМОП ТРАНЗИСТОРОВ В ДИАПАЗОНЕ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исмаил-Заде Мамед Рашидович, ассистент департамента электронной инженерии¹, mismailzade@hse.ru, +7 (926) 376-73-98

*Самбурский Лев Михайлович, к. т. н., доцент¹, lsambursky@hse.ru, +7 (495) 772-95-90*15206*

¹НИУ ВШЭ, г. Москва

Аннотация: В работе представлены SPICE Low-T модели субмикронных КМОП транзисторов, предназначенные для расчета электронных схем в диапазоне криогенной температуры (до 4 К). Разработана процедура экстракции SPICE-параметров Low-T моделей на основе результатов

измерений или TCAD-моделирования стандартного набора ВАХ и ВФХ в криогенном диапазоне температуры.

Ключевые слова: криогенная температура, компактные SPICE-модели, КМОП транзисторы, SPICE-моделирование.

Введение

Применение интегральных схем в условиях криогенной температуры, стала предметом повышенного интереса, в связи с быстрыми темпами развития спутниковой индустрии, космической отрасли, квантовых вычислительных систем и др. Проектирование таких схем требует наличие SPICE-моделей элементов схемы, которые позволяют оценить уровень их стойкости к воздействию криогенной температуры.

Методика построения SPICE Low-T моделей

В работе представлены SPICE-модели МОПТ, изготовленные по КНИ, КНС и нанометровой КМОП технологиям, температурный диапазон которых расширен до 4 К. В качестве базовой модели использовались стандартные SPICE-модели МОПТ: BSIM6 и PSP для 28-нм КМОП транзисторов, BSIMSOI для 0,18-мкм КНИ МОПТ и BSIM4 для 0,25-мкм КНС МОПТ. Затем каждая базовая модель была дополнена аппроксимирующими выражениями для основных температурно-зависимых параметров: V_{TH} , μ_0 , SS , RD . Для выбранных параметров использовалась полиномиальная и гиперболическая функции зависимости от температуры. Измерялись семейства стандартных ВАХ МОПТ с различными W/L канала в диапазоне температур от 4 К до 300 К. Определение температурно-зависимых параметров базовой SPICE-модели и дополнительных коэффициентов проводилась с помощью промышленного САПР IC-CAP.

Результаты

На рисунке 1 представлено сравнение результатов измерения [1–3] и расчёта по разработанным Low-T SPICE-моделям выходных ВАХ МОПТ, изготовленных по трем

различным технологическим процессам в диапазоне температуры до 4 К. Погрешность расчёта ВАХ для всех разработанных моделей не превышает 12% в диапазоне температуры до 4 К.

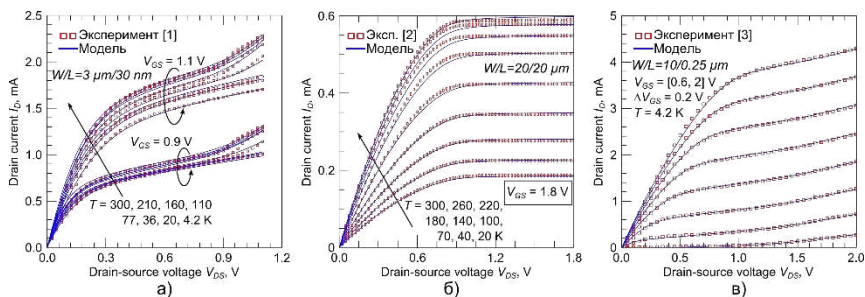


Рисунок 1 – Выходные ВАХ МОП-транзисторов: а) 28-нм n -МОПТ; б) 0,18-мкм КНИ n -МОПТ; в) 0,25-мкм КНС n -МОПТ

Выводы

Разработаны Low-T версии стандартных SPICE моделей BSIM4, BSIM6, BSIMSOI и PSP для субмикронных и нанометровых МОП транзисторов, предназначенные для расчета электронных схем в диапазоне криогенной температуры до 4 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00898 А) и совместного российско-китайского гранта (грант № 20-57-53004).

Список использованных источников

1. F. Jazaeri, et al., Proc. 26th Int. Conf. Mixed Des. Integr. Circuits Syst. (MIXDES), Jun. 2019, pp. 15–25.
2. B. Xie, et al., Chinese Physics B, vol. 25, no. 7, p. 078501, 2016.
3. S. R. Ekanayake, et al., IEEE Trans Electron Devices, 57(2), 2010, pp. 539–547.

SPICE MODELS OF SUB-MICRON CMOS MOSFETS IN THE CRYOGENIC TEMPERATURE RANGE

Mamed R. Ismail-Zade, Assistant of the Department of Electronic Engineering¹, mismailzade@hse.ru, +7 (926)376-73-98

*Lev M. Sambursky, Candidate of Sc. (engineering), Associate Professor¹, lsambursky@hse.ru, +7 (495) 772-95-90*15206*

¹NRU HSE, Moscow

Abstract: This paper presents Low-T SPICE models of sub-micron MOSFETs, designed to calculate electronic circuits in the cryogenic temperature range (down to 4 K). The procedure for extracting the Low-T SPICE model parameters based on the measurement results or TCAD simulation of a standard set of I-V and C-V characteristics in the cryogenic temperature range has been developed.

Key words: cryogenic temperature, compact SPICE models, CMOS transistors, SPICE modeling.

Acknowledgments: this work was implemented in the framework of the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-07-00898 A), and by RFBR and NSFC according to the research project 20-57-53004.

УДК 51-37

<https://doi.org/10.29003/m1610.Silicon-2020/232-235>

ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЦИФРОВЫЕ КМОП ИС

*Звягинцев Дмитрий Евгеньевич, студент¹,
dezvyagintsev@miem.hse.ru, +7 (999) 861-91-96*

*Елисеева Алёна Валерьевна¹, студент,
eliseevaaleona@yandex.ru*

Куликов Никита Андреевич², аспирант, nikita93-07@bk.ru

*Харитонов Игорь Анатольевич¹, к. т. н., профессор,
ikharitonov@hse.ru, +7 (916) 314-04-61*

*Самбурский Лев Михайлович¹, к. т. н., доцент,
lsambursky@hse.ru*

¹НИУ ВШЭ (МИЭМ), г. Москва

²НИЯУ МИФИ, г. Москва

Аннотация: На основании результатов измерений характеристик КМОП ИС в диапазоне дозы до 0.5 Мрад с интенсивностью 0,1 рад/с были рассчитаны изменения концентрации дефектов Nit, Not, идентифицированы параметры SPICE-моделей МОП-транзисторов ИС. Схемотехническое моделирование позволило оценить критическое значение дозы для деградации параметров исследуемых ИС.

Ключевые слова: КМОП ИС, низкоинтенсивное излучение, дырочный заряд в окисле, поверхностные состояния, SPICE модели, схемотехническое моделирование.

Введение

Одним из факторов космического пространства является низкоинтенсивное радиационное облучение, под воздействием которого деградируют характеристики и параметры электронных схем из состава космических аппаратов и, как следствие, снижается отказоустойчивость системы.

Из литературы известно [напр. 1], что деградация характеристик КМОП схем сильно зависит от мощности дозы облучения, хотя традиционно измерения характеристик проводят при высоких мощностях дозы.

В данной работе была поставлена задача оценить характер деградации параметров логических схем IN74AC00 (И-НЕ) и IN74AC02 (ИЛИ-НЕ) производства ОАО «Интеграл», для которых ранее такая оценка не производилась. Для выполнения задачи 1) были проведены измерения характеристик схем, 2) рассчитаны изменения концентрации

дефектов Nit, Not, 3) определены параметры SPICE-моделей, 4) проведено прогностическое SPICE-моделирование работы схем в более широком диапазоне дозы.

Измерения

Облучение производилось как в пассивном, так и в активном режимах на базе НИЯУ МИФИ в шахте реактора при мощности дозы 0,1 рад/с. С использованием анализатора B1500A периодически измерялись и анализировались зависимости тока потребления ИС от напряжения на входах (рис.1).

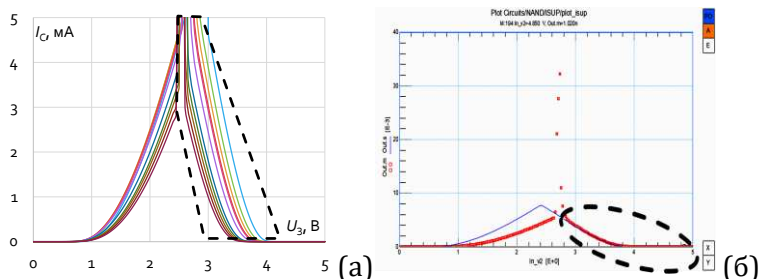


Рисунок 1 – Графики $I_{\text{пит}}(U_{\text{вх}})$ для И-НЕ (а), сравнение измеренных и смоделированных ВАХ (б)

Идентификация параметров SPICE-моделей n- и p-МОПТ проводилась в 3 этапа: 1) изменения Nit, Not определялись по стандартным формулам; 2) зависимости статических параметров модели от Nit, Not определялись методами оптимизации в ПО IC-CAP; 3) динамические параметры моделей определялись по результатам измерений кольцевых генераторов.

Схемотехническое моделирование характеристик схем проведено в LTSpice XVII. По результатам моделирования определён характер деградации динамических параметров и значения критической дозы для каждого из них (в сравнении с техническими условиями [2]).

Список использованных источников

1. P. S. Winokur, F. W. Sexton, G. L. Hash, and D. C. Turpin. Total-Dose Failure Mechanisms of Integrated Circuits in Laboratory and Space Environments // IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. NS-34, N 6, 1987, pp. 1448-1454.
2. IN74AC02, IN74AC00 Technical Data, URL: <https://www.integral.by/sites/default/files/AC00.pdf> (дата обращения 10.06.2020).

MEASURING AND MODELING THE EFFECT OF LOW INTENSITY RADIATION ON DIGITAL CMOS ICS

*Dmitry Evgenievich Zvyagintsev*¹, student,
dezvyagintsev@miem.hse.ru, +7 (999) 861-91-96
*Alena Valerievna Eliseeva*¹, student, *eliseevaaleona@yandex.ru*
*Nikita Andreevich Kulikov*², postgraduate student, *nikita93-07@bk.ru*
*Igor Anatolyevich Kharitonov*¹, Ph.D., Professor,
ikharitonov@hse.ru, +7 (916) 314-04-61
*Lev Mikhailovich Sambursky*¹, Ph.D., Associate Professor,
lsambursky@hse.ru

¹*NRU HSE (MIEM), Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

Abstract: Based on the results of measuring the characteristics of CMOS ICs in the dose range up to 0.5 Mrad with an intensity of 0.1 rad / s, the changes in the concentration of defects Nit, Not were calculated, and the parameters of SPICE models of MOS transistors IC were identified. Circuitry modeling made it possible to estimate the critical value of the dose for the degradation of the parameters of the studied ICs.

Key words: CMOS IC, low-intensity radiation, hole charge in oxide, surface states, SPICE models, circuit simulation.

ОСНОВНЫЕ ЭФФЕКТЫ БЛИЗОСТИ В ГЛУБОКО- СУБМИКРОННЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ И ПОДХОДЫ К ИХ УЧЁТУ В SPICE-МОДЕЛЯХ

Шипицын Дмитрий Святославович, к.ф.-м.н., директор по развитию систем проектирования¹, dshipitsin@niime.ru, +7 (903) 669-14-01

Потупчик Александр Георгиевич, начальник отдела¹, apotupchik@niime.ru, +7 (903) 506-34-09

Шемякин Александр Валерьевич, начальник лаборатории¹, ashemyakin@niime.ru, +7 (903) 531-23-40

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: произведён обзор основных, с точки зрения влияния на электрофизическое поведение МОП-транзистора, эффектов близости (LDE), предложены подходы к созданию специализированных тестовых структур, предназначенных для их последующего измерения, экстракции SPICE-параметров и интеграции результатов в компактную модель.

Ключевые слова: LDE-эффекты, МОП-транзистор, SPICE-параметры, моделирование, BSIM4, тестовая структура, экстракция.

Введение

Характеристики транзистора, выполненного по глубоко субмикронным нормам проектирования [1] зависят не только от его геометрии, но также и от непосредственного окружения другими элементами ИС. Влиянию непосредственного окружения транзистора на его электрофизические параметры присвоено определение «эффекты близости» (в англоязычной литературе «layout dependence effects» или LDE-эффекты). В результате уменьшения размеров между элементами топологии, LDE эффекты оказывают существенное влияние на электрофизические параметры прибора.

Эффекты близости

Случайный характер отражения высокоэнергетичных ионов от торцов фоторезистивной маски в ходе операции ионного легирования при формировании кармана, обуславливает сдвиг порогового напряжения прибора (т.н. WPE-эффект). Дистанции между активными зонами транзисторов и расстояние между поликремниевым затворами также формируют 2 отдельных LDE эффекта – OSE и PSE, соответственно. Особо следует выделить механическое напряжение кристаллической решётки кремния (LOD-эффект) в области канала, вызванное близостью щелевой изоляции STI типа. Данный тип стресса оказывает наиболее значимое влияние на электрофизические параметры транзистора (ток стока в открытом состоянии I_{on} , а также пороговое напряжение V_{th}) [2]. Для обеспечения в SPICE-модели прибора учёта LDE-эффектов, необходим набор тестовых элементов с вариацией размеров между топологическими элементами, чувствительность к которым проявляет конечный эффект. Схематично соотнесённые с конечными эффектами (LOD, WPE, PSE, OSE) основные конструктивные параметры транзисторной структуры указаны на рисунке 1.

Оценка объема, основанная на разработке состава и топологии тестовых элементов, необходимых для полноценного учёта обозначенных выше эффектов в SPICE-модели 28 нм МОП-транзистора позволяет заявлять, что для обеспечения набора необходимых вариацией конструктивных факторов, требуется включение в состав тестового кристалла порядка 140 полос по 6 элементов в каждой (таким образом общее количество элементов составляет порядка 840 для n- и p-канальных приборов в совокупности).

Необходимость учёта LDE-эффектов, а также корректность применяемого подхода разработки макромодели для их учёта, продемонстрирована на графиках рисунка 2, на которых отражены результаты моделирования n-канального транзистора с соотношением $W/L=30\text{нм}/260\text{нм}$, а именно: зависимость тока стока в открытом состоянии (I_{on}) и порогового напряжения (V_{tlin}) от расстояния между торцом

поликремниевому затвору до STI (параметр SA), т.е. условий при которых проявляется LOD-эффект. Используемая SPICE-модель, разработана с использованием данных расчётного эксперимента.

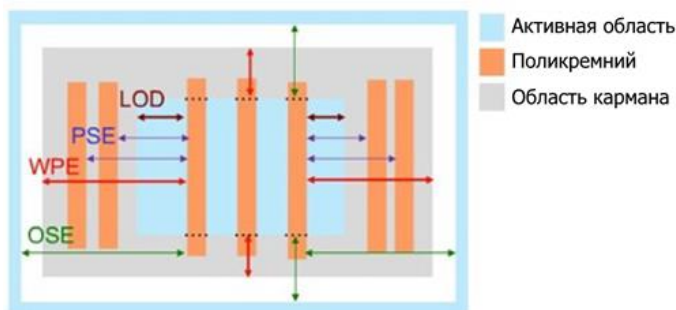


Рисунок 1 – Схема зависимости LDE-эффектов от топологических параметров

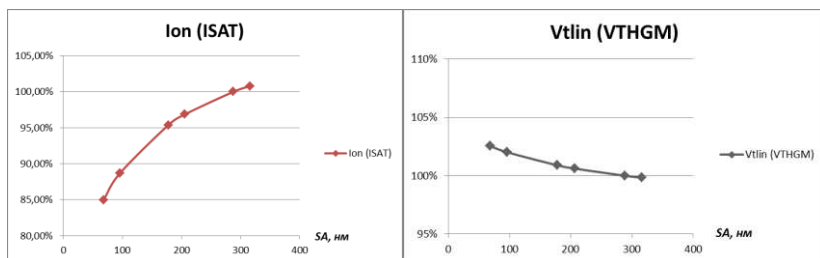


Рисунок 2 – Зависимость электрофизических параметров МОП-транзистора от его конструкции

Выводы

Обеспечение учёта LDE-эффектов в SPICE-модели глубоко субмикронного МОП транзистора, требует выделения для этих целей значительной площади тестового кристалла. Подход с использованием макромодели, интегрированной в основную модель транзистора, который заключается в наличии добавочных расчётных коэффициентов к основным параметрам модели BSIM4, имеющих прямой физический смысл (u_0 , v_{th0} , η_0 ...), доказывает свою применимость на

практике. Зависимость основных электрофизических параметров от конструкции прибора воспроизводится корректно.

Список использованных источников

1 Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Москва ТЕХНОСФЕРА 2011. С.441-444.

2. Faricelli, J. V., «Layout-Dependent Proximity Effects in Deep Nanoscale CMOS», in 2010 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, CA 2010, pp. 1-8.

MAIN LDE EFFECTS OF DEEP SUBMICRON MOS TRANSISTORS AND APPROACHES TO THEIR CONSIDERATION INTO SPICE MODELS

Dmitriy Svyatoslavovich Shipitsin ¹, Ph.D., design system developing director, dshipitsin@niime.ru, +7 (903) 669-14-01

Aleksandr Georgievich Potupchik ¹, head of department, apotupchik@niime.ru, +7 (903) 506-34-09

Aleksandr Valerievich Shemyakin ¹, head of laboratory, ashemyakin@niime.ru, +7 (903) 531-23-40

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: A review of the main, in terms of the influence on the electrophysical behavior of the MOS transistor, topology-dependent effects (LDE) was performed. Approaches to development test structures designed for their subsequent measurement, extraction of SPICE parameters and integration the results into a compact model are proposed.

Key words: LDE effects, MOS transistor, SPICE parameters, modeling, BSIM4, test structure, extraction.

ВАЛИДАЦИЯ В КРЕМНИИ СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБИС

Коротких Семён Андреевич, инженер-конструктор 2-ой категории¹, skorotkih@niime.ru, +7 (916)888-30-58

Новиков Антон Алексеевич, инженер-конструктор 1-ой категории¹, annovikov@niime.ru, +7(915)149-10-94

Ильин Сергей Алексеевич, начальник лаборатории¹, silin@niime.ru, +7(985)212-83-80

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Задача валидации комплектов средств проектирования (КСП) является крайне важной, поскольку ошибки в проекте, наследованные из средств проектирования, неизбежно приведут к временным и финансовым затратам. Данная работа посвящена исследованию и разработке метода валидации в кремнии средств проектирования СБИС.

Ключевые слова: комплект средств проектирования (КСП), библиотека стандартных цифровых элементов, библиотека интерфейсных элементов, компиляторы памяти, валидация, тестирование.

Введение

Высокая конкуренция и повышение стоимости изготовления проектов в кремнии делают актуальной задачу обеспечения высокого качества КСП [1]. Под качеством следует понимать совокупность критериев: отсутствие ошибок в самом КСП; обеспечение соответствия результатов SPICE-моделирования и измерений в кремнии; Современные средства проектирования в части библиотек стандартных ячеек содержат от нескольких сотен до полутора тысяч логических элементов, в части библиотек интерфейсных ячеек – от нескольких десятков до сотен элементов, в части блоков памяти – сотни и тысячи возможных конфигураций, что существенно затрудняет их полную проверку.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо разработать метод валидации КСП в кремнии.

Постановка задачи

Гарантировать характеристики каждого элемента, будь то стандартная ячейка или блок памяти, входящего в состав КСП, возможно только когда он будет изготовлен в кремнии и для всех требуемых сочетаний температуры и напряжения питания будут проверены все режимы функционирования, все состояния и переходы между ними. Соответственно, актуальной является задача создания общей архитектуры системы валидации. Основные требования к такой системе могут быть сформулированы следующим образом:

1. полнота использования всех элементов КСП;
2. минимизация занимаемой площади и выводов корпуса;
3. обеспечение всех режимов работы элементов;
4. технологическая независимость;
5. низкая чувствительность к составу КСП;
6. возможность автоматизации.

В качестве решения автор предлагает использование специализированного ПО для автоматизированной генерации описания и тестового окружения на языке Verilog с использованием принципов конвейерно-распределительной архитектуры для последующей имплементации в тестовый кристалл. Основная цель разработки метода заключается в обеспечении комплексной валидации в кремнии всех элементов выбранного КСП.

В работе предложен метод валидации КСП в кремнии. Рассмотрены альтернативные решения, показаны их преимущества и недостатки. Разработана архитектура системы валидации. Для автоматизированной генерации поведенческой модели структуры создано специализированное ПО. Проведена апробация предложенного метода при проектировании тестового кристалла для валидации библиотек стандартных цифровых элементов.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Шелепин Н.А., Шипицин Д.С., Игнатов П.В. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов Республика Крым, г.Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. 2019. С.45-47.

SILICON VALIDATION OF DDK

Semyon Andreevich Korotkikh, design engineer, JSC MERI, Moscow, Zelenograd, skorotkikh@niime.ru, +7 (916) 888-30-58

Anton Alekseevich Novikov, design engineer, JSC MERI, Moscow, Zelenograd, annovikov@niime.ru, +7(915)149-10-94

Sergei Alekseevich Ilin, chief of the laboratory, JSC MERI, Moscow, Zelenograd, silin@niime.ru, +7(985)212-83-80

Abstract: The problem of validation of digital design kits is very important. Errors in the project can be derived from a digital design kit what come next is time and financial expenses. This work is devoted to research and development of method of silicon validation of DDK.

Key words: DDK, digital design kit, standard digital cell library, interface elements library, memory compiler, validation, testing.

УДК 536.775, 544.3.01

<https://doi.org/10.29003/m1613.Silicon-2020/242-247>

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗ В ДИОКСИДЕ ГАФНИЯ

Константинов Вячеслав Сергеевич, старший научный сотрудник¹, vkonstantinov@niime.ru, +7 (495) 229-72-76

Итальянцев Александр Георгиевич, д.ф.-м.н., начальник отдела¹, aitalyantsev@niime.ru, +7 (495) 229-72-76

Аннотация: В работе представлены результаты квантово-химических расчётов свободной энергии Гельмгольца тетрагональной фазы диоксида гафния при наличии сжимающего и растягивающего механического напряжения 1 ГПа в различных кристаллографических направлениях в диапазоне температур до 2000 К. Вычисления выполнены с применением расчётов из первых принципов.

Ключевые слова: оксид гафния; фазовые переходы; расчёты из первых принципов; свободная энергия Гельмгольца.

Введение

Значительная доля функциональных материалов микроэлектроники обладает полифазной диаграммой состояния, которая задаёт конечные характеристики структур. Например, фазовый переход в халькогенидах при локальном нагреве применяется в микросхемах памяти на фазовом переходе [1]. Ещё один важный пример такого соединения — это диоксид гафния, который может применяться как функциональный слой в микросхемах сегнетоэлектрической и резистивной памяти [2-3]. Диоксид гафния имеет три практически значимые фазы: моноклинную, тетрагональную и орторомбическую. Орторомбическая фаза определяет наличие сегнетоэлектрического эффекта. Его наличие требует специальных условий формирования структур: легирование, температурный отжиг и механические напряжения [2-3]. В структурах с сегнетоэлектрическим эффектом присутствует значительная доля тетрагональной фазы, что указывает на её взаимосвязь с формированием орторомбической фазы [3]. Таким образом, изучение влияния механических напряжений и температуры на формирование тетрагональной фазы является актуальной задачей, т.к. позволит не только лучше понять структурные превращения в диоксиде гафния, но и более точно определить режимы получения плёнок с заданными характеристиками. Целью настоящей работы стало решение

указанной задачи методом математического моделирования матрицы тетрагональной фазы диоксида гафния на базе расчётов из первых принципов.

Результаты расчётов

Для тетрагональной фазы HfO_2 рассчитана свободная энергия Гельмгольца при температуре до 2000 К в ненапряжённой структуре и в структурах с растягивающими и сжимающими в различных кристаллографических направлениях механическими напряжениями 1 ГПа. Расчёты выполнены в программном комплексе Quantum Espresso v.6.3 [4] с применением GGA [5], псевдопотенциалов [6], сетки Монкруста-Пака размера $4 \times 4 \times 4$ и базиса плоских волн с энергиями до 200 Ридберг на мощностях Гибридного высокопроизводительного вычислительного комплекса (ГВБК) в составе ЦОД ФИЦ ИУ РАН.

Для каждого направления и характера механического напряжения p находились равновесное положение атомов и объём ячеек $V(p)$, которые фиксировались в дальнейших расчётах.

Свободная энергия Гельмгольца рассчитывалась по формуле:

$$F_t = U_t + U_t^{\text{vib}}(T) - TS_t \quad (1)$$

где U_t – энергия основного состояния, $U_t^{\text{vib}}(T)$ – вклад фононных колебаний при температуре T , T – абсолютная температура, S_t – вибрационная энтропия

Фононный вклад для N элементарных ячеек с v атомами в каждой рассчитывался согласно Ландау [7]:

$$U_t^{\text{vib}}(T) = N\varepsilon_0 + TV \sum_{\alpha=1}^{3v} \int \ln \left[1 - \exp \left(\frac{\hbar\omega}{k_B T} \right) \right] g_{\alpha}(\omega) d\omega \quad (2)$$

где $g_{\alpha}(\omega)$ – плотность числа фононных состояний нормального колебания с индексом α , k_B – постоянная Больцмана, V – объём, ε_0 – энергия нулевых колебаний

На рисунке 1 представлены рассчитанные кривые смещения уровня свободной энергии Гельмгольца $t\text{-HfO}_2$ при различном характере механических напряжений.

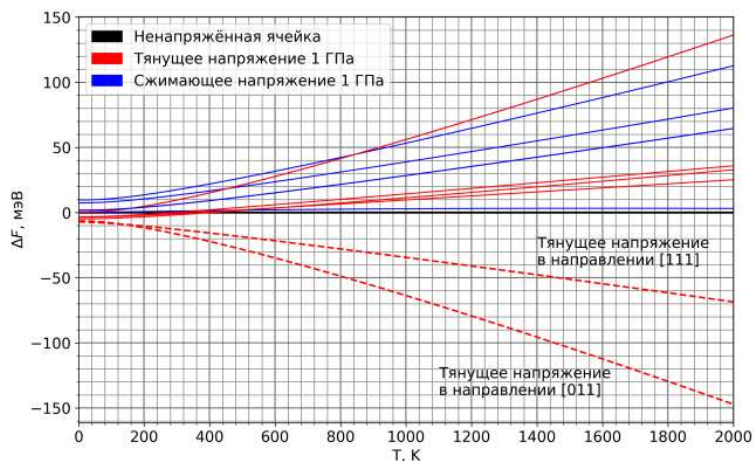


Рисунок 1 – Смещение уровня свободной энергии $t\text{-HfO}_2$ под действием механических напряжений

Как видно из графиков, только растягивающие напряжения вдоль кристаллографических направлений $[011]$ и $[111]$ снижают уровень и усиливают термодинамическую стабильность: при 273 К кривые смещаются вниз на 15 и 12 мэВ, при 800 К — 48 и 28 мэВ соответственно.

Расчёты для растягивающих напряжений 10 и 15 ГПа вдоль направления $[011]$ показывают, что смещение немонотонно зависит от величины напряжения при фиксированной температуре, что согласуются с выводами экспериментальных работ [2-3, 8].

Выводы

Авторы считают, что впервые методами кванто-химического моделирования определены кристаллографические направления механических напряжений, стабилизирующих тетрагональную фазу диоксида гафния, а также даны численные оценки снижения при этом уровня свободной Гельмгольца.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано-и микросистемная техника. – 2015. – No. 4. – С. 60-64.
2. Hyuk Park M. et al. The effects of crystallographic orientation and strain of thin $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ film on its ferroelectricity // Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – No. 7. – С. 072901.
3. Park M. H. et al. Ferroelectricity and antiferroelectricity of doped thin HfO_2 -based films // Advanced Materials. – 2015. – Т. 27. – No. 11. – С. 1811-1831.
4. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / Paolo Giannozzi, Stefano Baroni, Nicola Bonini [и др.] // Journal of physics: Condensed matter. 2009. Т. 21, No 39. с. 395502.
5. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Physical review letters. – 1996. – Т. 77. – No. 18. – С. 3865.
6. Hartwigsen C., Goedecker S., Hutter J. Relativistic separable dual-space Gaussian pseudopotentials from H to Rn // Physical Review B. – 1998. – Т. 58. – No. 7. – С. 3641.
7. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. V. Статистическая физика. Ч. I - 5-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 616 с. - ISBN 5-921-0054-8 (Т. V)
8. Estandía S. et al. Engineering Ferroelectric $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ Thin Films by Epitaxial Stress // ACS Applied Electronic Materials. – 2019. – Т. 1. – No. 8. – С. 1449-1457.

IMPACT OF MECHANICAL STRESS ON PHASE FORMATION IN HAFNIA

*Viacheslav Konstantinov, senior scientific researcher¹,
vkonstantinov@niime.ru,
+7 (495) 229-72-76*

*Aleksandr Italyantsev, Ph.D., head of department¹,
aitalyantsev@niime.ru, +7 (495) 229-72-76*

¹JSC «MERI», Moscow, Zelenograd

Annotation: The results of ab-initio calculations of Helmholtz free energy of tetragonal hafnia, stressed by tensile and compressive stresses of 1 GPa in different crystallographic planes at temperatures up to 2000 K, are presented.

Key words: hafnia; phase transformations; ab-initio calculations, Helmholtz free energy.

УДК 621.3.049.77

<https://doi.org/10.29003/m1614.Silicon-2020/247-251>

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ СОЗДАНИИ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ Н-ТИПА, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО
ТЕХНОЛОГИИ КНИ 0.18 МКМ**

Шипицын Дмитрий Святославович, к.ф.-м.н., директор по развитию систем проектирования¹, dshipitsin@niime.ru, +7 (985) 730-01-05

Потупчик Александр Георгиевич, начальник отдела моделирования¹, apotupchik@niime.ru, +7 (903) 506-34-09

Яшин Георгий Алексеевич, инженер-конструктор 1-й категории¹, аспирант², dyashin@niime.ru, +7 (916) 624-30-89

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: Разработана методика экстракции параметров компактной модели Н-транзистора на основе BSIMSOI 4.5, с учетом паразитных емкостей, а также с применением binning подхода для учета нестандартной зависимости ВАХ от геометрических размеров транзистора.

Ключевые слова: Н-транзистор, SPICE-параметры, моделирование, BSIMSOI 4.5, binning, экстракция, КНИ, МОП-транзистор

Введение

Сложившийся в настоящее время подход к разработке SPICE-модели и экстракции ее параметров, заключается в том, чтобы одна модель полупроводникового транзистора позволяла качественно воспроизводить вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики для набора приборов разных размеров, то есть, она должна быть масштабируема внутри определённого диапазона геометрических значений [1].

В современных моделях, например, семейств BSIM и HISIM, автоматическое масштабирование вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик заложены в выражения. Таким образом, теоретически, можно получить масштабируемую единую модель для всех типоразмеров. Однако, как показывает практика, несмотря на сложный характер формул, получить зависимость электрофизического поведения прибора от его геометрических размеров с необходимой степенью точности зачастую не представляется возможным.

Binning-подход

Для того, чтобы решить проблему некорректного масштабирования в некоторых случаях, используется принцип построения модели, который называется binning. Его суть заключается в том, что осуществляется условное разбиение матрицы транзисторных типоразмеров $[W \times L]$ на квадратные области, смежные друг с другом, и для каждой подобной области, вычисляется свой собственный набор параметров. Таким образом, указанный подход позволяет иметь параметры, которые позволят добиться необходимой точности моделирования ВАХ и ВФХ. В данном подходе, прежде чем передать параметр P в формулу модели, производится вычисления параметра по следующей формуле:

$$P = P_0 + \frac{P_L}{L_{eff}} + \frac{P_W}{W_{eff}} + \frac{P_P}{L_{eff} \times W_{eff}}$$

Принцип построения модели прост: сначала находятся все необходимые параметры P для каждого транзистора,

находящегося в углах заданных геометрических областей, а затем по формуле приведенной выше, вычисляются значения параметров P_0, P_L, P_W и P_P таким образом, чтобы параметр P в углах данной области был примерно равен тому значению, которое мы получили, когда экстрагировали параметр для конкретного типоразмера, находящегося в угле области.

Существует несколько способов использования binning-подхода. Первый, и наиболее полно использующий преимущества binning, это способ, при котором вся область геометрических размеров делится на достаточно маленькие подобласти, и затем в каждом угле ищется набор параметров, при котором мы имеем характеристики, совпадающими с измеренными. Как правило, перед этим находят значения ряда т.н. глобальных параметров, таких как емкости перекрытия, емкости рп-переходов, и некоторых других [2]. Отличительная черта данного способа в том, что binning используется для большого количества параметров, что приводит к получению более формального (математического) типа модели. Второй способ заключается в том, чтобы не делить на отдельные области модель, а использовать некоторые binning параметры P_L, P_W и P_P для задания дополнительной геометрической зависимости параметра P . Третий способ, который используется в данной работе, это комбинированный подход. Он похож на первый способ, за тем лишь исключением, что модель основана по большей части на глобальных параметрах, одинаковых для всех типоразмеров, а binning параметров лишь малая часть (2-5 параметров), при том что области могут быть весьма больших размеров, в отличие от первого способа. Такой подход позволяет сохранить преимущества глобального подхода, как более физичного, с дополнением binning подхода для учета нестандартных геометрических зависимостей.

В данной работе сначала была проведена глобальная экстракция параметров для n- и р-канальных транзисторов N-типа с использованием глобальных бининг-параметров (LDELTA, LNFACTOR, и т.д.), а затем модели были разбиты на несколько областей, в которых в качестве binning параметров использовались U_0 и AGS для транзисторов с длиной >1 мкм и v_{sat} для транзисторов с длиной < 1 мкм. Оптимальное

количество областей определялось опытным путем по критерию малой разницы модельных и экспериментальных характеристик.

Выводы

В результате применения комбинированного подхода, удалось значительно повысить точность модели, а именно у n-канального транзистора максимальная относительная ошибка по линейному току уменьшилась с 15.54 % до 4.28%, по току насыщения с 11.91% до 7.93%; у р-канального транзистора максимальная относительная ошибка по линейному току уменьшилась с 25.63% до 6.11%, по току насыщения с 29.08% до 7.01%. В тоже время, средняя ошибка по линейному току уменьшилась 4.34% до 1.46%, по току насыщения с 4.18% до 2.92%; у р-канального транзистора средняя ошибка по линейному току уменьшилась с 8.76 % до 2.10%, по току насыщения с 12.26 % до 3.62 %

Список использованных источников

1. Yuhua Cheng, Chenming Hu: MOSFET MODELING & BSIM3 USER'S GUIDE– NY.: Kluwer Academic Publishers. 2002 – 478 с.
2. BSIM GROUP: BSIMSOIv4.5.0 MOSFET MODEL Users' Manual – Berkeley : The Regents of the University of California, 2013 – 129 с.

A COMBINED APPROACH TO CREATING MODELS FOR H-TYPE TRANSISTORS MADE USING 0.18 MICRON SOI TECHNOLOGY

Dmitry Svyatoslavovich Shipitsin ¹, Ph.D., director of design systems development, dshipitsin@niime.ru

Alexander Georgievich Potupchik ¹, head of modeling department, apotupchik@niime.ru

Georgy Alekseevich Yashin ¹, design engineer, gyashin@niime.ru, +7 (916) 624-30-89

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: A technique has been developed for extracting the parameters of a compact H-transistor model based on BSIMSOI 4.5, taking into account parasitic capacitances, and also using the binning approach to take into account the non-standard dependence of the I-V characteristic on the geometrical dimensions of the transistor.

Key words: H-transistor, SPICE-parameters, modeling, BSIMSOI 4.5, binning, extraction, SOI, MOS-transistor.

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1615.Silicon-2020/251-254>

ВЛИЯНИЕ ВЕОЛ НА БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СХЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ КНИ250, КНИ180, КНИ90

Шипицын Дмитрий Святославович, к.ф.-м.н., директор по развитию систем проектирования¹, dshipitsin@niime.ru, +7 (903) 669-14-01

Потупчик Александр Георгиевич, начальник отдела¹, apotupchik@niime.ru

Нуштаев Алексей Владимирович, инженер-конструктор¹, anushtaev@niime.ru

¹АО «НИИМЭ», г. Зеленоград

Аннотация: Разработаны тестовые структуры кольцевых генераторов для изучения влияния ВЕОЛ на быстродействие электрических схем при снижении уровня технологий с КНИ250 до КНИ90. Проведены измерения частотных характеристик тестовых структур. Выполнена экстракция паразитных составляющих электрических схем тестовых структур. Проведено сравнение и исследовано влияние различных компонентов паразитных схем для технологий КНИ250, КНИ180, КНИ90.

Ключевые слова: КНИ, ИС, металлизация, задержки, быстродействие

Введение

При снижении норм проектирования технологий от субмикронного до глубокого субмикронного уровня в силу миниатюризации геометрических размеров МОП-транзисторов происходит уменьшение емкостей затворов с одновременным усложнением и увеличением общей длины линий металлизации и количества межсоединений компонентов интегральных схем [1]. Это в свою очередь приводит к росту паразитных RC составляющих и увеличению вклада металлизации и межсоединений (BEOL) в снижение быстродействия [2].

Основная часть

Для оценки влияния межсоединений и паразитных RC составляющих на быстродействие ИС, выполненных по технологиям КНИ250, КНИ180, КНИ90 в тестовом кристалле были разработаны и произведены тестовые структуры, представляющие из себя кольцевые генераторы (КГ), состоящие из кольца инверторов, делителя частоты и выходного буфера. Измерения частотных характеристик проводились с использованием аппаратно-программного комплекса компании Keysight [3].

В дальнейшем была проведена процедура экстракция паразитных составляющих (PEX) топологии кольцевых генераторов и моделирование их электрических схем с учетом паразитных составляющих металлизации и без них [4],[5].

Задержка на вентиль рассчитана из частоты КГ по следующей формуле:

$$T_{\text{delay}} = \frac{1}{2 \times N \times F}, \text{ где}$$

N – количество каскадов инверторов в кольце КГ, F – частота кольцевого генератора.

Относительная задержка кольцевого генератора на вентиль была рассчитана по формуле:

$$T_{\text{delay}} (\%) = \left(\frac{T_{\text{delay}}_{\text{nopar}} - T_{\text{delay}}_{\text{par}}}{T_{\text{delay}}_{\text{nopar}}} \right) \times 100 \%, \text{ где}$$

$T_{\text{delay}_{\text{порар}}}$ – задержка на вентиль без учета BEOL, $T_{\text{delay}_{\text{par}}}$ – задержка на вентиль с учетом BEOL.

Выводы

В целях определения степени влияния BEOL на быстродействие схемы разработаны и произведены в кристалле тестовые структуры кольцевых генераторов для технологий КНИ250, КНИ180, КНИ90.

Выполнена экстракция паразитных составляющих схем КГ и проведено моделирование с учетом паразитов и без. В ходе исследования вклада BEOL в снижение быстродействия схем было выявлено, что с уменьшением уровня технологии с КНИ250 до КНИ90 влияние паразитных составляющих возрастает более чем в 3 раза, с 13% до 47%.

Таким образом, при переходе технологий на нормы проектирования глубокого субмикронного уровня (100нм и ниже) значительно возрастает вклад межсоединений и металлизации на задержку сигнала, что необходимо учитывать при разработке и проектировании ИС.

Список использованных источников

1. Г. Я. Красников Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — с.44-81.
2. Ertugrul Demircan, “Effective of Interconnect Process Variations on Signal Integrity”, SOC Conference, 2006 IEEE International, pp. 281-284.
3. Device Modeling and Characterization Products // URL: <https://www.keysight.com/ru/pc-2389500/device-modeling-and-characterization-products?&&cc> (дата обращения: 10.06.2020).
4. В. В. Денисенко Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — с.229.
5. Н. А. Шелепин Физические основы моделирования паразитных элементов КНИ КМОП СБИС. Нано- и микросистемная техника. 2015. №5(178).с.9-16.

BEOL IMPACT TO IC PERFORMANCE FOR SOI180, SOI90 AND CMOS180, CMOS90 TECHNOLOGIES

Dmirty Svyatoslavovich Shipitsin¹, Ph.D., design systems development director, dshipitsin@niime.ru, +7 (903) 669-14-01

Alexandr Georgievich Potupchik¹, head of department, apotupchik@niime.ru +7(903)506-34-09

Alexey Vladimirovich Nushtaev¹, lead design engineer, anushtaev@niime.ru +7(926)958-66-45

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: test structures of ring generators for researching BEOL impact to the IC performance were developed. The frequency characteristics of the test structures were measured. The electrical circuit's parasitic components of the test structures were extracted. The impact of various parasitic components on IC performance for SOI180, SOI90 and CMOS180, CMOS90 technologies was studied.

Key words: SOI, CMOS, IC, BEOL, delay, performance.

УДК 004.932.2

<https://doi.org/10.29003/m1615.Silicon-2020/251-254>

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОЛЮМИНИСЦЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАСТИН

Карабанов Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник¹, pvs.solar@gmail.com, +7 (996) 910-07-53

Серебряков Андрей Евгеньевич, к.т.н., старший научный сотрудник¹, sea89s@yandex.ru, +7 (915) 602-09-33

Беляков Олег Александрович, к.т.н., руководитель отдела качества², olegbel1993@gmail.com, +7 (917) 694-10-15

Суворов Дмитрий Владимирович, к.т.н., ведущий научный сотрудник¹, Dmitriy_Suvorov@mail.ru, +7 (910) 562-24-94

Теруков Евгений Иванович, д.т.н., профессор, зав. лабораторией³, +7 (911) 835-39-84

¹ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань

²ООО «ХЕЛИОС-Ресурс», г. Саранск

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Аннотация: в работе проводится методика построения трехмерных изображений внутренней структуры слитка мультикристаллического кремния.

Ключевые слова: мультикристаллический кремний, пластина, трёхмерная модель, фотолюминесценция, дефекты.

Введение

В настоящее время основной технологией получения мультикристаллического кремния является направленная кристаллизация с uniform small-grain nucleation, the so-called high performance mc-Si (HPM) [1]. Ключевой характеристикой мультикристаллического кремния, определяющей качество солнечного элемента, является наличие рекомбинационно-активных дефектов. Плотность и характер их расположения в кремниевом слитке зависит от множества факторов: распределение тепловых полей на этапах кристаллизации и охлаждения, тип и толщина защитного слоя (Si_3N_4) тигля, тип используемого сырья и др.

Трёхмерная модель слитка

В работе представлена методика восстановления трёхмерных изображений рекомбинационно-активных дефектов в объёме выплавляемого слитка методом фотолюминесценции (PL) кремниевых пластин. Для реализации такого подхода были решены следующие задачи:

1) Сортировка изображений интенсивности фотолюминесценции кремниевых пластин в соответствии с их расположением в слитке;

2) Выравнивание и обрезка изображений интенсивности фотолюминесценции кремниевых пластин;

3) Поворот изображения интенсивности фотолюминесценции кремниевых пластин в случае их неправильного размещения в измерительной установке;

4) Регистрация границ зёрен кристаллитов на изображении интенсивности фотолюминесценции;

5) Формирование трёхмерной модели кристаллитов по зарегистрированной границе зёрен кристаллитов на изображениях интенсивности фотолюминесценции.

Выводы

В работе описаны алгоритмы сборки изображений PL в единую трёхмерную модель слитка и продемонстрированы возможности исследования влияния параметров технологии производства мультикристаллического кремния.

Список использованных источников

1. ITRPV 2019 International Technology Roadmap for Photovoltaics Results 2019. 11th Edition // Mechanical Engineering Industry Association, Frankfurt am Main, 2020. - 88 p.

3-D MODEL OF MULTICRYSTALLINE SILICON INGOT BASED ON PHOTOLUMINESCENT IMAGES OF WAFERS

*Karabanov Sergey*¹, Doctor of Technical Sciences, professor, chief researcher pvs.solar@gmail.com, +7 (996) 910-07-53

*Andrey Serebryakov*¹, Ph.D., Senior Researcher, sea89s@yandex.ru, +7 (915) 602-09-33

*Oleg Belyakov*², Ph.D., quality manager, olegbel1993@gmail.com, +7 (917) 694-10-15

*Suvorov Dmitry*¹, Ph.D., leading researcher, Dmitriy_Suvorov@mail.ru, +7 (910) 562-24-94

*Evgeny Terukov*³, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Laboratory, +7 (911) 835-39-84

¹Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

²LLC "HELIOS-Resource", Saransk, Russia

³Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract: The paper presents a technique for generation 3D-images of the internal structure of a multicrystalline silicon ingot.

Key words: multicrystalline silicon, wafer, 3D-model, photoluminescence, defects.

УДК 537.862

<https://doi.org/10.29003/m1616.Silicon-2020/257-260>

МЕТАМАТЕРИАЛ С ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В RFID-МЕТКЕ

*Ларионов Михаил Юрьевич, младший научный сотрудник¹,
xmishax12@mail.ru, +7 (985) 747-67-02*

*Соболев Александр Сергеевич, старший научный сотрудник²,
sobolev@hitech.cplire.ru, +7 (910) 407-18-13*

*Резник Анатолий Юрьевич, главный конструктор RFID-карт¹,
areznik@niime.ru*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва

Аннотация: спроектирована RFID-метка, подложкой которой является метаматериал, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость равную 27. Предложена модель метаматериала, а также методика оценки его диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: метаматериал, элементарная ячейка, электрически малая антенна.

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных задач в области СВЧ, в частности в области RFID, является создание

электрически малых антенн. Для решения этой задачи в данной работе используется метаматериал, обладающий повышенной диэлектрической проницаемостью ϵ (порядка 30 на частоте 867 МГц). Данная частота применяется для радиочастотной идентификации в РФ. Конструкции антенны и метаматериала созданы при помощи численного моделирования в среде CST Microwave Studio.

Основная часть

Метаматериал представляет собой печатную плату на основе СВЧ материала ФАФ-4Д с периодическим массивом металлизированных отверстий. На рисунке 1 показана модель метаматериала. Антенна представляет собой слой металлизации и располагается поверх метаматериала.



Рисунок 1 — Модель метаматериала

За счет малого зазора между антенной и металлизированными отверстиями достигается большая погонная емкость, что приводит к уменьшению фазовой скорости волны, что означает повышенное значение диэлектрической проницаемости метаматериала.

Для оценки диэлектрической проницаемости метаматериала были предложены три разных метода. Первый метод состоит в расчете импеданса элементарной ячейки в конструкции, являющейся четырехполюсником. Второй метод заключается в использовании формулы для S -параметра. Третий метод заключается в экспериментальном измерении

импеданса тестовой антенны на исследуемом метаматериале и моделировании данной структуры. Так, получили среднее значение диэлектрической проницаемости 28.

Выводы

В работе предложена новая конструкция метаматериала на основе печатной платы, предложены методы оценки его параметров, спроектирована RFID-метка на основе разработанного метаматериала.

Список использованных источников

1. И.Б. Вендик, О.Г. Вендик Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // Журнал технической физики, 2013, т.83, вып.1, с 3-28.

2. Г.Я. Красников, П.В. Панасенко, А.В. Волосов «Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники» // Журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника» № 3 (163), 2016г., стр.10-22.

METAMATERIAL WITH INCREASED DIELECTRIC CONSTANT FOR USE IN RFID TAGS

Mikhail Yurievich Larionov, Junior Researcher, Research Institute1, xmishax12@mail.ru, +7(985)747-67-02

Alexander Sergeevich Sobolev, Senior Researcher, Institute of Radio Engineering and Electronics2, sobolev@hitech.cplire.ru, +7(910)407-18-13

Anatoly Yurievich Reznik, Chief Designer of RFID-Cards, Research Institute1, areznik@niime.ru.

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow.

Abstract: An RFID tag has been designed, the substrate of which is a metamaterial with a relative dielectric constant of 27. A model of the metamaterial, as well as a method for assessing its dielectric constant, is proposed.

Key words: metamaterial, elementary cell, electrically small antenna.

Секция 6 «Кремниевая электронная компонентная база для нанoeлектроники, оптоэлектроники, силовой электроники, светоизлучающих структур, фотоприемников, микромеханики и сенсорики»

УДК 681.586.78

<https://doi.org/10.29003/m1617.Silicon-2020/261-263>

ЭФФЕКТ ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗИ В ПОЛЕВОМ ЭЛЕМЕНТЕ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО КНИ МОП ТРАНЗИСТОРА

*Иванов Дмитрий Николаевич, аспирант¹,
ivanovdmitry@rocketmail.com*

*Леонов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., научный
сотрудник², alex25.08@mail.ru*

*Мурашев Виктор Николаевич, д.т.н., профессор¹,
vnmurashev@mail.ru*

¹НИТУ «МИСус», г. Москва

²ИПТМ РАН, г. Черноголовка

Аннотация: в работе показано, что эффект зарядовой связи между затворами КНИ МОП полевых транзисторов наблюдается и в двухзатворных транзисторных магниточувствительных элементах холловского типа с толщиной пленки кремния порядка 200 нм. Определено, что в таких чувствительных элементах, функционирующих в режиме обогащения электронами вблизи интерфейсов Si-SiO₂, эффект зарядовой связи позволяет повысить магнитную чувствительность.

Ключевые слова: Зарядовая связь, транзистор, полевой датчик Холла, датчик магнитного поля.

Введение

Кремний-на-изоляторе (КНИ) является важным материалом кремниевой микро- и нанoeлектроники. В настоящее время транзисторы на основе КНИ структур

активно применяются для создания различного рода физических, химических и биологических сенсоров [1-3]. Преимуществами использования структур КНИ в датчиках, по сравнению с объемными подложками, являются прежде всего повышение рабочих температур элементов вследствие уменьшения токов утечки и появление новых функциональных возможностей.

Объект исследования

Целью данной работы является изучение эффекта зарядовой связи в так называемом полевом датчике Холла (ПДХ), представляющим собой двухзатворный КНИ МОП магниточувствительный тонкоплёночный транзистор с измерительными контактами на боковых противоположных сторонах встроенного n-Si канала, служащими для регистрации эффекта Холла. КНИ ПДХ работает в режиме аккумуляции электронов на границах интерфейсов Si-SiO₂, разделённых областью частичного обеднения.

Выводы

В работе показано, что в ПДХ на основе тонкопленочного КНИ МОП транзистора эффект зарядовой связи позволяет повысить абсолютную магнитную чувствительность датчика. Таким образом, эффект зарядовой связи может быть полезен для повышения магнитной чувствительности датчиков магнитного поля на основе транзисторных чувствительных элементов холловского типа.

Список использованных источников

1. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мальцев П. П., Мокрушин А. Д., Мордкович В. Н., Омеляновская Н. М., Пажин Д. М. Полевой датчик Холла на основе структур «кремний-на-изоляторе» // Микросистемная техника. 2002. №. 10. С. 8–12.
2. H.K. Lim, J.G. Fossum. Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1983. №. 10. PP. 1244 – 1251

3. В.П. Попов, М.А. Ильницкий, О.В. Наумова, А.Н. Назаров. Квантовые поправки для пороговых напряжений, полностью обедняемых КНИ транзисторов с двумя независимыми затворами // Физика и техника полупроводников. 2014. №. 10. С. 1348-1353.

CHARGE-COUPLING EFFECT IN A HALL FIELD ELEMENT BASED ON THIN-FILM SOI-MOS TRANSISTOR

*Dmitry Nikolaevich Ivanov¹, Ph.Dr.,
ivanovdmitry@rocketmail.com*

*Aleksey Vladimirovich Leonov², d.ph.-m.s., alex25.08@mail.ru
Victor Nikolaevich Murashev¹, Dr.of Engineering, professor,
vnmurashev@mail.ru*

¹National University of Science and Technology "MISiS", Moscow

²Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka

Abstract: The Article shows that the effect of charge coupling between the gates of SOI MOS field-effect transistors is also observed in double-gate transistor magnetosensitive Hall-type elements with a silicon film thickness of about 200 nm. It has been determined that in such sensitive elements operating in the electron enrichment mode near the Si-SiO₂ interfaces, the effect of charge coupling makes it possible to increase the magnetic sensitivity.

Key words: Charge coupling, transistor, Hall field sensor, magnetic field sensor.

КРЕМНИЕВЫЕ НАНОПРОВОЛОЧНЫЕ СЕНСОРЫ С ДИЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АНАЛИТА

*Наумова Ольга Викторовна, д. ф.-м. н., доцент¹, зав. лаб.¹,
naumova@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68*

*Зайцева Эльза Гайнуллаевна, инженер¹,
zaytsevaelza@yandex.ru, +7 (383) 330-67-68*

*Асеев Александр Леонидович, академик РАН, д. ф.-м. н., г.н.с.¹,
al.aseev2011@yandex.ru, +7 (383) 330-67-68*

*Генералов Владимир Михайлович д. т. н., в.н.с.²,
general@vector.nsc.ru, (383)-363-47-78*

*Сафатов Александр Сергеевич д. т. н., зав. отделом²,
safatov@vector.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68*

¹ ИФП СО РАН, г. Новосибирск

² ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, Кольцово

Аннотация: Работа посвящена разработке базовых элементов кремниевой биосенсорики с управлением концентрацией аналита переменным электрическим полем и исследованию особенностей поведения аналита вирусной природы в таких устройствах

Ключевые слова: биосенсор, нанопроволоки, кремний-на-изоляторе, диэлектрофорез, вирусы

Введение

Сенсорные устройства на основе кремниевых нанопроволочных полевых транзисторов считаются универсальной платформой для высокочувствительного обнаружения биочастиц различной природы [1, 2]. Фемтомольный уровень детекции к ряду белков, ДНК, РНК и др. биочастиц в таких устройствах ограничен доставкой аналита к сенсорному элементу. Поэтому разработка методов, позволяющих снять ограничения по доставке биочастиц к

сенсорным элементам, с возможностью достижения субфемтомольного уровня их обнаружения является актуальной и ключевой проблемой создания высокочувствительных систем медицинской экспресс-диагностики. Перспективным решением этой проблемы является диэлектрофорез (ДЭФ).

Диэлектрофорез – это электрокинетическое движение диэлектрически поляризованных материалов в неоднородном переменном электрическом поле [3]. Направление силы, действующей на частицу в неоднородном электрическом поле, определяется соотношением диэлектрической проницаемости частицы и среды. Поскольку поляризуемость биочастиц отражает их уникальность, то использование эффекта диэлектрофореза открывает широкие возможности в манипуляции концентрации аналита и фоновых частиц между ДЭФ-электродами.

Целью работы являлось разработка КНИ-сенсоров с ДЭФ-управлением концентрацией аналита и исследование закономерностей поведения аналита вирусной природы в переменном электрическом поле. В качестве аналита в работе использовались вирусы ядерного полиэдроза и вирусы осповакцины из коллекции ФБУН ГНЦ ВБ “Вектор”.

Результаты

В работе: 1) приведены результаты моделирования в среде TCAD Sentarius распределения напряженности электрического поля E в области между латеральными электродами и нанопроволочным сенсорным элементом, показаны особенности распределения E для электродов разных конфигураций, 2) приведены результаты исследований по индикации вирусов в режиме реального времени с использованием разработанных сенсоров, 3) показаны преимущества и ограничения использования ДЭФ-манипуляции аналитом в нанопроволочных сенсорах.

Выводы

Полученные в работе результаты показывают, что изготовленные нанопроволочные сенсоры с ДЭФ-управлением могут быть использованы в качестве компонентной базы сенсорики и способны обеспечить при экспресс индикации биочастиц вирусной природы: 1) чувствительность на уровне $\sim 2 \times 10^{-17}$ М, 2) увеличение отклика в 2-9 раз (по сравнению с откликом сенсоров без ДЭФ-управления) при субатомолярной концентрации аналита, 3) возможность определения зарядового состояния вирусов в тестируемых растворах без модификации поверхности сенсоров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-02091.

Список использованных источников

1. Dmitrienko E., Naumova O., Fomin B., Kupryushkin M., Volkova A., Amirkhanov N., Semenov D., Pyshnaya I., Pyshnyi D. Surface modification of SOI-FET sensors for label-free and specific detection of short RNA analyte // Nanomedicine. 2016. V. 11. N. 16. P. 2073-2082.
2. Генералов В.М., Наумова О.В., Фомин Б.И., Пьянков С.А., Хлистун И.В., Сафатов А.С., Зайцев Б.Н., Зайцева Э.Г., Асеев А.Л. Индикация белка VP-40 вируса Эбола с помощью нанопроволочного КНИ-биосенсора // Автометрия. 2019. Т.55. №6. С.102-107.
3. Qian C., Huang H., Chen Liguu, Li X., Ge Z., Chen T., Yang Z., Sun L. Dielectrophoresis for Bioparticle Manipulation // Int. J. Mol. Sci. 2014. V.15. P.18281-18309.

SILICONE NANOWIRE SENSORS WITH DIELECTROPHORETIC CONTROL OF ANALYTE

Olga Victorovna Naumova ¹, Ph.D., head of laboratory, naumova@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68

Elsa Gainullaevna Zaitseva ¹, engineer, zaytsevaelza@yandex.ru, +7 (383) 330-67-68

Alexandr Leonidovich Aseev ¹, academician of RAS, Ph.D., general researcher, al.aseev2011@yandex.ru, +7 (383) 330-67-68

Vladimir Mikhailovich Generalov ², Ph.D., senior researcher, general@vector.nsc.ru, (383)-363-47-78

Alexandr Sergeevich Safatov ², Ph.D., head of department, safatov@vector.nsc.ru, +7 (383) 330-67-68

¹ ISP SB RAS, Novosibirsk

² FSRI SRC VB VECTOR, Kol'tsovo, Novosibirsk Region

Abstract: This study aims to development of basic elements of silicon biosensors with an analyte concentration by an alternating electric field and investigate the behavior of viruses in devices

Key words: biosensor, nanowires, silicon-on-insulator, dielectrophoresis, viruses.

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Foundation for Fundamental Studies (Grant No. 18-29-02091).

УДК 621.3.019.3

<https://doi.org/10.29003/m1619.Silicon-2020/267-270>

ЗАРУБЕЖНЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭКБ

Соловьев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, АО «НИИМЭ», г. Москва, инженер-электроник кафедры ИЭМС, НИУ МИЭТ, г. Москва, andsolovev@niime.ru, +7(915) 246-89-77

Аннотация: В статье рассмотрены иностранные стандарты определения параметров надежности микросхем, проведен сравнительный анализ методик расчета надежности и их применимость к отечественным микросхемам.

Ключевые слова: Надежность ЭКБ, интенсивность отказов, расчетно-экспериментальный метод оценки надежности.

Введение

Интенсивность отказов (λ) — отношение числа отказавших объектов в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются исправными [1]. Существует ряд западных стандартов - MIL HDBK 217F (США, 1995 г.) [2], RIAC-HDBK-217Plus (США, 2015 г.) [3], IEC TR 62380 (Международная электротехническая комиссия, 2004 г.) [4], FIDES guide 2009 (Франция, 2009 г.) [5]. Также НИИСИ РАН создал методику на основе MIL HDBK 217F, адаптировав ее к отечественным исходным данным.

Методики стандартов

Интенсивность отказов, полученная по справочнику MIL-HDBK-217F, представляет собой интенсивность отказа изделия на один час эксплуатации без учета времени хранения интегральной схемы. Прогнозное значение интенсивности отказов микросхем при эксплуатации определяют как сумму трех слагаемых: слагаемого, определяемого кристаллом микросхемы; слагаемого, определяемого конструкцией и изготовлением микросхемы, как сборочной единицы; слагаемого, определяемого устойчивостью микросхемы к воздействию разряда статического электричества.

Стандарты RIAC-HDBK-217Plus, IEC TR 62380 имеют аналогичный подход к определению надежности ИС. Однако λ в современных стандартах является интенсивностью отказов на 1 календарный час, включающий стадию эксплуатации, хранения и количество включений в год. Стоит отметить, что российские ГОСТы по надежности не предполагают проверку надежности по циклам работа/хранение.

Рассмотрим λ для усредненной схемы, выполненной по КМОП-технологии 0,18 мкм и помещенной в герметичный 256-выводной корпус (таблица 1). По ОСТ В 11 0998-99 время

наработки до отказа рассматриваемой схемы составляет 100 000 часов при температуре 65 °С, время хранения составляет 25 лет.

Таблица 1 – Значения интенсивности отказов

Методика	1 цикл–100000 часов при 65°С
MIL-HDBK-217F	$2,78 \times 10^{-5}$ 1/ч
MIL-HDBK-217F (НИИСИ РАН)	6.05×10^{-8} 1/ч
RIAC-HDBK-217Plus	$8,75 \times 10^{-9}$ 1/ч
FIDES 2009	$1,20 \times 10^{-7}$ 1/ч
IEC TR 62380	$2,17 \times 10^{-8}$ 1/ч

Выводы

Значение интенсивности отказов разнятся в зависимости от выбора используемой методики и/или поправочных коэффициентов. Однако при выборе усредненных поправочных коэффициентов рассматриваемые стандарты дают значения в пределах от 10^{-8} до 10^{-7} 1/ч. Основным определяющим фактором является интенсивность отказов, связанная со статическим электричеством. В некоторых стандартах она составляет более 90 % суммарной интенсивности.

Список использованных источников

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. М: ТЕХНОСФЕРА, 2011. 800с.
2. MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment. (Notice 2) / Department of defense – 28.02.1995.–150 с.
3. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. Reliability Information Analysis Center, 2006.– 182p.
4. IEC TR 62380 Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment, 2004.– 94p.
5. Reliability Methodology for Electronic Systems. FIDES Guide 2009 Edition A, 2010.– 465p.

FOREIGN METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF ELECTRONIC COMPONENTS

Andrey Vladimirovich Solovev, Ph.D., leading design engineer¹, teaching assistant², andsolovev@niime.ru, +7(915) 246-89-77

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

²National Research University of Electronic Technology. Moscow, Zelenograd

Abstract: The article discusses foreign standards for determining the parameters of the reliability of microcircuits, a comparative analysis of methods for calculating reliability and their applicability to domestic microcircuits is carried out.

Key words: reliability of electronic components, Failure Rate, experimental method for assessing reliability.

УДК 621.3.049.774.2

<https://doi.org/10.29003/m1620.Silicon-2020/270-273>

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИ СВЧ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Филиппов Иван Фёдорович, инженер¹, аспирант¹, IFFilipov@sevsu.ru, +7 (978) 730-16-27

Вертегел Валерий Викторович, к.т.н., доцент¹, VVVertegel@sevsu.ru

Гимпиевич Юрий Борисович, д.т.н., профессор¹, gimpilevich@sevsu.ru

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Аннотация: Представлены результаты исследования и разработки твердотельных СВЧ переключателей на основе КМОП технологии с топологическими нормами 180 нм.

Ключевые слова: СВЧ, переключатель, КМОП, Si, SPDT.

Введение

Создание интегральных сверхвысокочастотных (СВЧ) диаграммообразующих модулей, узлов коммутации их функциональных блоков сопряжено с необходимостью разработки высококачественных переключателей (ПРК) различных конфигураций.

В докладе представлены результаты исследования возможных схемотехнических и топологических решений для реализации твердотельных СВЧ переключателей на основе 180 нм КМОП технологии.

Основная часть

В работах [1], [2] показана актуальность разработки КМОП ИМС, содержащих в своём составе СВЧ ПРК. Главной задачей для достижения требуемых параметров ПРК, которую в рамках выбранной технологии решает разработчик, является выбор типа переключающего элемента и схемотехнической реализации устройства на его основе.

Корректная оценка качества СВЧ ПРК должна включать моделирование (на этапе проектирования) и измерение ряда параметров: диапазона рабочих частот; вносимых в открытом состоянии потерь; возвратных потерь по входу и выходу; развязки разомкнутой цепи; времени переключения; точки компрессии по уровню 1 дБ.

По результатам исследования возможных схемотехнических и топологических решений был разработан SPDT-переключатель. Вносимые потери в диапазоне 4—6 ГГц не превышают 2 дБ. Развязка между каналами — не хуже 34 дБ. Возвратные потери по входу/выходу превышают 10 дБ. Точка компрессии 1 дБ по выходу на центральной частоте составляет 10,7 дБм. Площадь топологии ПРК — 0,005 мм².

Выводы

В работе представлен обзор типов, методов и особенностей проектирования интегральных СВЧ ПРК, широко применяемых при построении ИМС диаграммообразующих

модулей. Представлены результаты разработки и моделирования СВЧ ПРК диапазона 4—6 ГГц на основе КМОП технологии. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с характеристиками ближайших известных прототипов. Показана возможность коррекции параметров разработанных ПРК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90128.

Список использованных источников

1. Березняк А. Ф., Коротков А. С. Твердотельные СВЧ переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — Киев: Изд-во КПИ, 2013. — Т. 56, №4. — С. 3 — 28.

2. Березняк А. Ф., Коротков А. С. Твердотельные СВЧ переключатели: схемотехника, технологии изготовления, тенденции развития. Обзор. Часть 2 // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — Киев: Изд-во КПИ, 2013. — Т. 56, №5. — С. 3 — 20.

SI MICROWAVE SWITCHES RESEARCH AND DESIGN

Ivan Fedorovich Filippov, engineer¹, postgraduate¹, IFFilippov@sevsu.ru, +7 (978) 730-16-27

Valeriy Viktorovich Vertegel, Ph.D., Associate Professor¹, VVVertegel@sevsu.ru

Yuri Borisovich Gimpilevich, Advanced Doctor, Professor¹, gimpilevich@sevsu.ru

¹Sevastopol State University, Sevastopol

Abstract: The results of research and design of solid-state microwave switches based on 180 nm CMOS technology are presented.

Key words: microwave, switch, CMOS, Si, SPDT.

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90128.

УДК 621.382.211

<https://doi.org/10.29003/m1621.Silicon-2020/273-276>

ТРЕХОСЕВОЙ МЭМС АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ТОРСИОННЫХ ПОДВЕСОВ

*Науменко Данил Валерьевич, аспирант ¹,
daniil.naumenko@gmail.com, +7 (950) 853-68-53*

*Лысенко Игорь Евгеньевич, д.т.н., г.н.с. ², ielysenko@sfsu.ru,
+7 (918) 511-65-75*

*Ежова Ольга Александровна, к.т.н., м.н.с. ²,
ezhova.08.05@gmail.com, +7 (988) 570-97-26*

¹ КЭС ИНЭП ЮФУ, г. Таганрог

² ИЦ НКБ «МИУС» ЮФУ г. Таганрог

Аннотация: В данной статье описана конструкция трехосевого МЭМС акселерометра на основе высокоаспектных торсионных подвесов.

Ключевые слова: МЭМС, акселерометр, торсионный подвес, конечно-элементный анализ.

Введение

Разработка интегральных микромеханических акселерометров является актуальной задачей. Увеличение толщины приборного слоя инерциальных сенсоров, изготавливаемых по объемной технологии, благодаря развитию технологии глубокого реактивно-ионного травления, позволяет создавать конструкции с толщиной приборного более 100мкм и аспектным отношением до 1:50 [1].

Конструкция акселерометра

МЭМС акселерометр (Рисунок 1а) выполнен на кремниевой подложке 6 имеет инерционную массу 1, четыре z-образных упругих подвеса (Рисунок 1б) 2, металлические контактные площадки 5, неподвижные емкостные гребенки 3 имеют контактные площадки 4. Упругий подвес МЭМС акселерометра состоит из жесткой балки 1 и пары вертикальных торсионных балок 2 и 3. Торсионная балка 2 состоит из двух параллельно соединенных торсионных элементов, что позволяет за счет разноса первичных торсионных элементов изолировать деформацию кручения от деформации изгиба [2,3].

Исследование конструкции выполнено при помощи конечно-элементного моделирования. Выполнен модальный и статический анализ конструкции

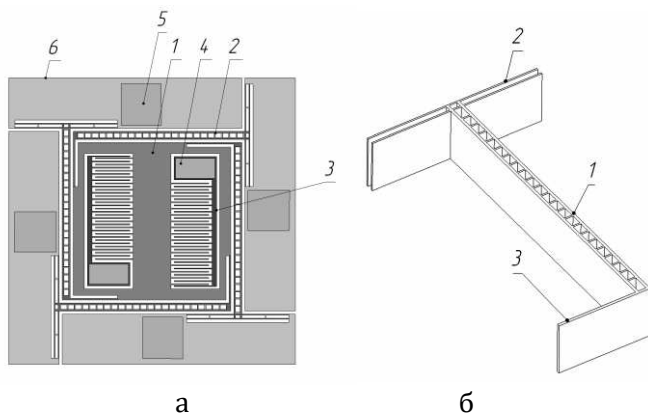


Рисунок 1 – а) Топология МЭМС акселерометра, б) Упругий торсионный подвес

Выводы

Применение высокоаспетных торсионных подвесов в конструкциях МЭМС акселерометров позволят увеличить инерционную массу без увеличения площади чувствительного элемента, благодаря чему можно уменьшить шум, увеличить

чувствительность и уменьшить стоимость чувствительного элемента МЭМС

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта № 19-37-90136\19 «Разработка фундаментальных основ построения высокоаспектных торсионных подвесов для инерциальных МЭМС сенсоров».

Список использованных источников

1. Zhu, J.; Liu, X.; Shi, Q.; He, T.; Sun, Z.; Guo, X.; Liu, W.; Sulaiman, O.B.; Dong, B.; Lee, C. Development Trends and Perspectives of Future Sensors and MEMS/NEMS. *Micromachines* 2020, 11, 7.

2. Alessandro Caspani, Claudia Comi, Alberto Corigliano, Giacomo Langfelder, Valentina Zega, and Sarah Zerbini. "A Differential Resonant Micro Accelerometer for Out-of-plane Measurements" *Procedia Engineering*, vol. 87, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.11.569

3. Miao, T.; Xiao, D.; Li, Q.; Hou, Z.; Wu, X. A 4 mm² Double Differential Torsional MEMS Accelerometer Based on a Double-Beam Configuration. *Sensors* 2017, 17, 2264.

THREE-AXIS MEMS ACCELEROMETERS BASED ON HIGH-ASPECT TORSION SUSPENSIONS

*Danil Valerievich Naumenko*¹, *Ph.D. student,*
danil.naumenko@gmail.com, +7 (950) 853-68-53.

*Igor Evgenievich Lysenko*², *Ph.D., ielysenko@sfedu.ru,*
+7 (918) 511-65-75.

*Olga Alexandrovna Yezhova*², *Ph.D., ezhova.08.05@gmail.com,*
+7 (988) 570-97-26.

¹ *INEP SFedU, Taganrog*

² *NKB "MIUS" SFedU, Taganrog*

Abstract: This article describes the design of a three-axis MEMS accelerometer based on high-aspect torsion gimbals.

Key words: MEMS, accelerometer, torsion beam, finite element analysis.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number № 19-37-90136\19.

УДК 621.3.049.774.2

<https://doi.org/10.29003/m1622.Silicon-2020/276-278>

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ В КВАДРАТУРНЫХ МОДУЛЯТОРЕ И ДЕМОДУЛЯТОРЕ РАЗРАБОТАННЫХ ПО КМОП ТЕХНОЛОГИИ

*Дученко Николай Владимирович, аспирант¹, инженер²,
NVDuchenko@sevsu.ru, +7 (989) 197-39-87*

Поморев Андрей Сергеевич, аспирант¹, инженер²

Харитонов Семен Алексеевич, инженер²

Ковалевский Денис Сергеевич, инженер²

Ветров Игорь Леонидович, к.т.н., с.н.с.²

*¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», г. Севастополь*

*²Общество с ограниченной ответственностью
«Инжиниринговый центр СевГУ», г. Севастополь*

Аннотация: В работе представлены результаты разработки на отечественной КМОП 0,18 мкм технологии широкополосных интегральных квадратурных модулятора и демодулятора с автоматической коррекцией фазовой ошибки в канале гетеродина. Получена фазовая ошибка не более $\pm 0,2$ градуса в диапазоне частот от 0,03 до 1,0 ГГц.

Ключевые слова: квадратурный демодулятор/модулятор, амплитудно-фазовый разбаланс, коррекция, КМОП 0,18 мкм.

Введение

Баланс квадратурных составляющих является необходимым условием работы систем приёма и передачи с

многопозиционной модуляцией. В настоящей работе решается вопрос коррекции фазовой ошибки сигналов гетеродина в квадратурных модуляторе (КМД) и демодуляторе (КДМ).

Теория

В разработанных КМД и КДМ формирователь квадратурных I и Q сигналов (ФКС) гетеродина построен на основе триггерных делителей частоты. Для работы ФКС необходим сигнал с удвоенной частотой гетеродина и скважностью равной 2. Встроенный удвоитель частоты реализован на основе балансного смесителя. На входе и на выходе удвоителя частоты установлены корректоры скважности. Корректор скважности на выходе удвоителя частоты управляется сигналом, уменьшающим фазовую ошибку в I и Q каналах. Принципы работы корректоров скважности описаны в работах [1, 2]. Для выравнивания амплитуд выходных сигналов гетеродина применены усилители-ограничители.

Результаты моделирования

В результате моделирования КМД с автоматической коррекцией фазовой ошибки достигаются следующие параметры в полосе частот от 0,03 до 1,0 ГГц:

подавление сигнала гетеродина не менее 44,9 дБн;

подавление паразитной боковой полосы не менее 52,7 дБн.

В результате моделирования КДМ с автоматической коррекцией фазовой ошибки достигаются следующие параметры в полосе частот от 0,03 до 1,0 ГГц:

фазовая ошибка I/Q не более 0,196 градусов;

амплитудная ошибка I/Q не более 0,26 дБ.

Выводы

В разработанных устройствах по отечественной технологии КМОП 0,18 мкм реализована автоматическая коррекция фазовой ошибки. Это позволило получить в

диапазоне частот 0,03 до 1,0 ГГц фазовую ошибку не более $\pm 0,2$ градусов.

Список использованных источников

1. Мальшин А.В., Ноздрин И.К., Крепак В.И. Корректор скважности синхросигнала // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 90–93.

2. Харитонов С.А., Дученко Н.В. Автоматическая коррекция фазового сдвига в формирователе квадратурных сигналов на основе делителя частоты // Цифровая и аналоговая электроника : матер. докл. XV-ой Междунар. молодежной науч.-техн. конф., РТ-2019, Севастополь, 14—18 октября 2019 г. — Севастополь : изд-во СевГУ, 2019. — С. 149.

QUADRATURE MODULATOR AND DEMODULATOR WITH AUTOMATIC PHASE ERROR CORRECTION DESIGNED IN CMOS TECHNOLOGY

Nikolay Vladimirovich Duchenko, postgraduate¹, engineer²,
NVDuchenko@sevsu.ru, +7 (989) 197-39-87

Andrey Sergeevich Pomorev, postgraduate¹, engineer²

Semyon Alekseevich Kharitonov, engineer²

Denis Sergeevich Kovalevskii, инженер²

Igor Leonidovich Vetrov, s.r., Ph.D.

¹ Sevastopol State University, Sevastopol

² ООО «Engineering center SevSU», Sevastopol

Abstract: This paper describes results of wideband integrated quadrature modulator and demodulator design with automatic correction of phase error. Circuits was designed in domestic 180 nm CMOS technology. The post-simulation results show phase error less than $\pm 0,2$ degree in frequency range of 0,03 to 1,0 GHz

Key words: quadrature demodulator/modulator, amplitude imbalance, phase imbalance, correction, CMOS 0,18 nm.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

*Чуйко Андрей Викторович, аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва,
tchuiko@mirea.ru, +7 (903) 209-31-75*

Аннотация: Разработана модель волнового твердотельного гироскопа, определена зависимость рабочей моды колебаний от амплитуды напряжения на электродах. Разработана функциональная модель гироскопа.

Ключевые слова: волновые твердотельные гироскопы (ВТГ); моды колебаний, резонансная частота.

Введение

ВТГ, представляющие собой микроэлектромеханические системы (МЭМС) [1], обладают низкой стоимостью, малыми массогабаритами, высокими по отношению к другим МЭМС гироскопам показателями надежности и точности.

Настоящая работа посвящена компьютерному моделированию ВТГ, имеющему целью анализ режимов их работы и оптимизацию конструкции.

Моделирование МЭМС ВТГ

С помощью инструментов САПР Coventor построена трехмерная модель ВТГ и выполнено моделирование его амплитудно-частотной характеристики. Амплитудно-частотная характеристика, соответствующей основной моды колебаний, полученная в результате моделирования, приведена на рисунке 1. Резонансная частота рабочей моды колебаний составляет 13.7 кГц, что совпадает с данными экспериментальных образцов прототипов ВТГ [2].

Построена также функциональная схема ВТГ и созданы файлы, описывающие конструкцию. С помощью модуля конвертирования MEMS+ они преобразованы в формат,

пригодный для передачи в САПР Cadence для интегрирования ВТГ в проект системы в корпусе, состоящей из ВТГ и интегральную схему задания режимов работы, схему измерения, АЦП и интерфейс для передачи цифровых данных.

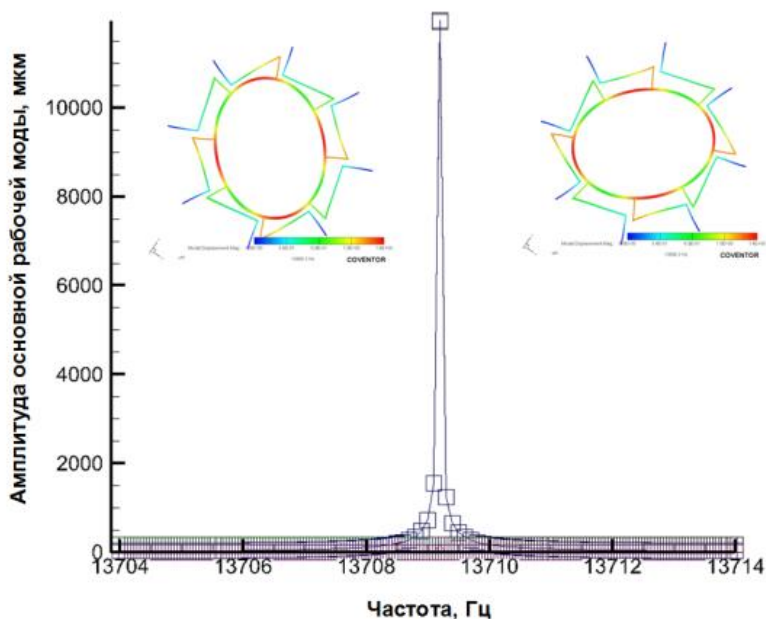


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика рабочей моды колебаний кольцевого резонатора ВТГ и крайние положения стоячей волны

Выводы

Разработан маршрут проектирования и методика определения резонансной частоты ВТГ. Показано, что при заданных параметрах конструкции значение рабочей резонансной частоты согласуется с данными экспериментальных исследований опытных образцов ВТГ. Показано, что максимальные отклонения пучностей вынужденных колебаний на частоте резонанса линейно зависят от амплитуды приложенного напряжения в диапазоне от 0 до 15 В.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП РТУ МИРЭА и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FFSZ-2020-0022).

Список использованных источников

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.

2. Морозов О.В. Изготовление микроэлектромеханических устройств на основе технологии встроенной изоляции в пластине кремния / О.В.Морозов, А.В. Постников, И.И. Амиров, В.А. Кальнов // Нано- и микросистемная техника. 2012. – № 7 – С.15-19.

WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE MODELLING

*Andrey Viktorovich Chuiko, postgraduate student,
tchuiko@mirea.ru, +7 (903) 209-31-75*

RTU MIREA, Moscow

Abstract: A model of wave solid-state gyroscope was developed, the dependence of the vibration working mode on the voltage amplitude on the electrodes were defined. The functional model of the gyroscope was developed.

Key words: wave solid-state gyroscopes (WSG), vibration modes, resonance frequency.

Acknowledgments: the work was performed under supporting of Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (program №FSFZ-0706-2020-0022).

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО ПОЛНОГО НАБОРА ЛОГИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЭМС

Соловьев Александр Анатольевич, аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва, a9670971873@mail.ru, +7 (967) 097-18-73

Аннотация: представлены варианты исполнения логических вентилей функционально полного набора на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Ключевые слова: МЭМС; вентиль; логика; Фредкин

Введение

Особенностью приборов на основе МЭМС является повышенная надежность при воздействии высокой температуры и радиации. Создание логических вентилей на МЭМС является альтернативной вычислительной технологией.

Целью работы является описание вариантов исполнения логических вентилей на основе МЭМС.

Логические вентили на основе МЭМС

В работе [1] представлен универсальный логический вентиль Фредкина на основе МЭМС, с помощью которого возможно построить любые обратимые вычисления.

Балка управляется путем подачи напряжения к одному из боковых электродов. Движение балки обнаруживается путем измерения тока на противоположном боковом электроде.

В работе [2] продемонстрирован логический вентиль «ИЛИ-НЕ» (рис. 1) и «И-НЕ». Под действием электростатической силы пластина наклоняется и приходит в контакт с коммутируемым выходным электродом.

В исследования университета штата Юта США [3] по созданию узлов микропроцессорного набора на основе МЭМС, представлен логический вентиль «Исключающее ИЛИ» (рис. 2) и «Логическое И».

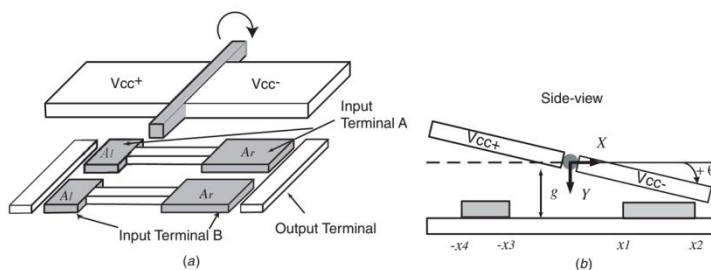


Рисунок 1 – Конструкция МЭМС-устройства, реализующего логическую операцию «ИЛИ-НЕ», (а) объемный и (б) вид сбоку

При контакте областей верхнего (Drain и Gate 1) в нижнего моста (Source и Gate 2), выполняется логическая функция «Исключающее ИЛИ».

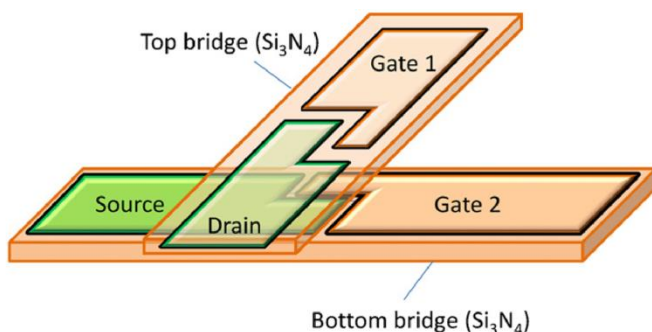


Рисунок 2 – Схема логического вентиля «Исключающее ИЛИ» на основе МЭМС

Выводы

В работе представлены варианты исполнения логических вентилях на основе МЭМС, реализующие логические функции «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ», «Исключающее ИЛИ», «Логическое И» и вентиль Фредкина.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (грант №225ГУЦЭС8-D3/56502) и

Список использованных источников

1. J.-S. Wenzler, T. Dunn, T. Toffoli, and P. Mohanty, «A nanomechanical fredkin gate» Nano Lett., vol. 14, no. 1, pp. 89–93, Jan. 2014
2. Tsai C.-Y., Kuo W.-T., Lin C.-B., Chen T.-L. Design and fabrication of mEmS logic gates // J. micromech. microeng. 2008. V. 18. 045001.
3. F.K. Chowdhury, D. Saab, M. Tabib-Azar, Single-device "XOR" and "AND" gates for high speed, very low power LSI mechanical processors, Sens. Actuators A Phys. 188 (2012) 481–488.

IMPLEMENTATION OF FUNCTIONAL COMPLETENESS SET OF LOGIC GATE BASED ON MEMS

Aleksandr Anatolevich Solovev¹, Ph.D., a9670971873@mail.ru, +7 (967) 097-18-73

¹ MIREA - Russian Technological University, Moscow

Abstract: The variants of execution of logic gates of a functionally complete set based on microelectromechanical systems (MEMS) are presented.

Key words: MEMS, logic gates, logic, Fredkin

Acknowledgments: this work was carried out with financial support from the Federal State Budgetary Institution "Fund for Assistance to Small Innovative Enterprises" (grant No. 225ГУЦЭС8-D3/56502) and Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project No. FSFZ-0706-2020-0022).

РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ В ЕДИНОМ КОРПУСЕ

Михайлов Виктор Юрьевич, инженер-конструктор 2 категории¹, vmikhaylov@niime.ru, +7 (916) 275-72-66

Пронин Алексей Александрович, ведущий инженер-конструктор¹, alpronin@niime.ru, +7 (926) 812-40-81

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Представлены результаты моделирования совмещенной системы радиосвязи и радиолокации, использующей в качестве зондирующего сигнала OFDM. Рассмотрены основные схемо- и системотехнические решения, позволяющие объединить в многофункциональную систему радиосвязь и радиолокацию.

Ключевые слова: OFDM локатор, электронная компонентная база, быстрое преобразование Фурье (БПФ), многочастотная локация, обработка радиолокационной информации, системы связи, структурная схема

Введение

Развитие электронной компонентной базы микроэлектроники позволило сделать архитектуры радиочастотного тракта системы наземной связи и радиолокатора идентичным. Кроме того, современные системы наземной связи используют диапазоны волн, которые традиционно применялись в радиолокации. Поэтому идеи совмещения радаров и систем связи начали появляться в 1990-х годах. Благодаря появлению новых электронных компонентов, в системах связи стали использовать OFDM-сигналы (orthogonal frequency-division multiplexing), которые по своим характеристикам схожи с ЛЧМ-сигналами, используемых в радиолокации[1-3].

Расчет основных параметров многофункциональной системы радиосвязи и радиолокации

Расчет основных характеристик многофункциональной системы проводился на основе параметров существующих систем связи (LTE, Wi-Fi 802.11ac, Wi-Fi 802.11ax, 5G FR1, 5G FR2, NB-IoT) и эффективная площадь рассеивания (ЭПР) цели от 0,01 до 1 м² [4].

С учетом полученных параметров рассмотрены основные схемотехнические решения, позволяющие объединить в многофункциональную систему радиосвязь и радиолокацию. Приведены структурные схемы вариантов реализации многофункциональной системы радиосвязи и радиолокации.

Выводы

Объединение в многофункциональной системе радиосвязи и радиолокации позволяет создать устройство, работающее с OFDM-сигналами, для интеллектуальных транспортных систем или для управления беспилотных летательных аппаратов на расстояниях до 100 метров с предельной измеряемой скоростью 450 м/с.

Список использованных источников

1. M. Uchida, Y. Kagawa, and A. Okuno, «A vehicle-to-vehicle communication and ranging system based on spread spectrum techniques communication radar» in Vehicle Navigation and Information Systems Conference. Proceedings, Aug. 1994, pp. 169 – 174.
2. J. Fink and F. K. Jondral, «Comparison of ofdm radar and chirp sequence radar» in Radar Symposium (IRS), 2015 16th International, vol. 1. IEEE, 2015, pp. 315– 320
3. J. Fink and F. K. Jondral, «A Numerical Comparison of Chirp Sequence versus OFDM Radar Waveforms», 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), Boston, MA, 2015, pp. 1-2.

4. Сколник М.И. Справочник по радиолокации. Книга 1. - М.: Техносфера, 2015. 672 с.

IMPLEMENTATION OF A MULTIFUNCTIONAL RADIO COMMUNICATION AND RADAR LOCATION SYSTEM IN A SINGLE CASE

Victor Yurievich Mikhailov¹, design engineer,
vmikhaylov@niime.ru, +7 (916) 275-72-66
Pronin Alexey Alexandrovich¹, design engineer,
alpronin@niime.ru, +7 (926) 812-40-81

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: The paper presents the results of modeling a combined radio communication and radar system using OFDM as a sounding signal. The main circuit and system solutions are considered, allowing to combine radio communication and radar into a multifunctional system.

Key words: OFDM locator, electronic component base, fast Fourier transform (FFT), multi-frequency location, radar information processing, communication systems, block diagrams.

УДК 621.3

<https://doi.org/10.29003/m1626.Silicon-2020/287-290>

ЦИФРОВОЙ УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ПОДАВЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА ДЛЯ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА НА БАЗЕ КНИ 90НМ

Горчакова Мария Алексеевна, инженер-конструктор¹,
аспирант², mgorchakova@niime.ru, +7 (915) 343-40-67
Кочетков Дмитрий Валерьевич, инженер-конструктор 2
категории¹, аспирант³, dkochetkov@niime.ru, +7 (922) 800-45-41

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: Данная работа посвящена разработке цифрового умножителя частоты, работающего от источника опорного напряжения, с подавлением температурных эффектов и устойчивого к изменению напряжения на высокоскоростных технологиях с проектными нормами 90нм для БМК.

Ключевые слова: умножитель частоты, ИОН, БМК, МОП.

Введение

В настоящее время при проектировании цифровых ИС часто необходимо поддержание стабильной работы частей схемы с учетом разных условий эксплуатации [1]. Изменение температуры, напряжения, а также технологический разброс параметров транзисторов значительно влияет на функциональную составляющую элементов устройства и может привести к некорректной работе всего изделия [2]. Именно поэтому при разработке необходимо уделить особое внимание решению данной проблемы.

Основная часть

В статье [3] авторы приводят пример работы термостабильного генератора, устойчивого к изменениям и температуры, и напряжения питания. Основываясь на особенностях работы МОП-транзисторов и температурных свойствах работы диодов достигается снижение влияния температурных эффектов в результате компенсации образующихся зависимостей.

Данная работа посвящена разработке цифрового умножителя частоты, работающего от источника опорного напряжения, с подавлением температурных эффектов и устойчивого к изменению напряжения. Цифровые умножители частоты часто используются для генерации нового синхросигнала уже внутри самой микросхемы, поэтому первостепенной задачей является получение на выходе постоянного импульса с коэффициентом заполнения 0.5. Так

как архитектуры умножителей часто включают в себя такие элементы как генераторы и задержки, необходимая точность преобразования внутреннего сигнала может быть снижена из-за вышеперечисленных факторов.

Выводы

Впервые было проведено использование источника опорного напряжения для устранения ухода параметров схемы в разных технологических углах на высокоскоростных технологиях с проектными нормами 90нм для БМК на отечественном производстве.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.
2. Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits // McGraw-Hill, 2001. - .684 p.
3. Белоусов Е.О., Кочетков Д.В., Моленкамп К.М., Эннс А.В. Термостабильный генератор с подавлением температурных эффектов первого и второго порядка. // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2018. №4 (172). С. 24-30.

A DIGITAL FREQUENCY MULTIPLIER WITH SUPPRESSION OF TEMPERATURE FIRST-ORDER EFFECTS FOR ULA IN 90NM SOI TECHNOLOGY

Maria Alekseevna Gorchakova, design engineer¹, postgraduate student², mgorchakova@niime.ru, +7 (915) 343-40-67

Dmitry Valerievich Kochetkov, design engineer of the 2nd category¹, postgraduate student³, +7 (922) 800-45-41

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

³National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd

Abstract: This article deals with the design of a digital frequency multiplier which operates from the bandgap voltage reference and has the suppression of temperature effects and resistance to voltage changes in 90nm high-speed technologies for ULA.

Key words: frequency multiplier, BVR, ULA, MOS.

УДК 621.319.4

<https://doi.org/10.29003/m1627.Silicon-2020/290-293>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАННЫХ В КРЕМНИЕВЫЙ ИНТЕРПОЗЕР КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ 3D СВЧ МОДУЛЕЙ

Баранцев Андрей Сергеевич, инженер¹, аспирант², andrewbarancev@gmail.com, +7 (999) 861-78-97

Баранов Глеб Владимирович, к.ф.-м.н., начальник лаборатории¹, gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42

Волосов Анатолий Викторович, начальник отдела¹, к.т.н, avolosov@niime.ru, +7 (926) 089 79 54

Нефедьев Сергей Васильевич, главный специалист¹, к.т.н, snefedev@niime.ru, +7 (906) 781-69-11

Россов Александр Сергеевич, младший научный сотрудник¹, аспирант³, arossov@niime.ru, +7 (925) 042-47-06

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

³МИЭТ, г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Данная работа посвящена анализу конструктивных решений конденсаторов, интегрированных в переходные платы на основе Si (интерпозеры) для 3D СВЧ модулей, а также исследованию электрофизических

параметров конденсаторов, разработанных по перспективной топологии на основе щелевой конструкции.

Ключевые слова: конденсатор, интерпозер, СВЧ модуль

Введение

Тенденция снижения габаритных параметров СВЧ модулей требует масштабирования пассивных элементов, в том числе и конденсаторов.[1] В СВЧ модулях требуется большое количество конденсаторов различных номиналов, в том числе и очень высокой емкости (более 1 нФ), которые требуют большой площади для их формирования.

Построение 3D СВЧ модулей на основе кремниевых интерпозеров открывает возможность использования интегрированных МИМ и МДП конденсаторов на основе технологий кремниевой электроники. Это позволяет снизить планарные размеры конденсаторов за счет использования сложных рельефных структур. Такие конденсаторы обладают меньшими токами утечки и меньшими паразитными эффектами. [2]

Основная часть

В работе рассмотрены основные конструктивные решения известные из литературы [2,3], проведен их сравнительный анализ. Предложена конструкция рельефного МДП конденсатора, интегрированного в объеме кремниевой подложки. Проведено моделирование данной структуры и измерение образца. Проведен анализ полученных данных и на их основе предложена эквивалентная схема конденсатора.

Выводы

Авторы считают, что разработка конденсаторов высокой удельной емкости на основе кремниевого интерпозера для 3D СВЧ модулей является актуальной задачей для создания СВЧ элементной базы и сложнофункциональных модулей нового поколения, а также закладывает научно-технические основы

для организации отечественного производства нового типа продукции.

Список использованных источников

1. Г.Я. Красников, П.В. Панасенко, А.В. Волосов Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016, №3(164). С 10-22.

2. F. Roozeboom, R.J.G. Elfrink, Th.G.S.M. Rijks, J.F.C.M. Verhoeven, A. Kemmeren and J.E.A.M. van den Meerakker High-Density, Low-Loss MOS Capacitors for Integrated RF Decoupling // Proceedings 34th Int. Symp. on Microelectronics (IMAPS 2001), Baltimore, Oct. 9-11, 2001, pp 477-483.

3. Kalavathi Subramaniam, Albert Victor Kordesch, and Mazlina Esal Design and Modeling of Metal Finger Capacitors for RF Applications // 2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings, pp 293-296.

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF CAPACITORS INTEGRATED INTO SILICON INTERPOSERS FOR 3D MICROWAVE MODULES

Andrey Sergeevich Barantsev, engineer¹,
andrewbarancev@gmail.com, +7 (999) 861-78-97

Gleb Vladimirovich Baranov, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, head of laboratory¹, gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42

Anatoly Viktorovich Volosov, Ph.D. in Engineering, head of department¹, avolosov@niime.ru, +7 (926) 089 79 54

Sergey Vasilevich Nefedev, chief specialist¹, Ph.D. in Engineering, snefedev@niime.ru, +7 (906) 781-69-11

Alexander Sergeevich Rossov, research assistant¹, postgraduate student², arossov@niime.ru, +7 (925) 042-47-06

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: This work is devoted to the analysis of the design solutions of capacitors integrated into transition boards based on silicon (interposer) for 3D microwave modules and the study of the electrophysical parameters of capacitors developed according to a promising topology based on a trench design.

Key words: capacitor, interposer, microwave module.

УДК 621.382.82

<https://doi.org/10.29003/m1628.Silicon-2020/293-295>

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ СВЧ СХЕМАМИ В ППМ АФАР

Макиевский Юрий Александрович, м.н.с., АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград, магистр, МФТИ, г. Долгопрудный, y.makievskiy@gmail.com, +7 (903) 192-74-35

Аннотация: Представлена концепция построения модуля управления СВЧ приемо-передающим модулем в составе активной фазированной антенной решетки (АФАР). Универсальный модуль управления предназначен для получения команд от системы управления антенной, выдачи команд на многоразрядные фазовращатели, аттенюаторы и коммутаторы, обеспечение адресации модуля. Реализована логика присвоения абонентам адресов, разделения абонентов на группы.

Ключевые слова: Приемно-передающий модуль, интерфейс управления, фазовращатели, аттенюаторы, активная фазированная антенная решетка

Введение

Популярность АФАР в последнее время набирает все большие обороты. По сравнению с обычным радаром, АФАР

может обеспечить более высокую следящую способность и надежность. Поэтому ими сейчас оснащены большинство спутников, истребителей и других систем. Ключевые проблемы АФАР — это рассеивание мощности и стоимость [1].

ППМ является неотъемлемой частью АФАР, и с развитием технологий постоянно претерпевает различные технологические и топологические изменения. Плюс ко всему существует множество реализаций СВЧ узлов внутри ППМ, разработанные под разные задачи, и возникает необходимость адаптации всей системы к электронной компонентной базе, иначе приходится заменять всю систему АФАР целиком. Для простоты внедрения изменений требуется универсальное решение по управлению ППМ.

Методы управления

В данный момент наиболее популярным решением для управления СВЧ узлами внутри ППМ является преобразователь кодов на базе сдвигового регистра. Преимущества такого модуля управления – это гибкость, простота интеграции, доступность. Но существенным недостатком является большое количество проводников для получения команд от системы управления [2].

Существует решения по управлению СВЧ узлами через цифровой протокол [3]. Устройства с цифровыми протоколами обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными преобразователями кодов (сдвиговым регистром). Главное из них, это переход от безадресного управления к адресному. Это позволяет в разы сократить количество управляющих сигналов.

Список использованных источников

1. Филиппов И.Ф. Исследование и разработка интегральных приемопередающих модулей АФАР / И.Ф. Филиппов, И.В. Кравченко, Д.А. Снегур, В.А. Будняев, В.В. Вертегел, Ю.Б. Гимпилевич // Международный форум «Микроэлектроника-2018». – 2018.

2. Волосов А.В. Особенности технологии изготовления кремниевых коммутационных плат для СВЧ-модулей / А.В. Волосов, М.И. Клычников, Г.Я. Красников, С.В. Нефедьев, П.В. Панасенко, Н.А. Щербаков, М.Д. Пяточкин // Международный форум «Микроэлектроника-2018». – 2018.

3. Бровкин А.Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами : Учебное пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Под редакцией А.С. Сырова – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ , 2010. – 304с.

RESEARCH OF MICROWAVE CIRCUITS CONTROL COMPUTER APPLIANCES IN RECEIVER-TRANSMITTER MODULE OF ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA

Yuri Aleksandrovich Makievsky, design engineer¹, master², y.makievskiy@gmail.com, +7 (903) 192-74-35

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: Design conception of control module of microwave receiver-transmitter module of active phased array antenna is presented in this work. Universal control module is designed for reception of commands from antenna control system and transmission of commands to multidigit phase shift modules, attenuators and switches. It also provide module addressing. Logic of assignment of adresses to users and division of them to groups is realised.

Key words: receiver-transmitter module, control interface, phase shift module, attenuator, active phased array antenna.

АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Скуратов Илья Дмитриевич, м.н.с.¹, студент²,
iskuratov@niime.ru, +7 (977) 340 59-22.

Панасенко Пётр Васильевич, д.т.н., Зам. ГД², профессор,
ppanasenko@niime.ru, +7 (985) 132 43-29

Баранов Глеб Владимирович, к.ф.-м.н., нач. лаб.¹,
gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42

Балаклеяский Николай Сергеевич, в.н.с.¹,
balakleyskiy@gmail.com, +7 (909) 631 38-27

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград,

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: на основе интегральной радиофотонной технологии показана возможность построения высокочастотного генератора сигнала произвольной формы в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: радиофотоника, RoF, чирплет, вейвлет.

Описание работы

Генерация сигналов произвольной формы является важным вопросом радиочастотного исследования и локации. На фоне активного развития радиофотоники ввиду её очевидных преимуществ по ряду показателей перед классическими СВЧ системами [1], предлагаются различные методики построения таких генераторов [2]. С развитием технологии радиофотоники появилась возможность реализации данных устройств в интегральном исполнении, что и является предметом исследования настоящей работы. В работе моделируется, изготавливается и исследуется ряд пассивных интегральных радиофотонных структур, включающий резонаторы на направленных делителях, кольцевые резонаторы, несбалансированные интерферометры

Маха-Цендера и различные их сочетания, с целью анализа влияние температурной и производственной нестабильности их характеристик на СВЧ сигнал с линейной частотной модуляцией, генерируемый при пропускании света через перечисленные фильтры и дальнейшем переносе формы его спектра во временную область с помощью среды с высоким показателем дисперсии.

Итоги работы

С этой целью были измерены амплитудно-частотные характеристики исследуемых структур в двух типологически идентичных реализациях, пространственно разделенных на пластине КНИ, и при температуре окружающей среды 25°C и 30°C. На основе результатов исследования проведен Фурье-анализ искажения вида СВЧ-импульса, получаемого в результате использования описанных фильтров. В результате анализа показаны изменения длительности импульса до 5 нс и сдвиг расстояния между импульсами до 4 нс при генерации чирплета с параметром 10 ГГц/нс с помощью фильтра из трех кольцевых резонаторов.

Вывод

Таким образом, были проведены исследования интегрального исполнения генератора СВЧ-сигнала произвольной формы на основе пассивных компонентов кремниевой радиофотоники и проанализирована перспективность такого метода генерации сигнала.

Список использованных источников

1. Marpaung, D., Yao, J. & Capmany, J., Integrated microwave photonics // Nature Photon, № 13, p. 80–90, 2019.
2. J. Yao, Photonic generation of microwave arbitrary waveforms // Optics Communications, т. 284, № 15, pp. 3723-3736, 2011.

ANALYSIS PHOTONIC ARBITRARY WAVEFORM GENERATOR

*Ilya Dmitrievich Skuratov, junior researcher¹, student²,
iskuratov@niime.ru, +7 (977) 340 59-22*

*Nikolay Sergeevich Balakleisky, senior researcher¹,
balakleyskiy@gmail.com,
+7 (909) 631 38-27*

*Gleb Vladimirovich Baranov, Candidate of Physical and
Mathematical Sciences, PI¹, gbaranov@niime.ru, +7 (916) 073-19-42*

*Pyotr Vasilievich Panasenko, Doctor of Technical Sciences,
Deputy CEO², professor, ppanasenko@niime.ru, +7 (985) 132 43-29*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² MIPT (National Research University), Dolgoprudny

Abstract: On the basis of integrated radio-photonic technology, the possibility of constructing a high-frequency generator of an arbitrary waveform in a wide frequency range is shown.

Key words: radio photonics, RoF, chirplet, wavelet.

УДК 53.01

<https://doi.org/10.29003/m1630.Silicon-2020/298-301>

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОВ НА РЕЗОНАНСНУЮ ЧАСТОТУ И ДАЛЬНОСТЬ СЧИТЫВАНИЯ ОБЪЕМНОЙ РАДИОЧАСТОТНОЙ МЕТКИ

*Хрущева Ольга Александровна, техник, АО «НИИМЭ», г.
Москва, Зеленоград, студентка магистратуры, МФТИ, г.
Долгопрудный, olgalemin@mail.ru, +7 (967) 101-99-74*

Аннотация: В данной статье рассматривается влияние металла на резонансную частоту и дальность считывания UHF объемной метки. Получены зависимости данных параметров от расстояния метки до металла.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация; объемные 3D метки; UHF диапазон; полиэтилен; уравнения Максвелла; электромагнитные волны и поля; ближняя зона.

Введение

В данной работе представлены эксперименты по определению влияния металлов на резонансную частоту и дальность объемной радиочастотной метки. Взаимозависимость этих параметров является важным аспектом исследования, так как во многих случаях метки должны крепиться на металл.

Описание работы

Считыватель на расстоянии 0,5 м. излучает электромагнитную волну определенной частоты, (обычно $f=867$ МГц). Конструкция, используемая в опыте, представлена на рисунке 1. Когда ЭМ волна достигает антенны метки, то она отражается антенной и распространяется в направлении считывателя. Если же за антенной на каком-то расстоянии l поставить металлическую поверхность, то ЭМ волна, достигая этой поверхности, также отражается и распространяется в обратном направлении, складываясь с волной, отраженной от метки, в области между считывателем и меткой. В этом случае считыватель регистрирует интерференцию двух волн.

В данной работе исследовалась зависимость дальности считывания и резонансной частоты от расстояния между меткой и металлом. Данные представлены в таблице 1.

Выводы

1. Максимум достигается при контакте метки с металлом.
2. В экспериментах №3, №5, №7 дальность считывания существенно падает (~ 2 раза).
3. В экспериментах №4, №6 дальность считывания почти максимальна.



Рисунок 1 – Конструкция, используемая для определения зависимости дальности считывания и резонансной частоты от расстояния между меткой и металлом

Таблица 1 – Полученные в ходе эксперимента данные

№ эксперимента	Расстояние от метки до металла l , м	Дальность считывания R , м	Резонансная частота f , МГц
1	∞	20	867
2	0	30-31	885-900
3	0,25	17	867
4	0,17	25	867
5	0,15	15	867
6	0,34	28	867
7	0,255	15	867

Список использованных источников

1. Т.Т. Машкова, С.Н. Степанов Основы радиотехники: учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1992, - 232с.
2. Л.А. Вайнштейн Электромагнитные волны, 1951. – 440с.
3. Красников Г. Я. и др. Решение проблемы планаризации рельефа СБИС при переходе к топологическим нормам менее 1 мкм //Электронная промышленность. – 1995. – №. 6. – С. 5-7.

THE IMPACT OF METAL ON A RESONANT FREQUENCY AND READING RANGE OF 3D RFID TAG

*Olga Alexandrovna Khrushcheva, technician, MERI, Zelenograd,
student, MIPT, Dolgoprudny, olgalemin@mail.ru, [+7\(967\) 101-99-74](tel:+7(967)101-99-74)*

Abstract: This article examines the effect of metal on the resonant frequency and read range of the UHF 3D tag. The dependences of these parameters on the distance of the tag to the metal are obtained.

Key words: RFID; 3D tags; UHF range; polyethylene; Maxwell's equations; electromagnetic waves and fields; near zone.

УДК 537.8

<https://doi.org/10.29003/m1631.Silicon-2020/301-303>

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕМНОЙ КОРТОКЗАМКНУТОЙ UHF МЕТКИ

*Эпов Илья Владимирович, инженер, АО «НИИМЭ», г. Москва,
Зеленоград, студент, МФТИ, г. Москва, Долгопрудный,
toniindeath@mail.ru, +7 (977) 491-10-13.*

Аннотация: данная работа посвящена исследованию RFID-систем. Была разработана физическая модель объемной RFID-метки при наличии металлической поверхности. Также в статье приводятся измерения ее АЧХ при различных размерах экрана.

Ключевые слова: RFID, экран, дальность считывания.

Введение

В последнее время в таких сферах деятельности, как оптовая торговля и логистика товаров, розничная торговля, производство или системы управления распределением и

учетом материалов, все большее распространение получают бесконтактные системы RFID [1].

На сегодняшний день известно лишь то, что металлическая поверхность увеличивает дальность считывания объемных UHF меток при близком контакте и сдвигает ее резонансную частоту. Однако до сих пор не проводились исследования зависимости величины сдвига резонансной частоты от размеров металлической поверхности.

Исследовательская часть

В данной работе была построена физическая модель объемной UHF метки, с помощью которой удалось описать сдвиг резонансной частоты метки и увеличение ее дальности считывания при наличии металлической поверхности [2].

Также были проведены измерения резонансной частоты и дальности считывания UHF меток при различных размерах металлической поверхности. Измерения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения резонансной частоты и дальности считывания UHF метки в зависимости от размера экранирующей поверхности.

Характерный размер металла (см)	0	2	10	14	20	40
Резонансная частота (МГц)	880	880	905	900	895	905
Дальность считывания (м)	20.6	21.8	20	28.4	31	31.8

Выводы

В ходе исследования был проведен анализ влияния металлической поверхности на параметры излучения объемной UHF RFID метки. Также удалось показать, что

результаты физического моделирования совпадают с экспериментальными измерениями.

Список использованных источников

1. Финкенцеллер К. RFID-технологии. Справочное пособие пер. с нем. Сойунханова Н. М //М.: Додэка-XXI. – 2010.

2. Песков С. Н. Основы теории линий передачи на высоких частотах. Часть 1: Режимы работы длинной линии/Песков СН. – 2009.

3. Красников Г. Я. Страна должна быть достойна современной микроэлектроники. Рассказывает генеральный директор ОАО" НИИМЭ" и завод" Микрон", член-корр. РАН //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – №. 1. – С. 4-7.

INFLUENCE OF A METAL SURFACE ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF A VOLUMETRIC SHORT-CIRCUITED UHF TAG.

Ilya Vladimirovich Epov^{1,2}, engineer, toniindeath@mail.ru, +7(977)491-10-13.

¹ *JSC MERI, Moscow, Zelenograd*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

Abstract: this paper is devoted to the study of RFID systems. A physical model of a three-dimensional RFID tag in the presence of a metal surface was developed. The article also provides measurements of its frequency response at different shield sizes.

Key words: RFID, screen, reading range.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА-ДЕЦИМАТОРА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ДЕЛЬТА-СИГМА АЦП

Тярин Андрей Сергеевич, студент¹, tyarin.as@phystech.edu,
+7 (999) 965-66-12

Эннс Александр Викторович, к.т.н., начальник
лаборатории², aenns@niime.ru, +7 (495) 229-63-20

¹МФТИ, г. Москва

²АО «НИИМЭ», г. Москва

Аннотация: в данной работе были исследованы различные архитектуры цифровых фильтров (ЦФ), на основе изученных архитектур был реализован цифровой фильтр-дециматор (ЦФД) в среде программирования Verilog.

Ключевые слова: дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровой фильтр-дециматор (ЦФД), СИС-фильтр, FIR-фильтр.

Введение

Дельта-сигма считается типом АЦП с наибольшим из существующих количеством разрядов для одного устройства. Дельта-сигма АЦП состоит из двух частей: дельта-сигма модулятор и ЦФД. Такие преобразователи широко используются в устройствах с небольшим быстродействием. Этим объясняется актуальность данной работы посвященной цифровому фильтру-дециматору в составе дельта-сигма АЦП.

Целью данной работы является разработка фильтра-дециматора, который обладал бы наименьшим током потребления и площадью, на основе изученных архитектур.

СИС-фильтр

Был исследован и разработан СИС-фильтр – это ЦФД, в составе которого используются только интеграторы и дифференциаторы. Данный тип фильтров был выбран для реализации исходного ЦФД, т. к. отсутствие умножителей значительно снижает ток потребления и площадь, занимаемую данным фильтром [1]. Данный фильтр был реализован в Verilog с характеристиками: порядок фильтра – 5; разрядность входного сигнала – 1 бит, а выходного – 16 бит; коэффициент децимации – 32.

FIR-фильтр

Также, был исследован и разработан FIR-фильтр – это ЦФ-корректор, у которого конечная импульсная характеристика. Данный тип фильтров был выбран для реализации исходного ЦФД, потому что он служит корректирующим фильтром для СИС-фильтра [2]. Особенностью данного фильтра является наличие только двух умножителей с применением циклического буфера. Данный фильтр был реализован в Verilog с характеристиками: порядок фильтра – 127; разрядность входного сигнала – 16 бит, а выходного – 24 бит; коэффициент децимации – 2.

Каскадное соединение СИС- и FIR-фильтра

На основе разработанных СИС- и FIR-фильтров, соединённых в каскад, была построена схема ЦФД. Структурная схема ЦФД представлена на рисунке 1.

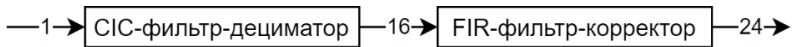


Рисунок 1 – Структурная схема ЦФД

Заключение

По выполненной работе можно сделать следующие выводы: 1) были изучены различные архитектуры ЦФ, используемых в составе дельта-сигма АЦП; 2) были собраны и проанализированы, основные теоретические сведения о СИС- и

FIR-фильтрах; 3) были реализованы составные CIC- и FIR-фильтры; 4) было осуществлено каскадное соединение CIC-фильтра-дециматора и FIR-фильтра-корректора.

Список использованных источников

1. Hogenauer E. An economical class of digital filters for decimation and interpolation //IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing.

2. Baker R. J. CMOS: mixed-signal circuit design. – John Wiley & sons, 2008.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A DIGITAL DECIMATING FILTER FOR APPLICATION IN A DELTA-SIGMA ADC

Andrey Sergeevich Tyarin, student¹, tyarin.as@phystech.edu, +7 (999) 965-66-12.

Alexander Viktorovich Enns, Ph.D., Head of Laboratory², aenns@niime.ru, +7 (495) 229-63-20.

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow*

² *JSC MERI, Moscow*

Abstract: various architectures of digital filters (DFs) were investigated in this work, on the basis of the considered architectures, a digital decimating filter (DDF) was implemented in the Verilog programming environment.

Key words: delta-sigma analog-to-digital converter (ADC), digital decimating filter (DDF), CIC filter, FIR filter.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В КМОП-ТЕХНОЛОГИИ 180 НМ

Дубовицкий Константин Александрович, инженер-конструктор 3 категории¹, kdubovitskiy@niime.ru, +7 (925) 723-81-92

Зубов Игорь Александрович, ведущий инженер-конструктор¹, izubov@niime.ru, +7 (915) 025-86-52

Ермаков Игорь Владимирович, к.т.н., ведущий инженер-конструктор¹, iermakov@niime.ru, +7 (926) 621-31-99

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Представлены результаты разработки и исследования 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения со схемой коррекции устройства-выборки хранения в КМОП-технологии уровня 180 нм.

Ключевые слова: КМОП, АЦП, ЦАП, УВХ, компаратор, регистр последовательного приближения, схема коррекции.

Введение

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) играют важную роль в современном мире электроники, поскольку все большую популярность обретает цифровая обработка сигналов [1]. АЦП реализуют интерфейс между источником аналогового сигнала и блоком цифровой обработки. Архитектура АЦП последовательного приближения является одной из наиболее универсальных и компромиссных по таким основным характеристикам, как скорость и точность преобразования, сложность реализации, число прецизионных элементов и потребление энергии. Для реализации АЦП последовательного приближения, во-первых, необходимо разработать и исследовать функциональные блоки, входящие

в состав архитектуры преобразователя, которые будут иметь оптимальное соотношение параметров, необходимое для выполнения поставленного технического задания (ТЗ). Во-вторых, установить влияние дестабилизирующих факторов на электрические и временные параметры АЦП и разработать схему коррекции.

Исследование АЦП последовательного приближения и разработка схемы коррекции

Улучшение основных параметров аналого-цифровых преобразователей всегда относилась к одним из основных задач микроэлектроники, поскольку они влияют на точность оцифровки аналогового сигнала [2]. Современный аналоговый разработчик, занимающийся проектированием схем АЦП, должен уметь минимизировать влияние внешних дестабилизирующих факторов, таких как технологический разброс [3], вариации напряжения питания и температуры. В ходе работы исследовалось несколько вариантов реализации каждого функционального блока АЦП, которые сравнивались между собой, а их параметры оценивались на предмет удовлетворения требованиям технического задания. Была предложена схема коррекции устройства выборки-хранения [4], позволяющая компенсировать инжекцию заряда в аналоговых ключах. Разработки и исследования проводились на базе современной отечественной КМОП-технологии уровня 180 нм [5].

Выводы

Таким образом, в ходе проделанной работы были разработаны и исследованы функциональные блоки и общая схема 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения со схемой коррекции устройства выборки-хранения, которая позволяет скорректировать выходную передаточную характеристику аналого-цифрового преобразователя и уменьшить ее отклонение от идеальной до ± 1 МЗР.

Список использованных источников

1. Эннс В.И., Кобзев Ю.М., Проектирование аналоговых КМОП-микросхем // горячая линия – телеком, 2015. – 454 с.
2. Шишов О.В., Проектирование аналого-цифровых контрольно-управляющих микропроцессорных систем // Саранск Типография «Красный октябрь», 2001. – 116 с.
3. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, изд. 2-е, испр. [Текст]: Монография / Г. Я. Красников. – М.: Техносфера, 2011. – 800 с.
4. R.J. Baker, CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, Sahibabad: Nisha Enterprises, 2013. – 1044 p.
5. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», История отечественной электроники. В 2-х томах. – М.: 2012.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER OF SERIAL APPROXIMATION IN CMOS TECHNOLOGY 180 NM

*Dubovitskiy Konstantin Alexandrovich¹, analog design engineer,
kdubovitskiy@niime.ru, +7 (925) 723-81-92*

*Zubov Igor Alexandrovich¹, leading analog design engineer,
izubov@niime.ru, +7 (915) 025-86-52*

*Igor Vladimirovich Ermakov¹, Ph.D., leading analog design
engineer, iermakov@niime.ru, +7 (926) 621-31-99*

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: The results of the development and research of a 10-bit analog-to-digital converter of successive approximation with a correction circuit for a storage sampling device in CMOS technology of the 180 nm level are presented.

Key words: CMOS, ADC, DAC, sample and hold, comparator, successive approximation register, correction circuit.

ВЫСОКОЛИНЕЙНЫЙ СЕГМЕНТИРОВАННЫЙ 12- РАЗРЯДНЫЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВОИЧНО-ВЗВЕШЕННЫХ КЛЮЧЕЙ

*Кочетков Дмитрий Валерьевич, инженер-конструктор 2
категории¹, аспирант², dkochetkov@niime.ru, +7 (922) 800-45-41*

*Белоусов Егор Олегович, к.т.н., ведущий инженер-
конструктор¹, ebelousov@niime.ru*

*Моленкамн Ксения Михайловна, главный специалист¹,
kmolenkamp@niime.ru*

*Эннс Александр Викторович, к.т.н., начальник
лаборатории¹, aenns@niime.ru*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²НИУ МИЭТ, г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Разработан экспериментальный образец 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя с высокими показателями линейности. В качестве приемов для улучшения значений интегральной и дифференциальной нелинейности применялись сегментирование и использование двоично-взвешенных ключей.

Ключевые слова: R-2R матрица, сегментирование, интегральная нелинейность, дифференциальная нелинейность.

Введение

В связи с современными тенденциями развития систем на кристалле, возникает необходимость в разработке СФ (сложных функциональных) блоков как цифровых, так и аналоговых. Довольно емкой и востребованной задачей является разработка цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП).

Одним из распространенных видов ЦАП является преобразователь с использованием R-2R резистивной матрицы

[1]. Такие цифро-аналоговые преобразователи могут быть достаточно высокоразрядными, однако, как и преобразователи, использующие в своем составе цепочку резисторов, требуют согласования сопротивлений.

Компенсация сопротивления ключа на общее сопротивление ветви

Поскольку для коммутирования резисторов используются полупроводниковые ключи, имеющие свое собственное сопротивление ΔR , то результирующее сопротивление каждой ветви будет составлять сумму сопротивления резистора и половину сопротивления ключа. В работе [2] было предложено использование так называемых фиктивных ключей для каждого R , однако такой прием усложняет топологическое проектирование, в частности подключение и замешивание резисторов. Для уменьшения влияния ключей на выходную характеристику было решено использовать двоично-взвешенные ключи.

Сегментирование старших разрядов

Также распространенной проблемой при проектировании R - $2R$ ЦАП является одновременное переключение ключей, что приводит к ухудшению параметров нелинейности [2]. В связи с этим было предпринято 2 приема: сегментирование на 8 младших бинарных и 4 старших унарных разряда, что позволяет избежать сильных изменений тока в момент переключения большого количества ключей, и использование формирователя вложенного сигнала [1] для управления ключами, для устранения наложения фронтов управляющих сигналов и, следовательно, замыкания верхнего и нижнего опорных напряжений.

Выводы

Данный комплекс мер позволил получить экспериментальный образец, изготовленный с технологическими нормами КНИ 180 нм с параметрами

интегральной и дифференциальной нелинейностей до 1,92 и 0,93 МЗР по модулю соответственно.

Список использованных источников

1. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика // М.: Горячая линия – Телеком, 2005, 454 с.
2. R.J. Baker, CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, Sahibabad: Nisha Enterprises, 2013. - .1044 p.

HIGH LINEARITY SEGMENTED 12-BIT DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER USING BINARY-WEIGHTED SWITCHES

Dmitriy Valeryevich Kochetkov^{1,2}, postgraduate student, design engineer, dkochetkov@niime.ru, +7 (922) 800-45-41;

*Egor Olegovich Belousov*¹, candidate of Engineering Sciences, lead design engineer, ebelousov@niime.ru;

*Ksenia Mikhailovna Molenkamp*¹, chief specialist, kmolenkamp@niime.ru

*Aleksandr Viktorovich Enns*¹, candidate of Engineering Sciences, laboratory boss, aenns@niime.ru;

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd

Abstract: An experimental sample of a 12-bit digital-to-analog converter with high linearity has been developed. Segmentation and the use of binary-weighted switches were used to improve the values of integral and differential nonlinearities.

Key words: R-2R ladder, segmentation, integral nonlinearity, differential nonlinearity.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ЧАСТИ RFID-МЕТКИ

Любавин Кирилл Дмитриевич, инженер-конструктор 3 категории¹, klyubavin@niime.ru, +7 (968) 845-72-04

Лосевской Александр Юрьевич, ведущий инженер-конструктор¹, alosevskoy@niime.ru, +7 (926) 762-29-26

Ермаков Игорь Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор¹, iermakov@niime.ru, +7 (926) 621-31-99

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Представлены результаты разработки цифровой части RFID-метки и исследования методов снижения энергопотребления в КМОП-технологиях уровня 180 нм, 90 нм и 45 нм. Использование методов позволяет снизить энергопотребление в среднем в два раза для указанных технологий. Для технологии 180 нм максимальная динамическая мощность была снижена с 1.64 до 0.97 мкВт, а занимаемая площадь составила 0.042 мм².

Ключевые слова: КМОП, RFID-метка, методы снижения энергопотребления цифровых схем, проектирование с низким энергопотреблением, цифровые СФ-блоки, оптимизация площади цифровых схем, стробирование тактового сигнала, изоляционные элементы, оптимизация ячеек.

Введение

RFID-метки в настоящее время являются одними из самых массово производимых интегральных схем [1], которые используются во многих сферах человеческой жизни, например, таких как системы контроля и учёта доступа, инвентаризация различных физических объектов, хранение персональной информации животных и человека. Из-за широкой распространённости RFID-систем и дешевизны RFID-

меток, интегральные схемы для них являются одним из самых массовых изделий в микроэлектронике. В связи с этим можно выделить основные требования, предъявляемые к чипам для RFID-меток. Во-первых, компании-разработчики стремятся уменьшить размер кристалла до минимальных размеров с целью снижения стоимости производства. Во-вторых, для увеличения дальности срабатывания необходимо уменьшать потребление энергии чипа, поскольку большая часть транспондеров являются пассивными, то есть не имеющими собственного источника питания [2].

Исследование современных методов снижения энергопотребления цифровых ИС

Минимизация размеров цифровых интегральных схем и уменьшение их энергопотребления всегда относились к основным задачам микроэлектроники. Современный цифровой разработчик, занимающийся проектированием схем с низким энергопотреблением [3-4], должен учитывать множество факторов, таких как физические параметры схемы, технологию производства, методы проектирования с целью сокращения количества используемых элементов и должен уметь их грамотно использовать. В работе рассмотрены методы снижения энергопотребления, такие как стробирование тактового сигнала, введение изоляционных элементов и оптимизация на уровне ячеек [5]. Для трех современных КМОП-технологий (180, 90 и 45 нм) проведено исследование и установлено влияние каждого из рассматриваемых методов на основные характеристики цифровой части метки (площадь, количество используемых ячеек и максимальное динамическое энергопотребление).

Выводы

Комбинирование исследуемых методов позволяет снизить динамическое энергопотребление устройства в среднем на 50 % при незначительном (1-5 %) сокращении площади кристалла. Для КМОП-технологии 180 нм, выбранной для

реализации проекта, максимальная динамическая мощность составила менее 1 мВт, а занимаемая площадь 0.042 мм².

Список использованных источников

1. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, изд. 2-е, испр. [Текст]: Монография / Г. Я. Красников. – М.: Техносфера, 2011. – 800 с.
2. Finkenzeller, K.: RFID Handbook // Wiley, New York. – 2003.
3. Авдеев Н.А., Бибило П.Н. Алгоритмическое проектирование цифровых операционных устройств с пониженным энергопотреблением // МЭС. – 2018.
4. Черемисинова Л.Д. Логический синтез комбинационных КМОП схем с учетом рассеивания мощности // Вестник ТГУ. – 2014. – № 3 (28).
5. Лобанова А. Ю. Анализ эффективности комплексного использования схемотехнических методов снижения энергопотребления сложно-функциональных блоков цифровых СБИС // МЭС. 2012.

STUDY OF METHODS FOR REDUCING POWER CONSUMPTION AND AREA FOR A DIGITAL PART OF THE RFID-TAG

Kirill Dmitrievich Liubavin¹, digital design engineer, klyubavin@niime.ru, +7 (968) 845-72-04

Alexander Yurievich Losevskoy¹, leading digital design engineer, alosevskoy@niime.ru, +7 (926) 762-29-26

Igor Vladimirovich Ermakov¹, Ph.D., leading digital design engineer, iermakov@niime.ru, +7 (926) 621-31-99

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: The results of the development of a digital part for the low-frequency RFID tag and the results of power saving methods study in 180 nm, 90 nm and 45 nm CMOS processes are presented. Using of the presented methods allows to reduce the power consumption and area of the digital part by 400 % and by 50 %, respectively.

respectively. For the target 180 nm CMOS process the maximum dynamic power is less than 1 μ W, and the occupied area is 0.042 mm².

Key words: CMOS, RFID-Tag, digital power consumption reduction methods, low-power hardware design, digital IP blocks, digital hardware area optimizing, clock gating, operand isolation, cell optimization.

УДК 621.376.9

<https://doi.org/10.29003/m1636.Silicon-2020/316-319>

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ МИКРОСХЕМ В
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ НА ОСНОВАНИИ
КРИТИЧЕСКОЙ СОВОКУПНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

Шабанов Андрей Александрович, аспирант¹,
shabanov.andr1@yandex.ru, +7 (966) 008-10-01

Путря Михаил Георгиевич, д.т.н, профессор¹, pmg@miee.ru

¹НИУ МИЭТ, г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Проведено исследование основных параметрических и схемотехнических характеристик микросхем, оказывающих влияние на параметры приемников и передатчиков, используемых в радиолокационной аппаратуре, на основании сравнительного анализа отечественных микросхем и их зарубежных аналогов, и апробирован методический подход по оценке эффективности взаимозаменяемости микросхем иностранного производства на отечественные аналоги.

Ключевые слова: электронная компонентная база, радиолокация, радиоэлектронная аппаратура, ракетно-космическая техника, СВЧ микроэлектроника.

Введение

В настоящее время существует актуальная задача оценки эффективности взаимозаменяемости микросхем в радиолокационной аппаратуре отечественного производства на основании критической совокупности схемотехнических и параметрических характеристик, которую предлагается решить разработкой методики, позволяющей обосновывать необходимость разработки отечественной ЭКБ, формировать ее основные характеристики и показывать влияние на ТТТ радиоэлектронной аппаратуры.

Описание методики

Суть разработанной методики по оценке эффективности взаимозаменяемости микросхем заключается в определении критически важных параметров исследуемой микросхемы (путем сравнения с наиболее конкурентоспособным аналогом), с точки зрения работоспособности, надежности и рабочих характеристик блока (блоков) аппаратуры, где она используется, а также оценке влияния схемотехнических и параметрических характеристик микросхемы на характеристики радиолокационного оборудования.

Апробация методики

Исследование возможности эффективной замены ИС в радиоэлектронной аппаратуре на их улучшенные варианты или аналоги проводилось на примере сравнения модуляторов и демодуляторов.

В настоящее время модуляторы и демодуляторы широко используются в радиолокационной аппаратуре, особенно в передатчиках и приемниках. Характеристики модуляторов и демодуляторов напрямую влияют на характеристики передающего и принимающего трактов соответственно [1].

В ходе первого этапа апробации методики проведен сравнительный анализ разработанного АО «НИИМА «Прогресс» квадратурного модулятора 1327МА015 [2] и

зарубежного аналога ADL5375 [3], используемого в радиолокационных системах.

В качестве критической совокупности параметров сравниваемых ИС в соответствии с разработанной методикой был определен следующий набор параметров: ток потребления, подавление несущей частоты и паразитной боковой полосы, уровень (мощность) выходного сигнала.

Дополнительно было проведено краткое параметрическое сравнение квадратурного демодулятора 1327MB015 [2], разработанного АО «НИИМА «Прогресс», и аналога ADL5380 [3].

Заключение

В результате проведенного исследования определены основные характеристики квадратурных модуляторов и демодуляторов, кратко определены блоки аппаратуры, в которых могут использоваться данные микросхемы, определены характеристики рассмотренной аппаратуры, на которые могут оказывать влияние данные микросхемы, и была апробирована методика по оценке эффективности взаимозаменяемости ЭКБ в радиолокационной аппаратуре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90043.

Список использованных источников

1. Беневоленский С.Б., Метелкин Е.В. и др. Физические основы работы полупроводниковых приборов. – М.: Физматлит, 2003. – 340 с.

2. Сайт АО «НИИМА «Прогресс»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mri-progress.ru/> – (дата обращения: 10.06.2020).

3. Analog devices: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/ru/> – (дата обращения: 10.06.2020).

RESEARCH AND APPROBATION OF THE METHOD OF MICROCIRCUITS INTERCHANGEABILITY EFFICIENCY EVALUATION IN RADAR EQUIPMENT BASED ON CRITICAL PARAMETRIC CHARACTERISTICS SET

Andrei A. Shabanov¹, shabanov.andr1@yandex.ru,
+7 (966) 008-10-01

Mikhail G. Putrya¹, pmg@miee.ru

¹ National Research University of Electronic Technology, Moscow

Abstract: The research of the basic parametric characteristics of integrated circuits that affect the radar equipment was conducted, a comparative analysis of modulators and demodulators was carried out and the methodological approach of assessment of effectiveness of interchangeability of chips in a radar equipment is tested.

Key words: electronic component base, radiolocation, radar equipment, missile and space equipment, microwave microelectronics.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-37-90043.

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1637.Silicon-2020/320-322>

РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ КРИСТАЛЛАХ ДЛЯ НЕЙРОПОДОБНЫХ СИСТЕМ

Панин Геннадий Николаевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, ИПТМ РАН, г. Черноголовка, panin@iptm.ru, +7 (496) 524-40-06.

Аннотация: Исследовано резистивное переключение в низкоразмерных кристаллах для построения энергоэффективных нейроподобных систем, совместимых с кремниевой технологией.

Ключевые слова: резистивное переключение, низкоразмерные кристаллы, нейроподобные системы.

Введение

Для нейроморфных вычислений, подобных в коре головного мозга, необходимы устройства, основанные на новых физических принципах. Для воспроизведения нейронных сетей были предложены устройства с резистивным переключением, способные энергоэффективно имитировать функции нейронов и синапсов. Интерес к этим новым концепциям устройств связан с их способностью хранить информацию в наномасштабе энергонезависимым способом. Кроме того, они позволяют комбинировать память с вычислительной функцией, обеспечивая обработку данных без физического разделения вычисления и хранения.

Результаты и обсуждение

Исследование процессов резистивного переключения в низкоразмерных кристаллах на кремниевых подложках

показало возможность создания на их основе нейроподобных систем [1,2]. Результаты исследований само-собирающихся наноразмерных структур на основе оксида графена/графена на кремнии с использованием фотонных и электронных технологий [3] показывают технологичность процессов формирования структур с высокой плотностью. Гетероструктуры с квантовыми точками на основе графена и дисульфида молибдена, показывают фотоиндуцированные обратимые резистивные переходы полупроводник-метал с контролируемым переключением.

Выводы

Резистивное переключение в низкоразмерных кристаллах, позволяет создавать новые технологичные устройства для нейроподобных систем, совместимых с кремневой технологией.

Работа поддержана РФФИ №19-29-03050 и МНВО РФ 2020-1902-01-088.

Список использованных источников

1. Панин Г. Н. Мемристивные двумерные электронные системы - новый тип логических переключателей и памяти, Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника., 2018, №1(169), С 23-41.
2. Panin G.N., Kapitanova O.O. Memristive Systems Based on Two-Dimensional Materials, Advances in Memristor Neural Networks - Modeling and Applications, Calin Ciufudean, IntechOpen, 2018.
3. Kapitanova O.O., Emelin E.V.,... Panin G.N. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // J. Mater. Sci. Technol., 2020, V38, P 237.

RESISTIVE SWITCHING IN LOW-DIMENSIONAL CRYSTALS FOR NEURAL-LIKE SYSTEMS

Gennady Nikolaevich Panin, Ph.D., Leading Scientist, IMT RAS, Chernogolovka, panin@iptm.ru, +7 (496) 524-40-06

Abstract: Resistive switching in low-dimensional crystals is investigated for building energy-efficient neural-like systems compatible with silicon technology.

Key words: resistive switching, low-dimensional crystals, neural-like systems.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research No. 19-29-03050 and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 13.1902.21.0010.

УДК 004.3:004.9

<https://doi.org/10.29003/m1638.Silicon-2020/322-325>

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОМОРФНОЙ СЕТИ НА МЕМРИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С 1Т1Р КРОССБАР АРХИТЕКТУРОЙ

Морозов Александр Юрьевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник^{1, 2}, morozov@infway.ru, +7 (915) 369-31-67

Абгарян Каринэ Карленовна, д.ф.-м.н., доцент, заведующая отделом^{1, 2}, kristal83@mail.ru, +7 (903) 108-03-40

Ревизников Дмитрий Леонидович, д.ф.-м.н., профессор^{1, 2}, reviznikov@mai.ru, +7 (909) 696-00-16

¹ФИЦ ИУ РАН, г. Москва

²МАИ, г. Москва

Аннотация: В работе выполняется имитационное моделирование аналоговой импульсной нейронной сети с мемритивными элементами в качестве синаптических весов и механизмом обучения на основе правила STDP.

Ключевые слова: мемристор, 1T1R, нейроморфная сеть, импульсная нейронная сеть, STDP, распознавание.

Введение

Мемристор является относительно новым электрическим элементом и представляет собой резистор, проводимость которого меняется в зависимости от суммарного протекшего через него электрического заряда. Из-за определенного сходства между мемристивными элементами и биологическими синапсами, перспективным представляется их использование для аналоговой реализации самообучающихся импульсных нейронных сетей. За счет некоторых схемотехнических решений, о которых пойдет речь в работе, есть возможность изменять проводимость мемристора (синаптический вес) непосредственно в процессе работы системы, тем самым выполняя обучение сети на аппаратном («железном») уровне.

Моделирование нейроморфной сети

Обучение сети организуется с использованием правила Хебба и синаптической пластичности (метод STDP [1], Spike-Timing Dependent Plasticity, согласно которому изменение весов синапсов нейрона зависит от разницы во времени между входным и выходным импульсом). Данный механизм реализуется за счет обратной связи. В момент активации нейрона по каналу обратной связи с задержками поступают два противоположных по знаку импульса. Если на синапсе есть активность и пришел положительный импульс обратной связи, то значение сопротивления соответствующего мемристора уменьшается, а если пришел отрицательный импульс обратной связи, то сопротивление мемристора увеличивается.

Схемотехническая модель нейрона представляет собой параллельную RC цепь и абстрактный генератор импульсов. Как только значение потенциала на конденсаторе превышает некоторый порог, его потенциал сбрасывается, и генератор импульсов выдает выходной сигнал и сигнал обратной связи.

В качестве модели мемристора в работе используется модель с нелинейной зависимостью от напряжения [2], которая описывает мемристор на основе оксида гафния HfO_2 .

Обучение сети происходит следующим образом: в начальный момент времени синаптические веса инициализируются случайным образом, а далее многократно на вход в сеть с равной вероятностью подается или произвольный шум, или заранее определенные шаблоны. В конце процесса обучения каждый нейрон срабатывает только на свой определенный входной сигнал, игнорируя шум.

Выводы

В работе выполнено имитационное моделирование нейроморфной сети на мемристивных элементах. Построенная импульсная нейронная сеть в процессе работы успешно научилась распознавать определенные шаблоны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-03051 мк.

Список использованных источников

1. Ambrogio S. et al. Neuromorphic Learning and Recognition With One-Transistor-One-Resistor Synapses and Bistable Metal Oxide RRAM // IEEE Transactions on Electron Devices, 2016. Vol. 63, no. 4, pp. 1508–1515.
2. Mladenov V. Analysis of Memory Matrices with HfO_2 Memristors in a PSpice Environment // Electronics, 8(4), 383, March 2019, p. 16. DOI: 10.3390/electronics8040383.

SIMULATION OF A NEUROMORPHIC NETWORK ON MEMRISTIVE ELEMENTS WITH 1T1R CROSSBAR ARCHITECTURE

Alexander Yurievich Morozov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher^{1,2}, morozov@infway.ru, +7 (915) 369-31-67

Karine Karlenovna Abgaryan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Head of department^{1,2}, kristal83@mail.ru, +7 (903) 108-03-40

Dmitry Leonidovich Reviznikov, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher¹, Professor², reviznikov@mai.ru, +7 (909) 696-00-16

¹Federal Research Centre "Information and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow

²Moscow Aviation Institute, Moscow

Abstract: In this work, simulation modeling of an analog spiking neural network with memristive elements as synaptic weights and a learning mechanism based on the STDP rule is performed.

Key words: memristor, 1T1R, neuromorphic network, spiking neural network, STDP, recognition.

Acknowledgments: the work was performed with the support of RFBR grant No. 19-29-03051mk.

УДК 535.345

<https://doi.org/10.29003/m1639.Silicon-2020/325-328>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Макаров Михаил Эрнстович, с.н.с.¹, аспирант², mtkarov@niime.ru

Сапегин Александр Андреевич, начальник лаборатории¹, аспирант³, asapegin@niime.ru, +7 (926) 255-57-33

Королев Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник¹, аспирант³, dmkorolev@phys.unn.ru

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²ИПТМ РАН, г. Черноголовка

³МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: В работе представлены результаты моделирования ячеек энергонезависимой памяти с оптическим управлением. Проведено моделирование волноводов, локально нагруженных пленкой из халькогенидного стекла GeSbTe (GST). На основе расчетов в рамках модели JMAK предложена оригинальная форма оптических импульсов стирания ячейки памяти с оптическим управлением, позволяющая снизить временные затраты на переключение ячейки.

Ключевые слова: PCM, халькогенидные стекла, энергонезависимая память, GST, радиофотоника

Методы и результаты

Замена ЭКБ интегральных систем оптическими функциональными аналогами является актуальной задачей, разрабатываемой в мировых научных группах [1]. Одним из таких аналогов является энергонезависимая память с оптическим управлением. В ней используется изменение прозрачности волновода под воздействием светового сигнала. Фазовое состояние материала GST задает прозрачность волновода, поскольку различным состояниям GST соответствуют разные эффективные показатели преломления. Таким образом, фаза является способом хранения информации.

В рамках работы было проведено моделирование операции стирания в ячейке со следующими параметрами: высота волновода – 220 нм, ширина – 500 нм, толщина слоя GST–10 нм. Модель состояла из трех расчетных частей. В первой части был рассчитан нагрев, необходимый для достижения оптимального температурного диапазона в соответствии с моделью JMAK [2]. Вторая часть была описывала процесс рекристаллизации GST, в ходе которого температура была стабильной. В третьей части было оценено время остывания. Операция считалась завершенной, когда температура в центре слоя GST опускалась ниже 418 К. Использование ступенчатого импульса позволяет снизить время стирания. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

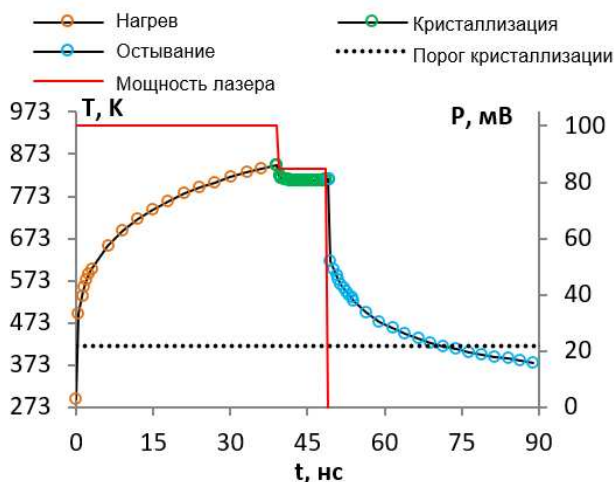


Рисунок 1 – Изменение температуры состояния ячейки в режиме стирания

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-03040.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015, №4(177) С. 60-64.
2. Wright C. D. et al. M. Terabit-per-square-inch data storage using phase-change media and scanning electrical nanoprobe // IEEE Transactions on Nanotechnology, 2006, №5, с. 50-61

MODELING OF NONVOLATILE MEMORY CELL WITH OPTICAL CONTROLLING

Mikhail Ernstovich Makarov, senior researcher¹, Ph.D. student², mmakarov@niime.ru

Alexander Andreevich Sapegin¹, head of laboratory¹, Ph.D. student³, asapegin@niime.ru, +7 (926) 255-57-33

Dmitry Sergeevich Korolev, Ph.D., researcher¹, dmkorolev@phys.unn.ru

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² IMT RAS, Chernogolovka

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: This paper represents results of modeling nonvolatile memory cells with optical controlling. Modeling of waveguides locally loaded with a GeSbTe (GST) chalcogenide glass film has been carried out. Based on calculations of the JMAK model, the original shape of optical memory pulses with optical control is proposed, which makes it possible to reduce the time spent on switching memory.

Key words: PCM, chalcogenide glass, nonvolatile memory, GST, microwave optics, silicon photonics

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-29-03040

УДК 004.33.087.2

<https://doi.org/10.29003/m1640.Silicon-2020/328-331>

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ МЕМРИСТОРА

Шамин Евгений Сергеевич, м.н.с.¹, студент²,
eshamin@niime.ru, +7(999)988-48-2

Горнев Евгений Сергеевич, чл.-корр. РАН, д.т.н. профессор¹,
заместитель руководителя приоритетного технологического
направления², egornev@niime.ru, +7(903)969-60-97

Жевненко Дмитрий Алексеевич, н.с.¹, аспирант²,
DmitryZhev@yandex.ru, +7(925)441-23-72

Мещанинов Федор Павлович, н.с.¹, аспирант²,
fmeshaninov@yandex.ru, +7(915)360-49-69

Кожевников Владислав Сергеевич, н.с.¹, студент²,
vladislavkozhevnikov@gmail.com, +7(977)517-66-39

¹МФТИ, г. Москва

²АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация: Данная работа посвящена разработке алгоритмов предсказания параметров модели мемристора по контуру его вольтамперной характеристики с помощью машинного обучения. Приводится описание алгоритма поиска признаков контуров ВАХ, и их взаимосвязей с параметрами модифицированной модели Yagorcić [1].

Ключевые слова: мемристор, модель мемристора, машинное обучение.

Введение и проблематика

Мемристор – микроэлектронное устройство, в основе работы которого лежит обратимое изменение своего сопротивления в зависимости от протекшего через него заряда и сохранение этого сопротивления после отключения питания. Первый образец мемристора был получен в 2008 году [2], однако задача построения его точной физической модели всё ещё не решена [3]. Ввиду этого, большинство существующих на данный момент моделей мемристора являются эмпирическими или полумэмпирическими. Определение некоторых параметров таких моделей возможно только из анализа эксперимента, и в частности с помощью аппроксимации экспериментальных ВАХ.

Однако аппроксимация даже одного контура ВАХ может занимать значительное время, ведь приходится проводить вычисление модельной ВАХ (для определения целевой функции) тысячи раз. В случае, когда необходимо определить параметры модели для десятков тысяч ВАХ, это не является приемлемым.

Описание подхода к решению проблемы

Для преодоления данного затруднения применяют различные способы, от аналитической экстракции [4] до дискретных методов оптимизации. Наше решение представляет собой комбинацию методов, в основе которых лежит применение машинного обучения, а именно алгоритмов случайного леса.

В работе приводится описание алгоритма поиска признаков контуров ВАХ, и их взаимосвязей с параметрами модели мемристора с помощью обучения алгоритмов случайного леса. Все результаты представлены на примере модифицированной версии модели Yakopcic [1]. График точности случайного леса для параметра b модели Yakopcic показан на рисунке 1.

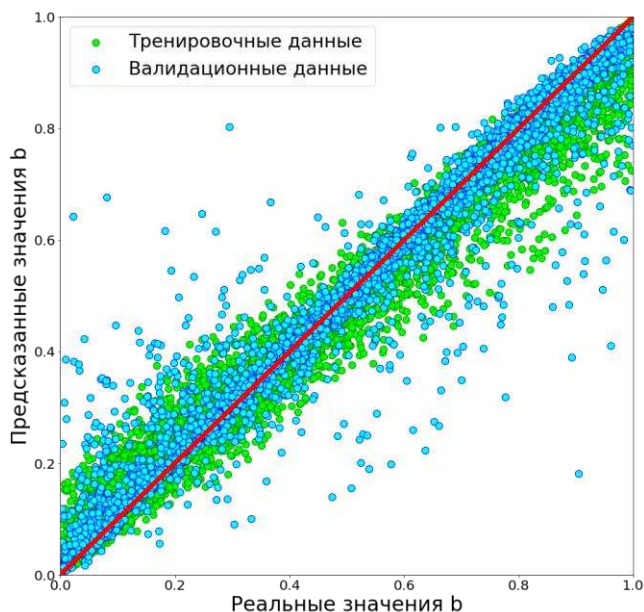


Рисунок 1 – График точности модели случайного леса для предсказания параметра b модели Yakopcic.

Список использованных источников

1. Yakopcic C. et al. A memristor device model //IEEE electron device letters. – 2011. – Т. 32. – №. 10. – С. 1436-1438.
2. Strukov D. B. et al. The missing memristor found //nature. – 2008. – Т. 453. – №. 7191. – С. 80-83.
3. Pershin Y. V., Di Ventra M. On the validity of memristor modeling in the neural network literature //Neural Networks. – 2020. – Т. 121. – С. 52-56.

4. Garcia A. A., Reyes L. O. Analysis and parameter extraction of memristive structures based on Strukov's non-linear model //Journal of Semiconductors. – 2018. – T. 39. – №. 12. – C. 124009.

DEVELOPMENT OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR MEMRISTOR MODEL PARAMETERS DEFINITION

*Evgeniy Sergeevich Shamin, Ph.D. student¹, junior researcher²,
eshamin@niime.ru, +7(999)988-48-2;*

*Evgeniy Sergeevich Gornev, Corresponding Member of RAS,
Doctor of Technical Sciences Professor¹, Deputy Head of Priority
Technological Direction - Head of PTD Department²,
egornev@niime.ru, +7(903)969-60-97;*

*Dmitriy Alekseevich Zhevnenko, Ph.D. student¹, researcher²,
DmitryZhev@yandex.ru, +7(925)441-23-72;*

*Fedor Pavlovich Meshchaninov, Ph.D. student¹, researcher²,
fmeshaninov@yandex.ru, +7(915)360-49-69;*

*Vladislav Sergeevich Kozhevnikov, master student¹, researcher²,
vladislavkozhevnikov@gmail.com, +7(977)517-66-39*

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.*

² *JSC MERI, 124460, Moscow, Zelenograd .*

Abstract: This work is dedicated to the development of algorithms for prediction of memristor model parameters via features of its current-voltage characteristic with the help of machine learning. An algorithm for extraction of current-voltage characteristic features is described. An attempt is made to examine their relationship with modified Yakopcic model parameters.

Key words: memristor, memristor model, machine learning.

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ РЕКУРРЕНТНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ С ДОЛГОЙ КРАТКОСРОЧНОЙ ПАМЯТЬЮ

*Мошкарлова Лилия Айратовна, младший научный
сотрудник¹, lmoshkarova@niime.ru, +7 (915) 480-92-72*

*Тельминов Олег Александрович, к.т.н., начальник
лаборатории¹, otelminov@niime.ru, +7 (495) 229-74-97*

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва

Аннотация: в работе приведены некоторые методы извлечения признаков из аудиосигнала, решена задача распознавания русской речи с помощью рекуррентной нейронной сети LSTM, проведен анализ результатов распознавания для разных акустических признаков.

Ключевые слова: распознавание русской речи, MFCC, PLP, PNCC, LSTM, CTC.

Введение

Распознавание речи широко применимо в задачах управления системами или голосового поиска. Целью данной работы является определение эффективного способа извлечения признаков из речевого сигнала.

Извлечение акустических признаков

Наиболее популярным методом выделения признаков являются мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC – mel-frequency cepstrum coefficients [1]). Способ основан на особенностях человеческого слуха и представлении сигнала в мел-шкале. Следующий метод – анализ перцептивного линейного предсказания (PLP – perceptual linear predictive [2]), который связан с неравной восприимчивостью слуха на

разных частотах и использованием кривой критической полосы. Менее распространенный, но весьма точный способ – извлечение нормированных по мощности кепстральных коэффициентов (PNCC – power-normalized cepstral coefficients [3]). В методе применяется алгоритм подавления шума, основанный на наблюдении, что мощность речи в канале изменяется быстрее мощности фонового шума.

Распознавание и результаты

Для распознавания речи использовалась двунаправленная рекуррентная нейронная сеть с двумя слоями LSTM – long short-term memory по 128 нейронов. В процессе обучения минимизировалась функция потерь CTC – Connectionist Temporal Classification [4]. Сеть была обучена на наборе данных VoxForge. Ошибка распознавания по показателю LER (Label Error Rate) на полном тестовом наборе составила 27,8% для PNCC, 29,4% для PLP и 29,6% для MFCC. При этом для достижения наилучшего результата для PNCC требуется обучение нейронной сети за меньшее число эпох, чем для других методов. Аппаратная реализация вычислительных устройств сегодня может быть выполнена с помощью устройств традиционной КМОП-технологии [5] типа матричных интегральных схем (БМК или ПЛИС), моделирующих процессорные системы [6], либо специализированных процессоров. При дальнейшем развитии технологий и компонентной базы возможна будет реализация макетов нейронов и сетей на их основе по типу [7], которые позволят реализовать рассматриваемые алгоритмы более эффективно.

Список использованных источников

1. X. Huang, A. Acero, H-W. Hon, Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development, Prentice Hall, 2001
2. H. Hermansky. Perceptual linear predictive (PLP) analysis of speech // The Journal of Acoustical Society of America. – 1990. – P. 1738-1752

3. C. Kim, R. M. Stern, Power-normalized cepstral coefficients (PNCC) for robust speech recognition // IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 2012

4. Graves, S. Fernandez, F. Gomez, J. Schmidhuber, Connectionist temporal classification: Labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks // ICML '06: Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning, June 2006 – P. 369–376

5. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: в 3 ч. // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. — Ч. 1. — 2017. — Вып. 1 (165). — С. 59–63; Ч. 2. — 2017. — Вып. 4 (168). — С. 16—41; Ч. 3. — 2018. — Вып. 3 (171). — С. 63—93.

6. В.И. Эннс. СнК, БМК или ПЛИС: выбор варианта исполнения цифровой интегральной схемы // Компоненты и технологии. – 2018. – № 4. – С.100–102.

7. Е. С. Горнев, Г. С. Теплов. Математическая модель конечного автомата абстрактного нейрона и сетей на его основе// Нано – и микросистемная техника. –2018. –Т.20. – № 7. –С. 434–442.

METHODS FOR EXTRACTION OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS IN THE SPEECH RECOGNITION PROBLEM BY RECURRENT NEURAL NETWORKS WITH LONG SHORT-TERM MEMORY

Lilia Ayratovna Moshkarova,

junior researcher¹, lmoshkarova@niime.ru, +7 (915) 480-92-72

*Oleg Aleksandrovich Telminov, Ph.D., head of the laboratory¹,
otelminov@niime.ru, +7 (495) 229-74-97*

¹ JSC “NIIME”, Moscow

Abstract: the paper presents some methods for extracting features from an audio signal, the problem of recognizing Russian speech using a recurrent neural network LSTM are solved, the results of recognition for different acoustic features are analyzed.

Key words: Russian speech recognition, MFCC, PLP, PNCC, LSTM, CTC.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭСКИЗА ФОТОШАБЛОНА

*Березин Александр Андреевич, инженер-конструктор 3
кат.¹, aberezin@niime.ru, +7 (919) 722-95-98*

*Шахманова Мария Владимировна, инженер-программист 3
кат.¹, mshakhmanova@niime.ru, +7 (916) 804-50-89*

*Иванов Владимир Викторович, зам. начальника отдела¹,
vlaivanov@niime.ru, +7 (926) 274-64-25*

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва

Аннотация: В данной работе задача оптимальной расстановки кристаллов в поле фотошаблона решается методом рекурсивной нейронной комбинаторной оптимизации. Также исследуется возможность использования обратной связи от пользователей в качестве критерия оптимизации.

Ключевые слова: проектирование фотошаблона, нейронная комбинаторная оптимизация, обучение человеческим предпочтениям, обучение с подкреплением, pointer network.

Введение

Как известно, с уменьшением проектных норм технологии растет стоимость комплекта фотошаблонов [1]. Это повышает цену ошибки инженера при разработке фотошаблона. Кроме того, с увеличением числа кристаллов в поле фотошаблона экспоненциально усложняется задача их оптимального размещения, состоящая в том, чтобы расположить в кадре как можно больше кристаллов различных размеров, при этом минимизируя их потери при разрезании пластины.

Основная часть

За основу данной работы взята архитектура из [2], в которой для решения задачи комбинаторной оптимизации, порождаемой эвристическими алгоритмами, используется искусственная нейронная сеть с архитектурой «Pointer network» [3].

В данной работе, во-первых, предлагается новый механизм интеграции нейронной комбинаторной оптимизации в расстановщик. Вместо того, чтобы кодировать абстрактную последовательность кристаллов, которая может быть по-разному интерпретирована расстановщиком, нейронная сеть непосредственно кодирует бинарное дерево. Для этого рекуррентный декодирующий заменяется на рекурсивный, а в его маске ограничений учитываются границы кадра и других кристаллов. Такой подход дает нейронной сети полный контроль над процессом расстановки, тем самым позволяя находить ранее недостижимые решения. Недостаток – частичный отказ от модульной архитектуры алгоритма расстановки, так как теперь в качестве эвристики используется только бинарное дерево. Однако, при необходимости аналогичные алгоритмы можно быстро разработать и для других эвристик расстановки. Методы снижения размерности и заполнения пустот по-прежнему применимы.

Во-вторых, при использовании количества пластин в качестве целевой функции, полученный результат часто не устраивает пользователей, причем в большинстве случаев они не могут точно объяснить, почему. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод обучения через обратную связь [4]. Он состоит в том, чтобы обучить вторую нейронную сеть аппроксимировать целевую функцию первой, основываясь на обратной связи от пользователей. В такой архитектуре оценивающая модель фактически заменяет эвристическую целевую функцию. Сложность состоит в том, чтобы найти подходящую модель. Помимо этого, требуется компактное представление входных данных, полностью описывающее сформированный эскиз, и генерация

синтетических примеров для обучения модели. В архитектуре оценивающей сети предлагается использовать сверточные слои для выделения особенностей данных и рекуррентные слои для обработки последовательностей произвольной длины.

Выводы

Предложенная архитектура позволяет автоматическому расстановщику генерировать результаты, более близкие к требуемым по техническому заданию, а в перспективе позволит полностью заменить оператора, тем самым ускоряя процесс разработки фотошаблонов.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: 2013.
2. Березин А.А., Шканакина М.Д., Иванов В.В., Кузовков А.В., Решение основных проблем эвристических алгоритмов расстановки кристаллов в поле фотошаблона для практического использования // Международный форум «Микроэлектроника – 2019» (Гурзуф, Крым, 23-25 сентября 2019) – М.:2019
3. Vinyals O., Fortunato M., Jaitly N.P., Pointer Networks, [Электронный ресурс] - URL: <https://arxiv.org/abs/1506.03134> (дата обращения: 09.06.2020).
4. Paul C., Jan L., Tom B.B., et al., Deep reinforcement learning from human preferences [Электронный ресурс] - URL: https://www.researchgate.net/publication/317558021_Deep_reinforcement_learning_from_human_preferences (дата обращения: 09.06.2020)

APPLYING NEURAL COMBINATORIAL OPTIMIZATION TO THE OPTIMAL RETICLE FLOORPLANNING PROBLEM

*Alexander Andreevich Berezin, design engineer¹,
aberezin@niime.ru, +7 (919) 722-95-98*

Maria Vladimirovna Shakhmanova, software engineer¹,
mshakhmanova@niime.ru, +7 (916) 804-50-89

Vladimir Viktorovich Ivanov, deputy chief¹, vlaivanov@niime.ru,
+7 (926) 274-64-25

¹ JSC MERI, Moscow

Abstract: This work considers the application of recursive neural combinatorial optimization to the problem of optimal reticle floorplanning. It also proposes the use of reinforcement learning from human preferences as an optimization criterion.

Key words: reticle floorplanning, neural combinatorial optimization, learning from human preferences, reinforcement learning, pointer network.

УДК 53.06

<https://doi.org/10.29003/m1643.Silicon-2020/338-341>

РАЗРАБОТКА СЕЛЕКТОРНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ МАТРИЦ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ

Федотов Михаил Игоревич, м. н. с.¹, fedotov.mi@phystech.edu,
+7 (977) 849-51-10

Коротицкий Виктор Иванович, ст. инженер², vic@iptm.ru, +7
(916) 673-75-37

Ковешников Сергей Викторович, к.ф.-м.н., зам. директора по
инновациям², skoveshnikov@gmail.com, +7 (905) 733-47-87

¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный

²ИПТМ РАН, г. Черноголовка

Аннотация: Проведен теоретический расчет проводимости в структурах двуслойных диэлектриков. Путем компьютерного моделирования ВАХ определены оптимальные материалы для создания само-совмещенного селекторного устройства для элементов резистивной памяти, RRAM.

Ключевые слова: энергонезависимая резистивная память, диэлектрики, оксиды металлов, электронные свойства дефектов, электроформовка, проводящий филамент, механизм переключения.

Актуальность работы

Матрицы энергонезависимой резистивной памяти большого объема с архитектурой Crossbar [1] требуют наличия самосовмещенных селекторных устройств с нелинейными вольтамперными характеристиками для решения проблемы паразитных токов утечки [2]. Для создания матрицы большого объема площадь селектора должна быть равна площади элемента памяти.

Предлагаемое нами решение заключается в создании самосовмещенного селектора в виде туннельного диода на базе двуслойных диэлектриков.

Модель проводимости в двуслойном диэлектрике

В ходе проделанной работы был проведен теоретический расчет проводимости в двуслойном диэлектрике. Предполагается, что проводимость в двуслойном диэлектрике достигается за счет туннелирования носителей в соответствии с механизмом Фаулера-Нордгейма [3] через двухступенчатый потенциальный барьер. На основании этого предположения нами предложена формула, описывающая зависимость плотности тока от напряженности электрического поля:

$$J = q^2 \frac{E^2}{4\pi h * \varphi_{eff}} \exp\left(-\frac{8}{3} \sqrt{\pi q} \varphi_{eff}^{\frac{3}{2}} \frac{1}{E}\right)$$

где

$$\varphi_{eff} = \frac{\varphi_1 d_1 + \varphi_2 d_2}{d_1 + d_2}$$

где φ_1 и φ_2 – высота ступеней энергетического барьера;
 d_1 и d_2 – их толщина;

q – заряд электрона;

E – приложенное электрическое поле;

h – постоянная Планка.

Расчетная ВАХ такой модели для одной из исследуемых структур представлена на рисунке 1.

Достижение диодных характеристик многослойных диэлектрических структур будет возможно при оптимизации толщины диэлектриков с учетом их фундаментальных параметров (ширины запрещенной зоны, диэлектрической проницаемости).

В работе проведены расчеты ВАХ для сочетаний пар различных диэлектриков, включая Al_2O_3 , CeO_2 , Dy_2O_3 , Dy_2O_3 -2, Ga_2O_3 , Gd_2O_3 , $\text{Hf}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_2$, HfO_2 , La_2O_3 , La_2O_3 -2, LaAlO_3 , Nb_2O_5 , PbTiO_3 , $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$, Si_3N_4 -1, Si_3N_4 -2, Si_3N_4 -3, SiO_2 , SrTiO_3 , Ta_2O_5 , Ta_2O_5 -2, TiO_2 , Y_2O_3 , ZnO , ZnO -2, ZrO_2 .

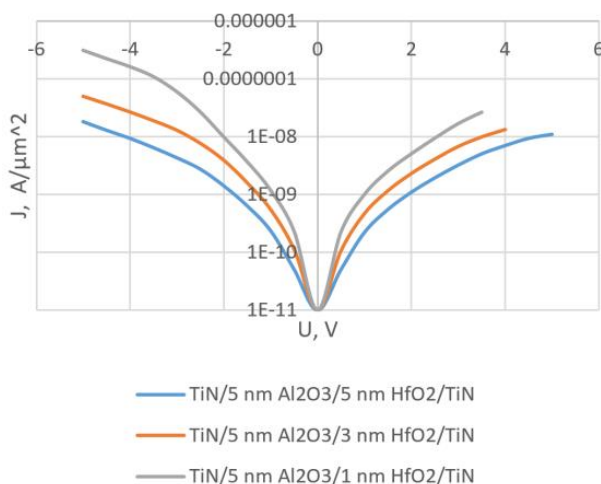


Рисунок 1 – Расчетная ВАХ элемента резистивной памяти с различными толщинами диэлектриков.

Данная работа поддержана грантом РФФИ № 19-29-03035 мк.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Koveshnikov, S & Matthews, Ken & Min, Kyu & Gilmer, David & Sung, M.G. & Deora, S & Li, Hui-feng & Gausepohl, S & Kirsch, P.D. & Jammy, R. (2012). Real-time study of switching kinetics in integrated 1T/ HfO_x 1R RRAM: Intrinsic tunability of set/reset voltage and trade-off with switching time // Electron Devices Meeting, 1988.
2. J. Zhou, K. Kim and W. Lu. Crossbar RRAM Arrays: Selector Device Requirements During Read Operation// IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 61, no. 5, pp. 1369-1376, 2014
3. Sze, S.M. Physics of semiconductor devices, 2nd edition // New York, Wiley-Interscience, p. 878, section 4.3.4, 1981.

BILAYER INSULATOR BASED DESIGN OF SELECTOR DEVICES FOR RESISTIVE MEMORY ARRAYS

Mikhail Igorevich Fedotov ^{1,2}, student, junior researcher, fedotov.mi@phystech.edu, +7 (977) 849-51-10

Sergei Viktorovich Koveshnikov ³, Ph.D., deputy director for innovation², skoveshnikov@gmail.com, +7 (905) 733-47-87

Viktor Ivanovich Korotitskiy ³, senior engineer³, vic@iptm.ru, +7 (916) 673-75-37

Abstract: a theoretical calculation of the conductivity in bilayer dielectrics structures is performed. Optimal materials for creating a self-displaced selector device for resistive memory elements (RRAM) are determined by computer simulation of the VAC.

Key words: non-volatile resistive memory, dielectrics, metal oxides, electronic properties of defects, electroforming, conductive filament, switching mechanism.

Acknowledgments: the research is conducted with support from RFBR grant № 19-29-03035.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕМРИСТОРА

Ду Хаолун, аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, duhaolong@mail.ru, +7 (916) 169-22-30

Аннотация: В статье обобщаются существующие проблемы в исследовании мемристора и обсуждаются направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: мемристор, проблемы, перспективы мемристора

Введение

Повышение производительности современных вычислительных систем сопряжено с двумя трудностями: трудностью продолжения закона Мура для миниатюрных транзисторных устройств; узким местом для разделения вычислений и хранения данных в архитектуре фон Неймана.

Основная часть

Все это предвещает широкие перспективы применения мемристоров, но в настоящее время существуют некоторые трудности в исследованиях, которые заслуживают нашего внимания:

1. В настоящее время моделирование различных типов мемристоров реализовано с использованием механизма переключения сопротивления, однако существующие модели не учитывают влияние электродов, интерфейсов, сред, легирования и т. д. В будущем нам нужно усовершенствовать моделирование различных механизмов мемристора.

2. Мемристор представляет собой проблему случайных колебаний сопротивления и переключающего напряжения при повторном программировании, что ограничивает применение мемристорных устройств в системах хранения данных и

вычисления [1].

3. Между различными мемристорами существует несоответствие напряжения переключения и состояния сопротивления, что ограничивает масштаб интеграции мемристора.

4. Мемристоры уже используются в RRAM, искусственных нейронных сетях и схемах на этом этапе, но проблема утечки тока, надежности, памяти и т. д. мемристора в интеграции все ещё должна быть улучшена.

5. Исследования искусственных нейронных сетей для мемристора сосредоточены на синаптической пластичности, но исследования других биологических частей (тело нервной клетки и нейронные глиальные клетки) или свойств почти пусты [2].

6. Недорогие методы производства и новые производственные процессы по-прежнему являются ключом к индустриализации мемристора.

Выводы

Мемристор обладает характеристиками памяти, размером нанометра, быстрым переключением и низким энергопотреблением. В последние годы важными областями внимания мемристора являются энергонезависимое хранение, логические операции и нейроморфные вычисления.

Список использованных источников

1. Pouyan P, Amat E, Rubio A. Reliability challenges in design of memristive memories[C]//2014 5th European Workshop on CMOS Variability (VARI). IEEE, 2014: 1-6.

2. Li Y, Wang Z, Midya R, et al. Review of memristor devices in neuromorphic computing: materials sciences and device challenges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(50): 503002.

CURRENT STATE OF MEMRISTOR DEVELOPMENT

Du Haolong, Ph.D., duhaolong@mail.ru, +7 (916) 169-22-30

Abstract: The article summarizes the existing problems in memristor research and discusses the directions of further research.

Key words: memristor, problems, prospects of memristor.

УДК 621.38-022.532

<https://doi.org/10.29003/m1645.Silicon-2020/344-347>

**ГИБКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
ЭЛЕКТРОФОРМОВКИ И РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В
МЕТАЛЛООКСИДНЫХ МЕМРИСТИВНЫХ УСТРОЙСТВАХ,
СОДЕРЖАЩИХ ФИЛАМЕНТЫ**

Окулич Евгения Викторовна, м.н.с.¹, eokulich@nifti.unn.ru, +7 (930) 706-07-57

Гусейнов Давуд Вадимович, к.ф.-м.н., с.н.с.¹, guseinov@phys.unn.ru, +7 (831) 462-31-20

Королев Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., н.с.¹, dmkorolev@phys.unn.ru, +7 (831) 462-31-20

Белов Алексей Иванович, к.ф.-м.н., н.с.¹, belov@nifti.unn.ru, +7 (831) 462-31-20

Окулич Виктор Иванович, к.ф.-м.н., доцент², victorokulich@mail.ru, +7 (952) 457-79-86

Тетельбаум Давид Исаакович, д.ф.-м.н., профессор, в.н.с.¹, tetelbaum@hys.unn.ru, +7 (831) 462-31-20

Михайлов Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., зав. лаб.¹, mian@nifti.unn.ru, +7 (831) 462-31-20

¹*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород*

²*Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС, г. Нижний Новгород*

Аннотация: предложена оригинальная модель резистивного переключения металлооксидных мемристивных

устройств. Проведено сравнение с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, оксид кремния, стабилизированный иттрием диоксид циркония, кинетический метод Монте-Карло, миграция кислорода.

Введение

Несмотря на наличие большого числа моделей резистивного переключения в мемристорах на основе металлооксидов и диоксида кремния, остаётся потребность в создании модели, позволяющей достаточно просто использовать её для прогнозирования параметров мемристоров при их создании.

Основная часть

Предложенный подход развивает изложенную ранее модель [1] и сочетает в себе универсальный подход кинетической трехмерной модели Монте-Карло для описания миграции ионов кислорода и относительно простые, но физически обоснованные (эвристические) приближения для учета дополнительных факторов, связанных со структурой и морфологией конкретного оксидного материала, интерфейсными явлениями и энергетикой электронных процессов. Поэтому он не требует трудоемких расчетов и вычислительной мощности.

Модель апробирована на мемристивных структурах Au/оксид/TiN, в которых поликристаллические пленки стабилизированного иттрием диоксида циркония ($ZrO_2(Y)$) и столбчатые пленки аморфного SiO_x , полученные методом магнетронного распыления, используются в качестве переключающегося оксидного материала.

Приведены результаты сравнения с экспериментальными данными по электроформовке и резистивному переключению в соответствующих структурах мемристивных устройств, полученных в нашей лаборатории.

Выводы

Предложенный подход продемонстрировал свою эффективность, что открывает возможность его дальнейшего практического применения.

Работа поддержана Правительством Российской Федерации (контракт № 074-02-2018-330 (2)).

Список использованных источников

1. Guseinov D.V., Tetelbaum D.I., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Shenina M.E., Korolev D.S., Antonov I.N., Kasatkin A.P., Gorshkov O.N., Okulich E.V., Okulich V.I., Bobrov A.I., Malekhonova N.V., Pavlov D.A., Gryaznov E.G. Filamentary model of bipolar resistive switching in capacitor-like memristive nanostructures on the basis of yttria-stabilised zirconia // International Journal of Nanotechnology, 2017, 14 (7/8) – P.604-617.

A FLEXIBLE APPROACH TO SIMULATE ELECTROFORMING AND RESISTIVE SWITCHING IN METAL OXIDE MEMRISTIVE DEVICES CONTAINING FILAMENTS

Evgeniya Victorovna Okulich¹, junior science researcher, eokulich@nifti.unn.ru, +7 (930) 706-07-57

Davud Vadimovich Guseinov¹, senior researcher

Dmitry Sergeevich Korolev¹, science researcher

Alexey Ivanovich Belov¹, science researcher

Victor Ivanovich Okulich², associate professor

David Isaakovich Tetelbaum¹, leading researcher

Alexey Nikolaevich Mikhaylov¹, head of laboratory

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod

² Nizhny Novgorod Institute of Management - branch of RANEPa, Nizhny Novgorod

Abstract An original model of resistive switching of metal oxide memristive devices is proposed. The efficiency and flexibility of the approach are demonstrated by the example of experimentally realized Au/oxide/TiN structures.

Key words: kinetic Monte Carlo, resistive switching, yttria-stabilized zirconia, silicon oxide; memristor.

Acknowledgments: this work was supported by the Government of the Russian Federation (contract No. 074-02-2018-330 (2)).

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1646.Silicon-2020/347-350>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В HfO_2 RRAM-СТРУКТУРАХ В ПРОЦЕССЕ RESET

Ганыкина Екатерина Андреевна, научный сотрудник¹, аспирант², eganykina@niime.ru, +7 (905) 515-20-38

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, начальник управления РПТН¹, egornev@niime.ru, +7 (903) 969-60-97

Резванов Аскар Анварович, к.ф.-м.н., начальник лаборатории¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: в настоящей работе исследуется образование и разрыв проводящего слоя вакансий в структуре $\text{Hf}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$. Работа охватывает теоретическое рассмотрение термических эффектов, возникающих в данной структуре в процессе RESET. Проведён анализ образования и разрыва филамента в поликристаллическом и аморфном слое HfO_2 .

Ключевые слова: оксид гафния, филамент, переключение, разрыв проводящего слоя, RRAM

Введение

RRAM-устройства, в частности на основе оксида гафния, вызывают наибольший интерес из-за высокой скорости работы, стабильности и долговечности, а также возможности 3D-интеграции [1]. На данный момент нет точно установленных связей свойств материалов структуры с переключаемыми характеристиками устройства.

В данной работе рассматривается RRAM-структура $\text{Hf}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$. Первым этапом формирования внутреннего проводящего слоя в диэлектрике является разрыв Hf-O -связи. Важнейшей причиной разрыва связей является повышение локальной температуры, вызванное скачками электронов, инжектированных из внешней цепи, по вакансиям. Данный процесс вызывает смещение соседних атомов решетки, что эквивалентно испусканию фононов. Это приводит к повышению локальной температуры и увеличению частоты вибрации Hf-O -связи.

Из-за сильного кулоновского взаимодействия вакансии и ион кислорода, образовавшиеся при разрыве Hf-O -связи, быстро рекомбинируют. Однако в условиях инжекции электронов из внешней цепи у отрицательного электрода образуются вакансии, захватившие электроны. При наличии вблизи образовавшейся пары такой вакансии она стабилизируется за счет обобществления электронов. Новообразовавшаяся вакансия оказывается электрически нейтральной, что предотвращает быструю рекомбинацию [2].

Таким образом, у отрицательного электрода начинается формирование кластера вакансий. Из-за различных свойств материалов электродов филамент будет иметь коническую форму: наблюдается расширение слоя вакансий у верхнего Hf -электрода [3].

При переключении напряжения (процесс RESET) ионы кислорода начинают собираться вблизи нижнего электрода, который является хорошим блокирующим слоем для кислорода (TiN , кристаллическая структура которого не имеет вакансий для внедрения ионов кислорода). Движимые внешним полем и градиентом температуры, ионы кислорода

диффундируют к нижнему электроду и втягиваются в область филамента, рекомбинируя с имеющимися там вакансиями. Диффузия ионов в направлении от филамента подавляется сильным снижением температуры: более низкая температура вне области филамента снижает скорость диффузии [4].

Выводы

В работе рассмотрены и проанализированы процессы формирования и разрыва проводящего слоя вакансий в структуре $\text{Hf}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$. Также были получены распределения температуры и электрического поля в процессе RESET. Было показано, что в низкоомном состоянии электрическое поле и градиент температуры вызывают диффузию ионов кислорода и их втягивание вблизи нижнего края филамента, что приводит к переключению структуры в высокоомное состояние.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012.
2. Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D. Metal-oxide resistive random access memory (RRAM) technology: Material and operation details and ramifications // Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology: Woodhead Publishing, 2019. С. 35-102.
3. Goux L. OxRAM technology development and performances // Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology: Woodhead Publishing, 2019. С. 3-33.
4. Niraula D., Karpov V. Numerical modeling of resistive switching in RRAM device // Proceedings of the 2017 COMSOL Conference in Boston. 2017.

INVESTIGATION OF THERMAL EFFECTS IN HfO_2 RRAM STRUCTURES DURING THE RESET PROCESS

Ekaterina Andreevna Ganykina, research assistant¹, Ph.D. student², eganykina@niime.ru, +7 (905) 515-20-38

Evgeniy Sergeevich Gornev, corresponding member of RAS, Dr.Eng.Sc., professor, head of PTD management¹, egornev@niime.ru, +7 (903) 969-60-97

Askar Anvarovich Rezvanov, Cand.Phys.Math.Sc., head of laboratory¹, arezvanov@niime.ru, +7 (916) 197-29-98

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: In this paper, the formation and rupture of a conducting filament in the $\text{Hf}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ structure are investigated. Theoretical consideration of the thermal effects occurring during the RESET process is covered. The analysis of the formation and rupture of a filament in an amorphous HfO_2 layer is carried out. The introduction of the thin Al_2O_3 layer into the $\text{Hf}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ structure is also considered.

Key words: hafnium oxide, aluminum oxide, filament, switching, conductive filament rupture, RRAM.

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1647.Silicon-2020/350-354>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ЭФФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Трясогузов Павел Евгеньевич, техник¹, студент²
tryasoguzov.pe@phystech.edu, +7 (926) 446-54-57*

Теплов Георгий Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник¹, gteplov@niime.ru, +7 (963) 667-05-14

*Кузовков Алексей Валерьевич, инженер-конструктор¹,
akuzovkov@niime.ru, +7 (903) 572-84-35*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград

²МФТИ, г. Москва

Аннотация: в данной работе исследуется эффективность методов машинного обучения для решения задач коррекции оптической близости. Задача состоит в определении направления смещения и величины смещения границы сегмента топологического рисунка. Сгенерированная база данных для обучения использовалась для тренировки моделей регрессии, случайного леса, градиентного бустинга и сверточной нейронной сети прямого распространения.

Ключевые слова: коррекция оптической близости, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

Введение

Одна из главных причин отличия рисунка топологических слоев от спроектированного – это эффекты оптической близости [1]. Искажения возникают в случае, когда размеры топологических элементов меньше длины волны экспонирующего излучения.

Для реализации технологии уровня 130 нм и менее стандартом де-факто является метод OPC на основе моделирования [2]. Основанный на модели OPC метод требователен к вычислениям из-за моделирования. Таким образом, возникает потребность в поиске более эффективных алгоритмов коррекции эффектов оптической близости.

В данной работе мы исследуем эффективность применения алгоритмов случайного леса [3], градиентного бустинга [4], линейной регрессии и многослойной сверточной сети [5] для определения наиболее точных подходов.

Обучающая выборка

Для получения обучающих данных была проведена коррекция эффектов оптической близости для 216-ти

топологических структур, наиболее репрезентативно отражающих структуры затворов в технологии 90 нм. Значения полученных смещений фрагментов составляли вектор ответов для обучающей выборки.

В качестве вектора входных данных для каждого фрагмента использовалась карта интенсивности экспонирующего излучения – воздушное изображение, на сетке с шагом 10 нм, в окрестности вокруг центра фрагмента.

Анализ данных моделирования

Эксперимент проводился для оценки предлагаемых моделей в решении задачи ОРС. Качество данных моделей оценивалось с помощью двух функций потерь: RMSE и MAE.

Зависимость значения ошибки моделей представлены на рисунке 1.

Выводы

Предлагаемый метод ОРС, основанный на машинном обучении, способен обеспечить хорошее начальное решение ОРС, которое Model Based ОРС может принять и улучшить. В ходе исследования установлено, что модели случайного леса и свёрточной сети обладают универсальностью относительно размерности входного вектора. Случайный лес является на текущий момент оптимальным алгоритмом машинного обучения в задаче ускорения ОРС.

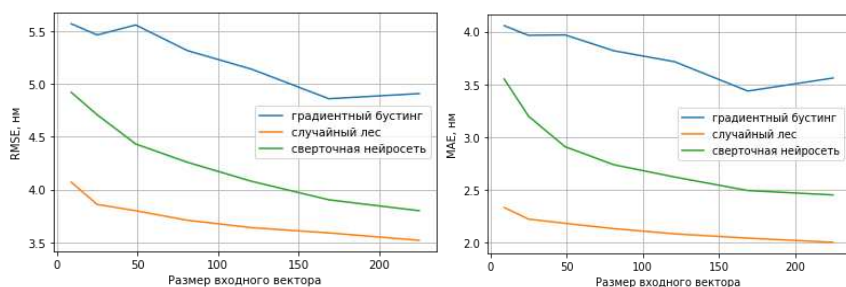


Рисунок 1 - Распределения предсказания ошибок для а) градиентного бустинга, б) случайного леса и в) сверточной нейронной сети.

Список использованных источников

1. Ковалев Д.Д. Использование процедуры коррекции эффекта оптической близости в слое металлизации элементов библиотеки проектирования 0.25 мкм КМОП СБИС // Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-0609.
2. Li J. et al. Model-based optical proximity correction including effects of photoresist processes// Optical Microlithography.-International Society for Optics and Photonics, 1997. – Т. 3051. – С. 643-651.
3. Breiman L. Random forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, no. 1. — Pp. 5-32
4. Friedman, J. H. (February 1999). "Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine".
5. Matusugu,Masakazu;Katsuhiko Mori;YusukeMitari;Yuji Kaneda. Subject independent facial expression recognition with robust face detection using a convolutional neural network // Neural Networks : journal. — 2003. — Vol. 16, no. 5. — P. 555—559.

RESEARCH OF APPLICATIONS OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN IMPROVING OPC SOLUTIONS

*Pavel Evgenievich Tryasoguzov, technician¹, student²
tryasoguzov.pe@phystech.edu, +7 (926) 446-54-57*

*Georgiy Sergeevich Teplov, Ph.D., senior researcher¹,
gteplov@niime.ru, +7 (963) 667-05-14*

*Alexey Valerievich Kuzovkov, design engineer¹,
akuzovkov@niime.ru, +7 (903) 572-84-35*

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

²MIPT, Dolgoprudny

Abstract: In this paper the effectiveness of machine learning methods for solving OPC problems was consider. The task was to determine the direction of displacement and the amount of displacement of the boundary of the segment of the topological drawing. The generated training database was used to train

regression, random forest, gradient boosting, and feedforward convolutional neural network models.

Key words: optical proximity correction, machine learning, artificial neural network.

УДК 519.7

<https://doi.org/10.29003/m1648.Silicon-2020/354-357>

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

*Матюшкин Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник¹,
imatyushkin@niime.ru, +7 (906) 048-21-11*

*Рубис Павел Дмитриевич, техник¹, студент²
prubis@niime.ru, +7 (915) 040-03-72*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград.

²НИУ МИЭТ, г. Москва, г. Зеленоград.

Аннотация: описывается работа четырёх алгоритмов пермутаций квадратных матриц, основанных на циклических сдвигах строк и столбцов. Такой выбор алгоритмов дискретного преобразования обоснован удобством клеточно-автоматной (КА) формулировки. Выходные матрицы могут рассматриваться как псевдослучайные последовательности чисел. В результате численного расчета получены эмпирические формулы для периода пермутаций и зависимости периода отдельной КА-ячейки от порядка матрицы n . В качестве параметра динамики КА анализируются две «метрики перемешанности» на пермутациях матрицы (по сравнению с начальной).

Ключевые слова: клеточные автоматы, пермутация, случайные числа, метрика.

Введение

Тестирование сложных функциональных блоков современных СБИС может требовать случайной перестановки данных внутри матричного блока, например ПЛИС. Соответственно, при создании тестовых цепочек нужны алгоритмы генерации псевдослучайных чисел. Цель работы состоит в исследовании трех модификаций ранее предложенного нами КА-алгоритма [1,2] генерации псевдослучайных матриц. Кратко опишем порядок проведения исследования и его результаты.

Определение в терминах КА

Каждое число в матрице уникально и рассматривается как ячейка клеточного автомата с окрестностями фон-Неймана. Границы считаются сомкнутыми. Вводятся компоненты состояния ячейки - переменные, хранящие значение клетки и влияющие на ее сдвиг (флаги). Составляется локальная функция перехода (ЛФП), определяющая изменения ячейки в зависимости от текущих состояний ее и соседей. Циклические сдвиги строк и столбцов матрицы подразумевают соответствующие изменения флагов состояния ячеек. Поэтому вводится величина прохода алгоритма-число итераций до повторения конфигурации флагов.

Результаты

Применение алгоритмов к матрице порядка n дает на выходе величину, названную периодом $N(n)$, равную количеству итераций или проходов, необходимых для достижения начальной конфигурации и, показывающую сложность алгоритма и мощность множества пермутаций. На основе полученных значений периодов, для каждого алгоритма были выведены эмпирические формулы зависимости $N(n)$ (таблица 1).

Таблица 1 – эмпирические зависимости $N(n)$ в алгоритме «схема 1:2»

$n(k)$	Условие для k	$N(k)$	$N(n)$
$4k$	-	k	$\frac{n}{4}$
$4k + 2$	-	$2k + 1$	$\frac{n}{2}$
$4k + 1$	$k \bmod 3 \neq 2$	$(4k + 1)(6k + 3)$	$\frac{3n}{2}(n + 1)$
	$k \bmod 3 = 2$	$(4k + 1)(2k + 1)$	$\frac{n}{2}(n + 1)$
$4k - 1$	$k \bmod 3 \neq 1$	$(2k + 1)(4k - 1)(6k - 1)$	$\frac{n}{4}(3n + 1)(n + 3)$
	$k \bmod 3 = 1$	$\frac{1}{3}(2k + 1)(4k - 1)(6k - 1)$	$\frac{n}{12}(3n + 1)(n + 3)$

На периоде алгоритмов проводилась оценка динамики пермутаций матриц относительно первоначальной конфигурации при помощи «метрик перемешанности»[1] - mt и lm (рисунок. 1).

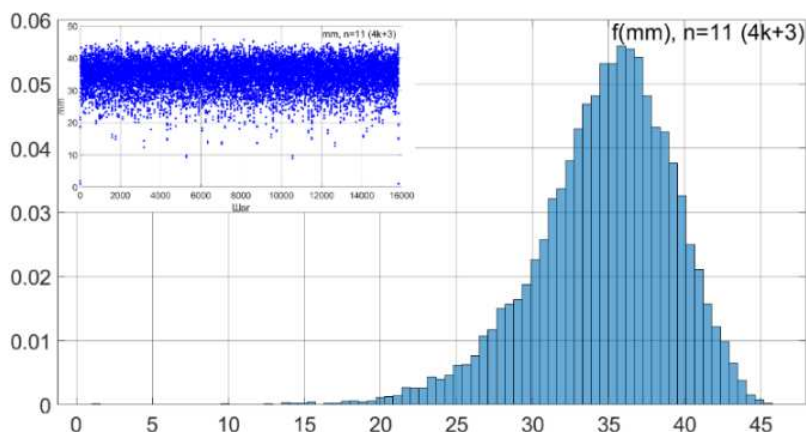


Рисунок 1 – Распределение пермутаций матрицы 11×11 в алгоритме «схема sin» по значениям mt -метрики.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-07-00409.

Список использованных источников

1. Матюшкин И.В. , Кожевников В.С. Клеточно-автоматный алгоритм пермутации матриц // Математика и математическое моделирование. 2019. №3. С. 1-24.

2. Матюшкин И.В. , Кожевников В.С Клеточно-автоматные алгоритмы пермутации матриц // ТРУДЫ МФТИ. 2019. Том 11, № 1. С.39-52.

CELLULAR AUTOMATA ALGORITHMS FOR PSEUDORANDOM NUMBERS GENERATION

Igor Valerievich Matyushkin^{1,2}, Ph.D., senior researcher, imatyushkin@niime.ru, +7 (906) 048-21-11

Pavel Dmitrievich Rubis^{1,2}, technician, prubis@niime.ru, +7 (915) 040-03-72.

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd

Abstract: work describes four permutation algorithms of square matrices based on cyclic rows and columns shifts. This choice of discrete transformation algorithms is justified by the convenience of the cellular automaton (CA) formulation. Output matrices can be considered as pseudo-random sequences of numbers. As a result of numerical calculation, empirical formulas are obtained for the permutation period and the function of the period of a single CA-cell on the order of the matrix n . As a parameter of CA dynamics, we analyze two "mixing metrics" on permutations of the matrix (compared to the initial matrix).

Key words: cellular automata, permutation, random numbers, metric.

Acknowledgments: the work was supported by RFBR grant №20-07-00409.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕМРИСТОРА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

*Кузнецов Сергей Евгеньевич, техник¹, студент²,
sergey.y.kuznetsov@phystech.edu, +7 (977) 423-06-47*

*Теплов Георгий Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный
сотрудник¹, gteplov@niime.ru, +7 (963) 677-05-14*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: В статье рассматривается математическое моделирование мемристора, учитывающее влияние температуры и её изменение в ходе резистивного переключения. Перечислены параметры мемристора, испытывающие влияние температуры. Предложена и реализована численная модель, учитывающая зависимость подвижности кислородных вакансий от температуры и саморазогрев активного слоя. Показано, что повышение температуры ускоряет переключение устройства, рассмотрены вопросы выбора функции окна и оптимизации модели.

Ключевые слова: моделирование, мемристор, резистивное переключение, температура, подвижность кислородных вакансий.

Введение

Температура – это один из параметров резистивного переключения, влияние которого очевидно прослеживается при изучении экспериментальных вольтамперных характеристик мемристора, но ещё не до конца изучено. Попытка построения компактной математической модели, которая учтёт воздействие температуры, а также её изменение в процессе изменения сопротивления, и является предметом данной работы.

Основная часть

Необходимо учесть те параметры, на которые температура оказывает наибольшее влияние, а также изменение температуры в ходе процесса изменения проводимости. Одним из ключевых параметров компактной модели, которая меняется в зависимости от температуры является подвижность кислородных вакансий. В работе [1] она выражается по формуле (1):

$$\mu_v = \frac{\sigma M}{N_A en\rho} \quad (1)$$

Проводимость σ в числителе для оксидов переходных металлов в работе [2] предлагается вычислять по формуле (2):

$$\sigma = \sigma_{0,Mott} T^{-2s} \exp\left(-\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^s\right) + \sigma_{0,ES} T^{-2s} \exp\left(-\left(\frac{T_{0,ES}}{T}\right)^s\right) \quad (2)$$

которая является обобщением законов Мотта и Эфроса-Шкловского для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка.

Изменение температуры в ходе процесса переключения в [3] выражается при помощи выражения (3):

$$T = T_0 + \frac{R_{th}}{R} V^2 \quad (3)$$

Выводы

1) Модель согласуется с тем, что увеличение температуры ускоряет процесс резистивного переключения.

2) Полученная модель учитывает саморазогрев мемристора в процессе переключения.

3) Полученное математическое описание позволяет параметризовать биполярные мемристоры без привязки к материалу активного слоя, включая мемристоры с окном памяти, превышающим два порядка.

4) Для моделирования в большом диапазоне сопротивлений ($R_{off}/R_{on} = 1000$) нецелесообразно

использование функции окна Биолека. Для этого лучше подходят модели, содержащие пороговое напряжение (например, BCM), либо несимметричные функции окна (например, TEAM).

Список использованных источников

1. Singh J., Raj B. Temperature dependent analytical modeling and simulations of nanoscale memristor //Engineering science and technology, an international journal. – 2018. – Т. 21. – №. 5. – С. 862-868.
2. Yildiz A. et al. Electrical properties of TiO₂ thin films //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2008. – Т. 354. – №. 45-46. – С. 4944-4947.
3. Ielmini D. Modeling the universal set/reset characteristics of bipolar RRAM by field-and temperature-driven filament growth //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Т. 58. – №. 12. – С. 4309-4317.
4. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift //Radioengineering. – 2009. – Т. 18. – №. 2.
5. Corinto F., Ascoli A. A boundary condition-based approach to the modeling of memristor nanostructures //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2012. – Т. 59. – №. 11. – С. 2713-2726.

MEMRISTOR MODELING CONSIDERING TEMPERATURE INFLUENCE ON RESISTIVE SWITCHING PARAMETERS

*Sergey Evgenievich Kuznetsov, junior researcher¹, student²,
sergey.y.kuznetsov@phystech.edu, +7 (977) 423-06-47*

*Georgiy Sergeevich Teplov, Ph.D., senior researcher¹,
gteplov@niime.ru, +7 (963) 677-05-14*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² MIPT, Dolgoprudny

Abstract: In this paper, mathematical modeling of memristor has been discussed considering temperature effects and its variation during resistive switching. Temperature-affected

parameters of memristor has been listed. A model of memristor has been carried out, including temperature influence on mobility of oxygen vacancies and self-heating effects. The model reveals that increasing temperature causes faster switching, also some problems of window function choice and model optimization have been discussed.

Key words: modeling, memristor, resistive switching, temperature, mobility of oxygen vacancies.

УДК 621.315.593

<https://doi.org/10.29003/m1650.Silicon-2020/361-364>

ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CDTE-SIO₂-SI

*Отажонов Салим Мадрахимович, д.ф.-м.н., профессор¹,
otajonov_s@mail.ru, +998936431433*

*Алимов Нодир Эсоналиевич, учитель кафедры физики,
alllnod@mail.ru, +998936404183*

*Ботиров Кадыр Абдуллаевич, учитель кафедры
Безопасность жизнеобеспечения, botirov_k.a@mail.ru
+998911168708*

¹ ФерГУ, г. Фергана

Аннотация: Целью данной работы является повышение оперативного управления длительного сохранения информации и создание малогабаритных устройств.

Ключевые слова: гетероструктура, селективность, фотонапряжение.

Введение

Совместить свойства регистрации сигналов и запоминания является редким случаем для гетероструктур. Сравнении с другими гетеструктурами $CdTe-SiO_2-Si$ обладают ряд преимуществ. Они обладают селективностью широкого диапазона излучений и не восприимчивы к вредному

воздействию радиации. При наращивании $CdTe$ на поверхность SiO_2 обнаружилось, что при этом $CdTe$ будут обладать монокристаллической структурой [1], а это дает еще одно преимущество долговечности при эксплуатации [2].

Запоминающее устройство состоит из МДП-транзистора, выполненного из слоя алюминия, на который нанесен полупроводниковый слой из Si , а затем на слой нанесен другой слой высокоомного диэлектрика в виде SiO_2 с толщиной $0,38 \pm 0,02$ мкм и источника управляющих импульсов, выполненного в виде пленки с аномально большим фотонапряжением. Площадь полупроводниковой пленки с аномально большими фотонапряжениями равна $1/3$ площади слоя диэлектрика. На слое диэлектрика выполнены контакты МДП-транзистора – исток, сток, затвор. Пленка выполнена из $CdTe$ с двумя контактами причем контакт выполнен заодно с контактом затвор МДП – транзистора. Запоминающее устройство снабжено двумя резисторами. Контакт через резистор подключен к контакту и к отрицательному выводу источника напряжения. Контакт исток подключен к положительному выводу источника напряжения.

Диапазон фоточувствительности составляет $0,5 \div 3,0$ мкм принимаемого электромагнитного излучения.

Для определения времени запоминания информации сначала снимают между контактами спектральную зависимость тока короткого замыкания от длины волны света, затем МДП-структуру заряжают электрическим напряжением порядка 300 В и длительностью 1-3 с, затем отключают напряжение, снимают спектральную зависимость тока короткого замыкания от длины волны света, потом МДП-структуру выдерживают в темноте 6 суток, снимают спектральную зависимость тока короткого замыкания от длины волны света.

В МДП-структуре временем накопления информации управляет электрическое поле со встроенным в высокоомный диэлектрик зарядом в широком диапазоне длин волн принимаемого электромагнитного излучения.

Выводы

При подключении источника электрического напряжения потребляется сравнительно малая мощность. МДП-структура работает как усилитель мощности из теллурида кадмия и как память сигнала во встроенном заряде на границе $CdTe$ и двуокиси кремния, при этом контакт затвора МДП структуры на основе $CdTe-SiO_2-Si$ является одновременно одним из контактов пленки теллурида кадмия.

Соединение пленки теллурида кадмия исключает источник управляющего электрического напряжения, расширяет функциональные возможности предлагаемого устройства и упрощает его.

Список использованных источников

1. Gaubas. E. and others. Study of polycrystalline CdTe films by contact and contactless pulsed photo-ionization spectroscopy//Thin Solid Films. 2018. Vol. 660 P. 231–235.

2. Терзян О.А. Анализ и разработки методов повышения надежности полупроводниковых постоянных запоминающих устройств и оценка эффективности их использования. Дисс. на соискан. Канд. техн. наук. 1983.

MEMORY DEVICE BASED ON CDTE-SIO2-SI HETEROSTRUCTURE

Salim Madrakhimovich Otazhonov, Doctor of Phys. mat. Sciences, Professor ¹, otajonov_s@mail.ru, +998936431433

Nodir Esonalievich Alimov, teacher of the Department of Physics ¹, allnod@mail.ru, +998936404183

Kadyr Abdullayevich Botirov, teacher of the Department of Life Support Safety, botirov_k.a@mail.ru, +998911168708

¹ Fergana State University, Fergana

Abstract: In this paper, an increase in the operational control of long-term information storage based on the $CdTe-SiO_2-Si$ heterostructure is considered, and the selectivity of a wide range of radiation in the range of 0.5-3.0 microns is shown.

Key words: photosensitivity, heterostructure, electric fields, selectivity, photovoltage.

УДК 004.076.4

<https://doi.org/10.29003/m1651.Silicon-2020/364-368>

МЕМРИСТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ Si_3N_4 И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В НИХ

*Орлов Олег Михайлович, к.т.н., доцент, нач. лаборатории¹,
oorlov@niime.ru, +7 (495) 229-72-81*

*Гусматулин Андрей Андреевич, аспирант²,
aagismatulin@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-88-91*

*Гриценко Владимир Алексеевич, д. ф.-м. н., с.н.с²,
grits@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-88-91*

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва

² ИФП СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Рассматриваются перспективные направления развития резистивной энергонезависимой памяти ReRAM. Нитрид кремния является перспективным резистивным переключающим слоем для мемристоров. В данной работе проведено экспериментальное исследование эффекта переключения и переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния.

Ключевые слова: МНОП, мемристор, формовка, нитрид кремния, КМОП. ключевые слова.

Введение

Для проектной нормы 28 нм и ниже, интеграция КМОП технологии с Flash памятью для таких перспективных направлений приборов, как high-k metal gate High-K, FD-SOI, FinFET и других, значительно усложняется и желательны более простые решения. Поэтому становятся актуальными такие направления энергонезависимой памяти, как MRAM, PCM,

FeRAM, ReRAM. Принцип функционирования мемристора (ReRAM, Resistive Random Access Memory) основан на переключении диэлектрической активной среды между логическими состояниями с высоким резистивным состоянием (High Resistance State - HRS) и низким резистивным состоянием (Low Resistance State - LRS). Различные нестехиометрические диэлектрики, такие как ZrO_x , TaO_x , AlO_x , NbO_x и SiO_x , изучаются в качестве активной среды элементов хранения. Особенно представляют интерес HfO_x , ZrO_x для ReRAM и FeRAM элементов хранения в настоящее время [1]. Преимущество нитрида кремния (Si_3N_4) перед другими диэлектриками заключается в том, что нитрид кремния совместим с кремниевой технологией и является одним из ключевых диэлектриков в КМОП схемах. В отличие от оксида кремния (SiO_2), нитрид кремния (Si_3N_4) имеет высокую концентрацию электронных ловушек и широко используется в качестве среды хранения связанного заряда на ловушках во Flash памяти [2].

Экспериментальные исследования и моделирование

Несмотря на многие проведённые исследования, механизм переноса заряда в ReRAM на основе Si_3N_4 все еще не ясен [3,4]. Структуры металл-нитрид-оксид-кремний Ni (100нм)/ Si_3N_4 (4 нм) / SiO_2 (2 нм) / p^+ Si, которые проявляют мемристорские свойства, были получены с использованием химического осаждения из паровой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) при 700°C в смеси SiH_2Cl_2 и NH_3 . Ионная имплантация ионов BF_2^+ была выполнена для формирования высоколегированного слоя p^+ - типа в подложке с последующим быстрым термическим отжигом. На заключительном этапе формировался металлический верхний электрод (толщиной 100 нм) с помощью термического испарителя с использованием теневой маски. Изготовленная структура ReRAM металл-нитрид-оксид-кремний не требует процедуры формовки. На рис. 1 показано, что типичное биполярное резистивное переключение наблюдается в изготовленной структуре МНОП. Диаметр

верхнего металлического электрода составлял 300 мкм. Рабочее напряжение находилось в соответствующих пределах: $V_{set} = 4.3\text{В}$, $V_{reset} = -2.7\text{В}$ при соответствующем ограничении тока около 3 ма. Окно памяти достигает 4 порядков. Изготовленная структура МНОП без формовки демонстрирует воспроизводимое биполярное переключение. После 3 циклов параметры V_{set} и V_{reset} оставались стабильными. Основные параметры ВАХ и переключения мемристоров сильно зависят от технологии изготовления активного слоя МНОП мемристора.

Следует отметить, что ток утечки достаточно мал при комнатной температуре в исходном состоянии. Дополнительно проводились исследования транспорта заряда в диапазоне температур 298-450°K, которые показали, что основной механизм переноса заряда в структуре металл-нитрид-оксид-кремний (МНОП) в высокоомном состоянии описывается моделью тока с ограниченным пространственным зарядом с ловушками.

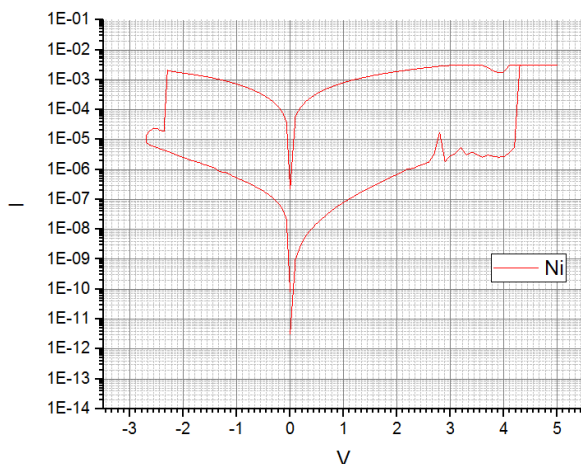


Рисунок 1 – Циклирование МНОП мемристора на основе Si₃N₄ с помощью петли переключений «voltage sweep» (1 цикл HRS-LRS)

В состоянии низкого сопротивления механизм переноса

заряда описывается моделью тока с ограниченным пространственным зарядом с заполненными ловушками. Параметры ловушки определялись в мемристоре на основе Si_3N_4 в состоянии высокого сопротивления. Хотя вольт-амперные характеристики в состоянии LRS слабо зависят от температуры (соответственно модель Френкеля не применима для описания переноса заряда), ток в омической части вольт-амперной характеристики увеличивается с ростом температуры, и это указывает на то, что природа проводящего канала «филамента» ближе к полупроводнику, чем к металлу.

Выводы

В работе были получены структуры МНОП с верхним электродом из никеля, проявляющие мемристорные свойства. Мемристор МНОП не требует процедуры формовки. Основные параметры ВАХ и переключения полученных мемристоров ($V_{\text{set}} = 3 - 4,3 \text{ В}$, $V_{\text{reset}} = -1,6 - -2,7 \text{ В}$). Окно памяти МНОП структуры составило около 4 порядков. Для описания механизма переноса заряда предложена модель протекания тока с ограниченным пространственным зарядом с ловушками.

Изготовление экспериментальных образцов, экспериментальные и теоретические исследования были выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-03018\19).

Список использованных источников

1. G. Krasnikov, O. Orlov. Perspective directions of non-volatile memory FeRAM and ReRAM based on thin HfO_x layers and their features (invited) // IV INTERNATIONAL CONFERENCE on MODERN PROBLEMS IN PHYSICS OF SURFACES AND NANOSTRUCTURES ICMPSPN 2019) , Book of Abstracts, 26-29 August 2019, Yaroslavl, RUSSIA, p.20.
2. V. A. Gritsenko, in Thin Films on Si: Electronic and Photonic Applications, edited by V. Narayanan, M. Frank and A. A. Demkov (World Scientific Press, 2016), pp. 273-322.

3. S. Kim, S. Jung, M. H. Kim, T. H. Kim, S. Bang, S. Cho and B. G. Park, Nanotechnology 28 (12) (2017).

4. S. V. Tikhov, A. N. Mikhaylov, A. I. Belov, D. S. Korolev, I. N. Antonov, V. V. Karzanov, O. N. Gorshkov, D. I. Tetelbaum, P. Karakolis and P. Dimitrakis, Microelectron Eng 187, 134-138 (2018).

MEMRISTOR STRUCTURES BASED ON THIN Si_3N_4 LAYERS AND CHARGE TRANSPORT MECHANISM RESEARCH

Oleg Mikhailovich Orlov¹, Ph.D.Eng., Associate Professor, Head of laboratory, oorlov@niime.ru, +7 (495) 229-72-81

Andrey Andreevich Gismatulin², Postgraduate, aagismatulin@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-88-91

Vladimir Alekseevich Gritsenko², Dr.Sc., Head of research group, grits@isp.nsc.ru, +7 (383) 330-88-91

¹ Research Institute of Molecular Electronics, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia

² Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

Abstract: The article describes promising directions of development of non-volatile resistive memory ReRAM. Silicon nitride is a promising resistive switching layer for memristors. In this work we conducted an experimental researches of the switching effect and charge transport in memristores based on silicon nitride

Key words: MNOS, memristor, forming-free, silicon nitride, CMOS.

Acknowledgment: The fabrication of experimental samples and the experimental and theoretical researches were carried out by grant of the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-29-03018).

УДК 621.38

<https://doi.org/10.29003/m1652.Silicon-2020/369-372>

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОМПОНЕНТ КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Колдаев Игорь Михайлович, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, ведущий специалист аппарата генерального директора, АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград, ikoldaev@niime.ru, +7 (495) 229-74-89.

Аннотация: В докладе описан укрупненный алгоритм автоматизированного проектирования и структура базы знаний электронных информационно-измерительных систем, основанный на многоступенчатой трансформации параметров сигналов и устройств.

Ключевые слова: САПР, интеллектуальные информационные системы, база знаний, полупроводниковая электроника, измерительные системы.

Введение

Современная электронная индустрия базируется на многоуровневой корпорации производителей материалов, элементной базы, устройств и систем, широкого применения средства автоматизированного проектирования [1]. Разработка систем автоматизированного проектирования и информационно-поисковых систем, ориентированных на отечественную элементную базу, актуальная задача.

Результаты работы

Ранее в [2] рассмотрен алгоритм автоматизированного проектирования электронной информационно-измерительной

системы, в этом алгоритме применен новый элемент, реализующий фундаментальный параметрический синтез. Развивая этот подход, рассмотрим расширенный для интегрированной информационной системы алгоритм, позволяющей комплексно решать задачи выбора принципа, метода и аппаратной реализации задач исследования объектов различных предметных областей посредством электронных устройств. Этим создается информационная поддержка для актуальной задачи внедрения электронной компонентной базы в электронном приборостроении.

Целью представленной работы служит создание интегрированной информационной среды, поддерживающей разработку электронных устройств на этапах от постановки технического задания до реализации проекта в виде конструкторской и технологической документации на изделие, решающее поставленную в ТЗ задачу.

Представлен алгоритм трансформации параметров электронных компонент кремниевой электроники во внутренние параметры электронного устройства, предназначенного для задач информационно-измерительного характера. Рассматриваемый алгоритм осуществляет взаимосвязь параметров прибора, и его компонент, с параметрами регистрируемого устройством сигнала, также с параметрами передаточной функции устройства и выходного сигнала, поступающего на элемент отображения и индикации электронной системы.

Структура базы знаний включает два ядра и оболочку.

Мульти-ядерная структура базы знаний имеет новизну в качестве информационного обеспечения автоматизированного проектирования электроники.

Первое ядро содержит сведения об элементной базе, представляющие перечень параметров элементной базы, а также оболочку, содержащую знания о взаимосвязи параметров сигналов с передаточной функцией технической системы.

Второе ядро содержит сведения об объектах исследования из областей применения электронных устройств (медицины, экологии и т.д.). В оболочке данного ядра заключены сведения

о параметрах сигналов, отражающих состояние объектов предметных областей. Эти сигналы предназначены для регистрации приемной частью электронных устройств.

Рассматриваемый алгоритм согласования параметров позволяет объединить содержимое двух ядер (элементной базы и прикладных областей) в единую информационную систему, решающую задачи поддержки процедур разработки и последующего внедрения электронных устройств.

Выводы

Описана структура базы знаний, содержащая два взаимосвязанных ядра с оболочками, описывающая как электронные компоненты, так и области их использования. Такая информационная система позволяет комплексно решать задачи проектирования электронных устройств и систем с учетом их последующего внедрения.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.

2. Колдаев И.М. Фундаментальный параметрический подход к синтезу электронных систем //Международная конференция «Микроэлектроника-2019». Сборник тезисов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. С. 274-278.

PARAMETRIC APPROACH TO THE INFORMATION SYSTEM OF SILICON ELECTRONICS COMPONENTS CONSTRUCTION

Igor Koldaev, Ph.D., Senior Researcher, +7 (495) 229-74-89, ikoldaev@niime.ru

MERI, Zelenograd, Moscow, Russia

Abstract: The report describes an enlarged computer-aided design algorithm and the structure of the knowledge base of

electronic information-measuring systems based on multi-stage transformation of signal and device parameters is described.

Key words: CAD, intelligent information systems, knowledge base, semiconductor electronics, test hardware.

УДК 621.3

<https://doi.org/10.29003/m1653.Silicon-2020/372-374>

**МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВКЛАДА ДОПУСКОВ НА КРИТИЧЕСКИЕ
ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ РИСУНКА ФОТОШАБЛОНА В БЮДЖЕТЫ
ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

*Балан Никита Николаевич, к.т.н., инженер-конструктор
1-й категории¹, nbalan@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

*Иванов Владимир Викторович, заместитель начальника
отдела проектирования фотошаблонов¹, vlaivanov@niime.ru,
+7 (495) 229-72-13*

*Панкратов Александр Львович, начальник отдела
проектирования фотошаблонов¹, apankratov@niime.ru,
+7 (495) 229-72-13*

*Харченко Екатерина Леонидовна, инженер-конструктор
2-й категории¹, ekharchenko@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: В работе на основе моделирования процессов проекционной фотолитографии анализируется вклад допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблона в бюджеты литографических операций.

Ключевые слова: фотошаблон, проекционная фотолитография.

Введение

Фотошаблон (ФС) является ключевым элементом при производстве интегральных схем и в большинстве случаев представляет собой кварцевую подложку с нанесенными слоями хрома и/или силицида молибдена, в которых сформирован рисунок, состоящий из десятков миллионов элементарных топологических структур [1], к размеру и точности размещения которых предъявляются весьма строгие требования. Корректное определение этих требований представляется необходимым условием достижения приемлемого качества литографических операций.

Основная часть

Для основных видов фотолитографий, осуществляемых при производстве интегральных схем, нормируется ряд параметров технологических операций, в том числе допуски на дефокусировку, критический размер контрольного элемента (остаточная компонента, 3σ) и на точность совмещения слоев. Указанные допуски находятся в сильной зависимости от группы качества фотошаблонов, применяемых при фотолитографии [2].

В данной работе на основе моделирования процессов проекционной фотолитографии определяется вклад допусков на параметры ФС в бюджеты литографических операций (по совмещению, глубине фокуса и т.д.) для технологий различных проектных норм.

Выводы

В работе обозначены вклады допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблона в бюджеты литографических операций. Проведен анализ тенденций изменения требований к параметрам фотошаблонов по мере развития полупроводниковой технологии.

Список использованных источников

1. Красников, Г.Я. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах / Г.Я. Красников, Е.С. Горнев. – М., 2013.
2. Otsuka, T. CD error budget analysis in ArF lithography / T. Otsuka, K. Sakamoto // Data Analysis and Modeling for Process Control / ed. K.W. Tobin. – SPIE, 2004. – Vol. 5378 – P. 160–171 – doi:10.1117/12.534582.

METHOD FOR CALCULATION OF MASK SPECIFICATION CONTRIBUTION TO LITHOGRAPHIC BUDGETS

*Balan Nikita Nikolaevich¹, Ph.D., design engineer,
nbalan@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

*Vladimir Viktorovich Ivanov¹, deputy head of MDP Department,
vlaivanov@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

*Alexander Lvovich Pankratov¹, head of MDP Department,
apankratov@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

*Ekaterina Leonidovna Kharchenko¹, design engineer,
ekharchenko@niime.ru, +7 (495) 229-72-13*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: In this work we consider the contribution of tolerances on the mask pattern quality to the error budgets of lithographic operations. A method for developing a photomask specification based on the lithography modeling is proposed.

Key words: photomask, photolithography.

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПТИМИЗАЦИИ
ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ
БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАНОСТРУКТУР.
ПОСТАНОВКА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧИ**

*Шарапов Андрей Анатольевич, научный сотрудник¹,
аспирант², andrey.sharapov@phystech.edu, +7 (905) 747-68-35*

*Шамин Евгений Сергеевич, младший научный сотрудник¹,
аспирант²*

*Скуратов Илья Дмитриевич, младший научный сотрудник¹,
аспирант²*

*Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, д.т.н.,
профессор, зам. руководителя ПТН¹*

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

²МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: Шероховатость боковых поверхностей элементов – эффект, проявляющийся при формировании структур микро- и нанoeлектроники фотолитографическим способом. В работе описывается начальная модель процесса появления шероховатости стенок структур, а также определяется подход к решению задачи оптимизации параметров фотолитографического процесса для минимизации шероховатости. На основе этого подхода разрабатывается программный комплекс.

Ключевые слова: шероховатость, фотолитография, оптимизация.

Введение

Развитие технологий производства интегральных схем связано с масштабированием проектных норм [1]. При этом неровности структур не удаётся уменьшать с таким же фактором [2]. Эффект шероховатости негативно влияет на

характеристики приборов нано- и оптоэлектроники. Прямым проявлением неровностей структур интегральных фотонных схем является появление излучательных мод, рассеивающих энергию световой волны.

Модель формирования шероховатости в резисте

Ключевым этапом, определяющим возникновение неровностей боковых поверхностей, является фотолитография. По причине наличия эффекта «фотонного шума» доза излучения в каждой точке облучаемой поверхности будет обладать некоторым естественным разбросом. На основе этого мы предлагаем определить область негарантированной засветки, в которой экспонирование молекул резиста происходит лишь с определённой вероятностью. Это объясняет случайный характер неровности краёв элементов. Схематически поведение резиста в областях засветки и за их пределами проиллюстрировано на рисунке 1.

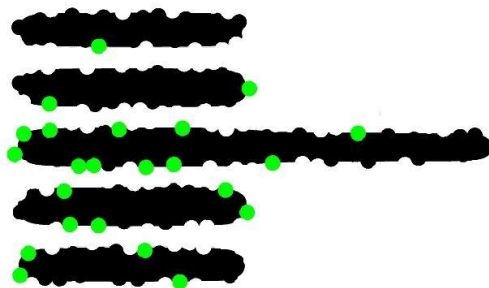


Рисунок 1 – Пояснение к модели формирования шероховатости боковых поверхностей наноструктур

Выводы

В результате применения разработанной модели шероховатости проведена оценка влияния параметров фотолитографии для базовых наноструктур, а также сформирована методика решения задачи оптимизации фотолитографического процесса для минимизации шероховатости.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера. 2011.

2. Asenov A., Brown A., Davies J., Kaya S., Slavcheva G. Simulation of intrinsic parameter fluctuation in decanometer and nanometer-scale MOSFETs // IEEE Transactions on Electron Devices, 2003. – Вып. 50. – С. 1837-1852.

SOFTWARE COMPLEX FOR PHOTOLITHOGRAPHY OPTIMIZATION FOR MINIMIZATION OF SIDEWALL ROUGHNESS EFFECTS IN NANOSTRUCTURES. GROUNDS AND PROBLEM STATEMENT

Andrey Anatolyevich Sharapov, research scientist¹, Ph.D. student², andrey.sharapov@phystech.edu, +7 (905) 747-68-35

Evgeniy Sergeevich Shamin, junior research scientist¹, Ph.D. student²

Ilya Dmitrievich Skuratov, junior research scientist¹, Ph.D. student²

Evgeniy Sergeevich Gornev, corresponding member of RAS, doctor of technical science, professor, deputy head of the priority technological area¹

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: Sidewall roughness is an effect occurred during micro- and nanoelectronics' structure formation using photolithography. In this work we describe the basic model of roughness emergence on nanostructures' sidewalls, and determine the approach of photolithography parameters optimization in order to minimize the roughness. the standard route of test structures formation is considered. We develop a software complex based on this approach.

Key words: roughness, photolithography, optimization.

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ МАРШРУТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БИБЛИОТЕК СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Коротких Семён Андреевич, инженер-конструктор 2-й категории, АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград, skorotkikh@niime.ru, +7 (916) 888-30-58.

Аннотация: развитие технологий открывает для индустрии новые возможности. Данная работа посвящена программному способу преобразования библиотеки стандартных элементов, позволяющему получить библиотеку с новыми характеристиками.

Ключевые слова: топология, регулярность, ширина затвора, автоматизация, библиотека, ячейка, стандартные элементы.

Введение

Сокращение размеров технологического процесса накладывает дополнительные условия на топологию стандартных элементов. Одним из таких условий является требование к регулярности расположения затворов. Однако, фиксированное расположение затворов транзисторов существенно ограничивает возможности тополога по размещению элементов внутри ячейки.

Одним из используемых инструментов для изменения характеристик ячеек в таких условиях становится изменение длины канала транзистора.

Обыкновенного масштабирования в данном случае недостаточно, поскольку при изменении геометрии затвора, нужно сохранять пропорции объектов в других слоях. Для решения задачи масштабирования транзисторов было создано специализированное ПО на языке SKILL, позволяющее изменять длину канала транзистора с сохранением пропорций объектов для всех ячеек библиотеки.

Принцип работы

Общий маршрут модификации топологии выглядит следующим образом:

1. Для каждого затвора ячейки определяем координату X, через которую будет проведена *referenceLine*.

2. Для всех слоёв топологии используем инструмент *stretchPolygon*, в результате получаем изменение объектов, затронутых *referenceLine* и сдвиг остальных объектов для сохранения пропорций.

3. Применяем *stretchPolygon* ещё раз, но уже в обратном направлении, для тех объектов, чьи габариты отличаются от стандартных значений.

Для соответствия топологии схемотехническое представление ячеек также модифицируется средствами разработанного ПО.

Заключение

Небольшой объём возникающих в результате работы скрипта ошибок можно оперативно поправить вручную. Тем самым скрипт позволяет существенно сэкономить время на разработку библиотеки с измененной длиной канала транзисторов. Недостатком предложенного метода является необходимость в библиотеке-источнике.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.

2. Загидуллина О.Р., Надин А.С., Исследование LDE эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90-28нм. // сборник тезисов Международный форум «Микроэлектроника-2019» Школа Молодых Ученых, ООО РПК «Спектр» 2019 – 378с.:ил. Стр. 309-315

3. Marc Pons Sole, Layout Regularity for Design and Manufacturability, <http://hdl.handle.net/10803/96983>, p.19.

METHODS OF AUTOMATION OF SEPARATE STEPS OF STANDARD CELL DESIGN FLOW

Semyon Andreevich Korotkikh, design engineer, JSC MERI, Moscow, Zelenograd, skorotkikh@niime.ru, +7 (916) 888-30-58

Abstract: The development of technologies gives new opportunities for the industry. This work is devoted to programmatic way of standard cell transformation that give an opportunity to receive a new library with new characteristics.

Key words: layout, regular structure, channel length and width, automation, library, standard cell.

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1656.Silicon-2020/380-382>

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ БИБЛИОТЕКИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ SMO

Сахащик Ульяна Андреевна, техник¹, usahashchik@niime.ru, +7 (996) 911-73-87

Соколова Евгения Васильевна, инженер-конструктор 2-й категории¹, evsokolova@niime.ru, +7 (925) 222-47-63

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: в данной работе представлена разработка инструмента для генерации библиотеки тестовых ячеек для технологии 28 нм и ниже и исследование данного набора на наличие запрещенных шагов.

Ключевые слова: фотолитография, SMO, библиотека тестовых структур, 28 нм.

Введение

В технологиях с размерными нормами 28 нм и ниже [1] SMO играет существенную роль в процессе подготовки OPC-решения, а основной фактор, определяющий точность полученного источника, – это входной набор тестовых ячеек. К тестовым структурам для SMO применяются особые правила (размер, периодичность и т.д.), из-за чего возникает потребность в инструменте, позволяющем быстро генерировать стартовый набор тестовых ячеек для SMO. Кроме того, необходимо исследовать полученный набор на наличие запрещенных шагов для дальнейшего анализа и проработки OPC-решения.

Основная часть

Основной проблемой проведения SMO на весь кристалл является длительность и высокая вычислительная сложность процесса, поэтому моделирование проводят на наборе тестовых ячеек, которые отражают структуры наиболее критичных топологических конфигураций, встречаемых в реальном дизайне.

В данной работе разрабатывался скрипт на языке TCL, который генерирует библиотеку клипов для слоя Поликремний технологии 28 нм. Рассматривались 4 типа различных структур. По итогам выполнения скрипта была сгенерирована библиотека, состоящая из 312 тестовых структур.

Было проведено исследование библиотеки клипов на наличие запрещенных шагов, а именно структур, которые не дают получить достаточно качественный источник в результате SMO [2]. Эксперимент проводился с помощью САПР Mentor Graphics Calibre Workbench SMO.

В результате моделирования были получены рекомендуемые формы источников для каждой из матриц, а также графики окна процесса, отражающие реакцию каждой из тестовых структур на изменение параметров экспонирования. Было проведено сравнение значений глубины фокуса для каждой из структур.

Выводы

Проанализировав результаты моделирования на запрещенный шаг, были выделены 2 типа структур, мешающих формированию широкого окна процесса:

1. Структуры с запрещенным шагом.
2. Структуры, которые сильно сужают окно процесса.

Из них: 44 требуют более тщательного рассмотрения в процессе подготовки OPC-решения, так как сильно влияют на ширину процессного окна, 2 не дают оптимальных значений дозы и фокуса после проведения SMO и требуют применения более агрессивного OPC.

Список использованных источников

1. Красников, Г.Я. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах / Г.Я. Красников, Е.С. Горнев. – М., 2013.

2. Peipei Liang, Zhifeng Gan. Challenges and solutions of few-line patterns with freeform illumination in immersion lithography // ed. IEEE, – doi: 10.1109/CSTIC.2018.8369217

DEVELOPMENT OF A TOOL FOR GENERATING A SET OF CLIPS FOR CONDUCTING SMO

Ulyana Andreevna Sahashchik, technician¹,
usahashchik@niime.ru, +7 (996) 911-73-87

Evgeniya Vasilievna Sokolova, design engineer¹,
evsokolova@niime.ru, +7 (925) 222-47-63

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: In this paper present the development of a tool for generating a set of clips for 28nm and below technology nodes and the research a library of clips for the presence of forbidden steps.

Key words: photolithography, SMO, library clips, 28 nm.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ ЯЧЕЕК ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ В MPW ЗАПУСК

Харченко Екатерина Леонидовна, аспирант², инженер-конструктор 2 кат.¹, ekharchenko@niime.ru, +7 (917) 533-34-20

Соколова Евгения Васильевна, инженер-конструктор 2 кат.¹, evsocolova@niime.ru, +7 (925) 222-47-63

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград

² МФТИ, г. Москва

Аннотация: В данной работе рассмотрен стандартный маршрут формирования тестовых структур. На его основе разработана методика генерации структур, разрешенных для включения в MPW запуск.

Ключевые слова: тестовая ячейка, MPW, фотолитография.

Введение

При разработке новых технологий, опций или отработке измененных технологических процессов возникает необходимость формирования тестовых топологических ячеек. Тестовые структуры, получаемые стандартным генератором от Calibre WorkBench, ограничены в наборе конфигураций и диапазоне варьируемых параметров, а также не соответствуют требованиям технологов для включения таких структур в реальные MPW запуски. Включение тестовых ячеек в состав MPW, в отличие от целого тестового запуска без серьезных ограничений по правилам проектирования, значительно экономит производственные ресурсы на этапе отработки новой технологии. В связи с этим важно разработать методологию формирования тестовых ячеек для включения в маршрут подготовки управляющей информации. В данной статье речь идет о проектной норме 180нм, в процессе дальнейшей работы планируется переход на нормы 90нм, 65нм.

Методы

В пределах рассмотренной технологии КНИ180 был изучен DRM и выявлены критические слои. Ими оказались поликремний, первый металл, контакты и локальные вольфрамовые межсоединения. В стандартном варианте генерации тестовых структур необходимо выбрать тип структур, а далее задать значения параметрам:

1. Шаг сетки (нм).
2. Критический размер ширины (нм).
3. Критический зазор (нм).
4. Тип маркеров.

На выходе получаем стандартный набор структур, которые варьируются в узком диапазоне и не соответствуют требованиям технологов. Возникает необходимость создания методологии формирования тестовых ячеек.

В результате проделанной работы был предложен следующий маршрут:

1. Выбор критических слоев.
2. Выбор конфигураций структур исходя из слоев.
3. Определение сетки.
4. Определение дополнительных слоев для соблюдения правил DRC.
5. Консультация с технологом на предмет отклонений от правил DRM.
6. Добавление маркеров.
7. Выбор варьируемых параметров для каждой тестовой структуры.
8. Анализ охвата тестовых структур с применением кластерного анализа.
9. Составление плана измерений.

Выводы

В результате данной работы была подготовлена методика разработки тестовых структур для последующей отработки технологических процессов. Работа проделана на примере технологии КНИ180. Разработанная тестовая матрица заложена в реальный запуск и ожидает этапа измерения.

Выгода полученного решения заключается в значительной экономии производственных ресурсов по сравнению с проведением отдельного запуска с тестовыми кристаллами. В рамках дальнейшей работы необходимо откорректировать указанные этапы с целью разработки тестовых ячеек для проектных норм 90нм и 65нм.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах. — М.: 2012.

2. Levinson, Harry J., Principles of Lithography. Bellingham, SPIE Press, Wash., USA, 2001

METHOD OF FORMING TEST PATTERNS TO INCLUDE INTO MPW

Ekaterina Leonidovna Kharchenko², Ph.D., design engineer, ekharchenko@niime.ru, +7 (917) 533-34-20

Evgeniya Vasilievna Sokolova¹, design engineer, evsokolova@niime.ru, +7 (925) 222-47-63

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: In this work the standard route of test structures formation is considered. A new method based on it is developed. The method allows generating test structures permitted to include into MPW.

Key words: test pattern, MPW, photolithography.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООРГАНИЗАЦИИ DSA-ЛИТОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Литаврин Михаил Владимирович, научный сотрудник¹, аспирант², mlitavrin@niime.ru, +7(977) 503-99-36

Горнев Евгений Сергеевич, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, начальник управления РПТН¹, egornev@niime.ru, +7(903)969-6097

Матюшкин Игорь Валерьевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник¹, imatyushkin@niime.ru, +7(906) 048-21-11

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

² МФТИ, г. Долгопрудный

Аннотация: в работе приводится клеточно-автоматная модель. Приведены результаты для случая 2D.

Ключевые слова: направленная самосборка (DSA), клеточные автоматы, литография.

Введение

Метод направленной самосборки (DSA), использующий самоорганизацию блок-сополимеров, рассматривается для процессов нормы 10 нм и ниже как потенциальная альтернатива применению метода мультипаттернирования (multiple patterning) [1], а также для исправления стохастических дефектов в процессах EUV-литографии [2]. Целью данной является построение модели самосборки DSA методом клеточных автоматов.

Схема DSA

Общая схема процесса усиления разрешения методом DSA включает в себя следующие стадии (рисунок 1):

- формирование направляющей структуры (с помощью иммерсионной литографии);

- нанесение раствора блок-сополимера на сформированную направляющую структуру с последующей термообработкой ($\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; при этом происходит фазовая сепарация блок-сополимера);
- селективное удаление одной из образовавшихся фаз и перенос изображения традиционными методами в нижележащие слои.

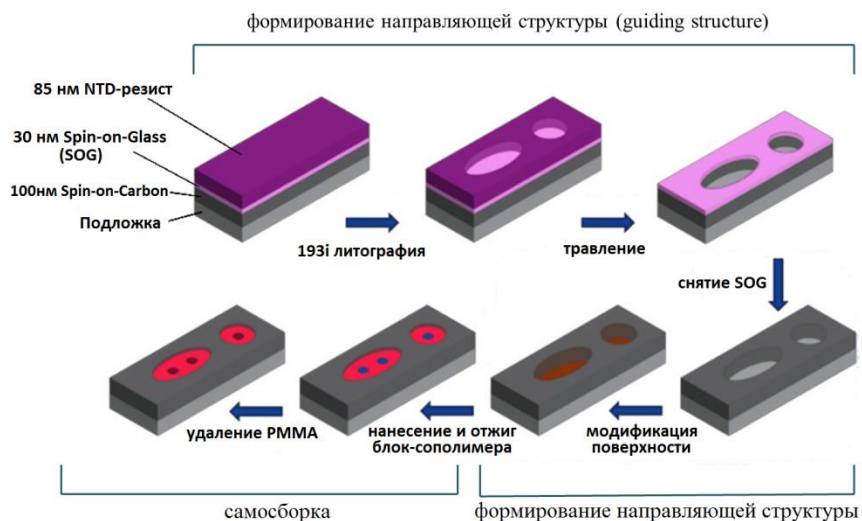


Рисунок 1 — Схема маршрута DSA [3]

Модель

Основные положения и характеристики модели [4]: цепь блок-сополимера аппроксимирована сегментами Куна, что предполагает жесткие звенья, свободно вращающиеся относительно друг друга; пространственный квант клеточного автомата взят равным длине Куна для полистирола; квант времени связан с процессами переноса, точнее коэффициентами самодиффузии и кинематической вязкости. Для определения кванта времени использована модель Рауза.

Полимер аппроксимируется сегментами Куна (сегмент Куна состоит из нескольких мономерных единиц; сегменты Куна могут свободно вращаться относительно друг друга). Весь объем аппроксимируется шестигранными шайбами (гексагональная сетка параллельно плоскости пластины, обобщенная на 3D). Горизонтальные слои расположены относительно друг друга со сдвигом для лучшей однородности по пространству. В модели используется обобщенный шаблон окрестности Неймана. Режим работы автомата — блочно-асинхронный.

Список использованных источников

1. Г.Я. Красников, О.П. Гущин, М.В. Литаврин, Е.С. Горнев DSA — комплементарный метод усиления разрешения иммерсионной литографии // Электронная Техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. С. 4-17.
2. Guerrero D.J. DSA and EUV: Complementary technologies to enable fine- pitch lithography // URL: <https://sst.semiconductor-digest.com/2017/09/dsa-and-euv-complementary-technologies-to-enable-fine-pitch-lithography/> (дата обращения: 1.06.2020)
3. R. Gronheid [et al.] "Implementation of templated DSA for via layer patterning at the 7 nm node", Proc. SPIE 9423, Alternative Lithographic Technologies VII, 942305 (19 March 2015)
4. E. Gornev, M. Litavrin, I. Matyushkin, and O. Gushin «Cellular automata method for directed self-assembly modeling» // Proc. SPIE 11022, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018, 110221N, 15 March 2019.

METHOD OF FORMING TEST PATTERNS TO INCLUDE INTO MPW

Mikhail Vladimirovich Litavrin^{1,2}, researcher, Ph.D.,
mlitavrin@niime.ru, +7(977) 503-99-36

Evgeny Sergeevich Gornev^{1,2}, Corresponding Member of RAS,
Doctor of Technical Sciences, professor, head of the RPTN department,
egornev@niime.ru, +7(903) 969-60-97

Igor Valerievich Matyushkin ¹, associate professor, Senior Researcher, imatyushkin@niime.ru, +7(906) 048-21-11

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: cellular automaton model is presented. The results for the 2D case are given.

Key words: directed self-assembly (DSA), cellular automata, lithography.

УДК 51-74

<https://doi.org/10.29003/m1659.Silicon-2020/389-391>

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СЛОЯ КОНТАКТНЫЕ ОКНА ДЛЯ SMO

Соколова Евгения Васильевна, инженер-конструктор 2 категории¹, evsokolova@niime.ru, +7 (925) 222-46-63

Харченко Екатерина Леонидовна, инженер-конструктор 2 категории¹, ekharchenko@niime.ru, +7 (977) 572-47-86

¹АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: Этап оптимизации маски и источника требует наличия оптимального набора тестовых структур. В данной работе описывается инструмент разработки библиотеки клипов, а также исследование на наличие в ней запрещенных шагов.

Ключевые слова: литография, SMO, клип, запрещенный шаг.

Введение

С уменьшением проектных норм достижение оптимального окна процесса и качества проработки структур на пластине становится все более сложным. Одним из решений этой задачи является этап одновременной оптимизации

источника и маски (source mask optimization, SMO). Он принимает топологию тестовых структур (клипов) в качестве желаемого результата и пытается подобрать источник освещения, обеспечивающий наилучшие характеристики. Таким образом, возникает необходимость в обеспечении качественного набора клипов.

Генерация библиотеки тестовых структур

В качестве слоя для генерации библиотеки тестовых структур выбран слой контактных окон, благодаря чему варьироваться может только расстояние между структурами. В качестве входных параметров используются параметры из правил проектирования, а также параметры установки экспонирования для определения оптического диаметра.

Итоговая библиотека включает в себя 18 типов клипов (периодическая матрица, матрица со сдвигом, матрица с пропуском рядов и т.д.). Количество клипом каждого типа определяется шагом и границами, которые задает пользователь.

Далее было проведено моделирование наборов клипов из библиотеки на наличие запрещенных шагов, а именно структур, при использовании которых достичь оптимального окна процесса не представляется возможным.

Выводы

В рамках данной работы приведены основные этапы разработки инструмента для генерации библиотеки тестовых клипов для слоя контактных окон для этапа оптимизации источника и маски, а также даны рекомендации по использованию полученных структур для технологического процесса 28 нм.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.

2. Шамин Е.С., Кузовков А.В., Балан Н.Н. Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2019, № 2(174). С 36–41.

TEST PATTERN LIBRARY GENERATION FOR CO LAYER FOR SMO

Evgeniya Vasilevna Sokolova, engineer¹, evsokolova@niime.ru, +7 (925) 222-46-63

Ekaterina Leonidovna Kharchenko, engineer¹, graduate student², ekharchenko@niime.ru, +7 (977) 572-47-86

¹JSC MERI, Moscow, Zelenograd

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Abstract: The source-mask optimization stage requires an optimal set of test structures. This paper describes a tool for developing a clip library and search of forbidden pitch in it.

Key words: lithography, SMO, clip, forbidden pitch.

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29003/m1660.Silicon-2020/391-394>

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМИ ПРОЦЕССАМИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

Медведев Константин Александрович, инженер-программист¹, kmedvedev@niime.ru, +7 (910) 454-16-99

Панкратов Александр Львович, начальник отдела¹, apankratov@niime.ru, +7 (903) 009-01-13

*Иванов Владимир Викторович, зам. начальника отдела¹,
vlaivanov@niime.ru, +7 (910) 729-28-59*

¹ АО «НИИМЭ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация: В работе рассмотрена возможность применения системы управления рабочими процессами (Workflow Management System - WFMS) при проектировании фотошаблонов (ФШ), предложена модель для описания бизнес-логики и показана ее эффективность на примере процедуры входного контроля топологии.

Ключевые слова: фотошаблон; WFMS; сеть Петри; входной контроль топологии.

Введение

Проектирование ФШ, является одним из наиболее сложных и наукоемких этапов изготовления изделий микроэлектроники. Ошибки, допущенные на этой стадии, могут приводить к существенному удорожанию производства, поэтому задача автоматизации этого процесса особенно актуальна на сегодняшний день [1].

Многие операции маршрута проектирования могут быть выполнены с помощью специализированных САПР, однако полноценная автоматизация всей совокупности рабочих процессов выходит за рамки их возможностей, что ставит вопрос о разработке единой системы управления.

Моделирование рабочих процессов в WFMS

Для решения этой задачи в работе рассмотрена возможность использования WFMS. Этот класс систем предназначен для описания, управления и выполнения потоков задач в соответствии с заданной бизнес-логикой [2].

Одним из ключевых аспектов при разработке WFMS является вопрос формализации рабочих процессов. Для этой цели в работе предложена модель на основе сетей Петри [3].

Эффективность описания и анализа рабочего процесса с помощью предложенного подхода показана на примере моделирования процедуры входного контроля топологии. Сеть Петри, описывающая соответствующую бизнес-логику, показана на рисунке.

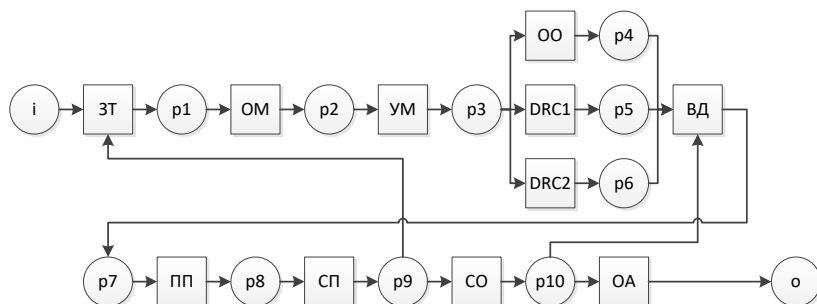


Рисунок 1– Сеть Петри для входного контроля топологии

Авторы считают, что применение предложенных решений в дальнейшем позволит разработать универсальную систему управления рабочими процессами, что в свою очередь обеспечит качественно новый уровень эффективности и ошибкоустойчивости при проектировании фотошаблонов.

Список использованных источников

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012. С. 510-538.
2. Cull, Richard & Eldabi, Tillal. (2010). A hybrid approach to workflow modelling. J. Enterprise Inf. Management. 23. 268-281. 10.1108/17410391011036067.
3. Aalst, Wil. (1998). The Application of Petri Nets to Workflow Management. Journal of Circuits, Systems, and Computers. 8. 21-66. 10.1142/S0218126698000043.

CONCEPT OF A WORKFLOW MANAGEMENT SYSTEM APPLICATION FOR PHOTOMASK DESIGN

*Konstantin Aleksandrovich Medvedev¹, software engineer,
kmedvedev@niime.ru, +7 (910) 454-16-99*

*Alexandr Lvovich Pankratov¹, head of department,
apankratov@niime.ru, +7 (903) 009-01-13*

*Vladimir Viktorovich Ivanov¹, deputy head of department,
vlaivanov@niime.ru, +7 (910) 729-28-59*

¹ JSC MERI, Moscow, Zelenograd

Abstract: The paper discusses the possibility of using a workflow management system (WFMS) for photomask design. A model for describing business logic has been proposed, and its effectiveness has been analyzed by modeling topology verification flow.

Key words: photomask, WFMS, Petri net, topology verification.

УДК 004.942: 621.382.33

<https://doi.org/10.29003/m1661.Silicon-2020/394-397>

УНИФИЦИРОВАННАЯ SPICE-МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАДИАЦИИ

*Петросянц Константин Орестович, д. т. н., профессор,
ординарный профессор¹, kpetrosyants@hse.ru, +7 (495) 772-95-90*

*Кожухов Максим Владимирович, к. т. н., доцент¹, начальник
лаборатории², mkozhuukhov@hse.ru, +7 (903) 516-28-52*

¹МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва

²АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва

Аннотация: Представлена унифицированная SPICE-модель Si БТ/SiGe ГБТ, позволяющая проводить схемотехническое моделирование интегральных схем с учетом воздействия проникающей радиации. Представлены результаты измерений

и моделирования электрических характеристик биполярных транзисторов до и после воздействия различных видов радиационного излучения.

Ключевые слова: биполярные транзисторы, электроны, гамма-излучение, радиационные эффекты, схемотехнические модели.

Введение

Стандартные SPICE-модели (GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM) БТ не позволяют проводить схемотехническое моделирование устройств с учетом радиационных эффектов. Поэтому разрабатывают SPICE-модели БТ, которые позволяют учитывать влияние радиационного излучения на их электрические характеристики [1] - [2]. Представленные модели позволяют учитывать только один вид радиационного излучения и не учитывают изменения пробивных напряжений и повышенной деградации при низкой интенсивности облучения.

SPICE-модель биполярного транзистора для учета радиационных эффектов

Унифицированная SPICE-модель Si БТ/SiGe ГБТ (рис. 1 а) состоит из двух частей: 1) стандартная модель (GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM); 2) дополнительные элементы, учитывающие радиационные эффекты. Основным преимуществом модели является единая эквивалентная схема, система уравнений и набор параметров для разных типов излучений. Для определения радиационно-зависимых параметров SPICE-модели была разработана методика.

Заключение

Разработанная SPICE модель Si БТ/SiGe ГБТ позволяет учитывать изменение тока базы, пробивных напряжений, коэффициента усиления (см. рис. 1 б, в), выходных характеристик и др. параметров в зависимости от поглощенной дозы или интегрального потока, а также

учитывает усиление деградации параметров и характеристик БТ при уменьшении интенсивности излучения.

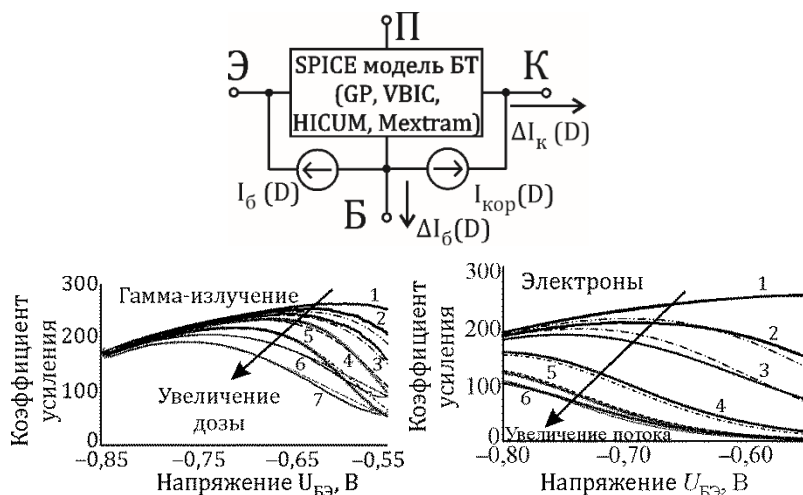


Рисунок 1 – SPICE модель БТ и результаты сравнения его характеристик

Список использованных источников

1. P. Leroux, et al. Assessment of 0.4 μm SiGe Bipolar VCSEL Driver IC Under γ -Radiation, IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 56, N4, 2009, pp. 1920 – 1925.
2. Вологдин Э. Н. и др. Учёт воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 2 (233), 2014 г., с. 27-32.

UNIFIED BIPOLAR TRANSISTOR SPICE MODEL TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF DIFFERENT RADIATION TYPES

Konstantin Orestovich Petrosyants, Doctor of Sciences, professor, Tenured Professor¹, kpetrosyants@hse.ru, phone +7 (495) 772-95-90
Maksim Vladimirovich Kozhukhov, Ph.D., Associate Professor¹, Head of laboratory², mkozhukhov@hse.ru, +7 (903) 516-28-52

¹ MIEM HSE, Moscow

² JC 'VNIIEM Corporation', Moscow

Abstract: The unified Si BT/SiGe HBT SPICE-model is presented, which allows performing SPICE simulation of integrated circuits that considering the radiation effect. The results of measurements and modeling of electrical characteristics of bipolar transistors before and after exposure to various radiation types are presented.

Key words: bipolar transistors, electrons, gamma-rays, radiation effects, SPICE models.

УДК 621.382.323

<https://doi.org/10.29003/m1662.Silicon-2020/397-399>

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ БЕСПЕРЕХОДНОГО ТРАНЗИСТОРА В СИСТЕМЕ TCAD

Моисеев Григор Альфредович, студент, НИУ ВШЭ,
moiseevgrigor@mail.ru, +995 (555) 178-778.

Аннотация: Целью данной работы является синтез транзистора с меньшим током утечки. В работе приводится описание нового типа транзисторов не содержащих в себе р-п переходов – беспереходных транзисторов. Кратко изложены физические принципы работы таких устройств. На основе беспереходного транзистора предлагается структура, обладающая меньшим током утечки по сравнению с беспереходными транзисторами. Проведено численное моделирование предлагаемой структуры в системе TCAD. Рассчитана вольт-амперная характеристика (ВАХ) предлагаемой структуры. Наглядно показано, что предлагаемая структура обладает меньшим током утечки в сравнении с током утечки беспереходного транзистора.

Ключевые слова: беспереходный транзистор, ток утечки, TCAD.

Введение

Одним из наиболее важных векторов развития кремниевой наноэлектроники является уменьшение тока утечки транзисторов – основы всей вычислительной техники. Физические основы работы беспереходного транзистора [1] предоставляют целый ряд преимуществ перед механизмом работы р-п переходных транзисторов. Отсутствие в беспереходных транзисторах областей пространственного заряда [2] решает большое количество технических и конструкционных проблем связанных с уменьшением длины канала транзисторов.

Результаты моделирования

В результате проведенного моделирования предложенной структуры была получена ВАХ представленная на рис 1. Из сравнения с ВАХ беспереходного транзистора [1] наглядно видно, что величина тока утечки в предлагаемой структуре на два порядка меньше.

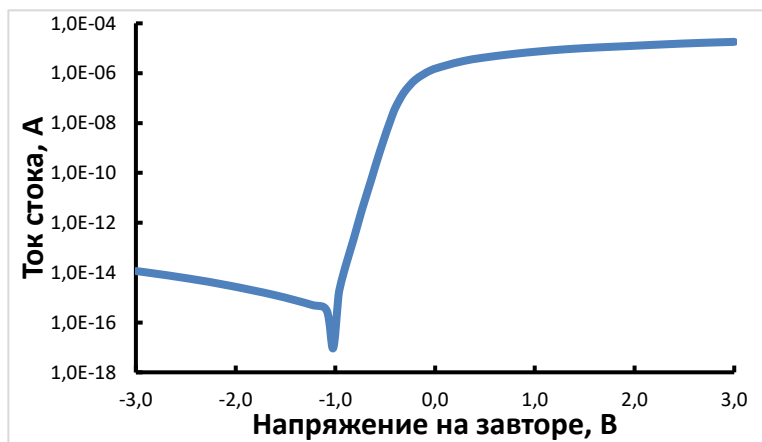


Рисунок 1 – ВАХ предлагаемой структуры

Заключение

Предложена новая структура беспереходного транзистора. Проведенное моделирование вольт-амперных характеристик

показало улучшение параметра тока утечки по сравнению с оригинальной структурой.

Список использованных источников

1. S. Sahay, M. J. Kumar JUNCTIONLESS FIELD EFFECT TRANSISTORS design modeling and simulation M.: IEEE Press, 2019, P.82.

2. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники, М.: БИНОМ, 2012, С. 119-122.

MODELLING OF STRUCTURE BASED ON JUNCTIONLESS TRANSISTOR IN TCAD SYSTEM

Grigor Alfredovich Moiseev, student, National Research University Higher School of Economics, moiseevgrigor@mail.ru, +995 (555) 178-778.

Abstract: The purpose of this work is to synthesize a transistor with a lower leakage current. The paper describes a new type of transistors that do not contain p-n junctions - junctionless transistors. The physical principles of operation of such devices are briefly stated. On the basis of the junctionless transistor, a structure is proposed that has a lower leakage current as compared to the junctionless transistors. Numerical modeling of the proposed structure in the TCAD system is carried out. The current-voltage characteristic (CVC) of the proposed structure is calculated. It is clearly shown that the proposed structure has a lower leakage current in comparison with the leakage current of a junctionless transistor.

Key words: junctionless transistor, leakage current, TCAD.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ МИКРОПРОЦЕССОРА С АРХИТЕКТУРОЙ MIPS

*Кузьмин Павел Андреевич, студент, РТУ МИРЭА, г. Москва,
kuzminpaa@inbox.ru, +7 (926) 340-51-07*

Аннотация: На основе специализированных пакетов САПР CadenceDesignSystems разработан маршрут проектирования топологии микропроцессора с архитектурой MIPS.

Ключевые слова: архитектура MIPS, топология, маршрут проектирования, front-end, Genus, NClaunch, Innovus

Введение

Стратегия развития электронной промышленности России до 2030г. [1], планирует переход отечественной промышленности на топологию ИС с до 7-5 нм и создание отечественных дизайн-центров, работающих по технологии fabless. Соответственно сегодня как никогда актуальна подготовка специалистов, владеющих на профессиональном уровне инструментами автоматизированного проектирования ИС. Основная задача, решаемая в рамках данной работы, состоит в разработке учебного маршрута проектирования топологии на основе инструментов САПР CadenceDesignSystems.

Маршрут проектирования системы на кристалле

В качестве примера разработки топологии данной работе служит архитектура процессора MIPS [2]. Типовой маршрут проектирования в САПР Cadence включает следующие проектные процедуры: 1) разработка Verilog кода устройства и его тестового модуля; 2) проверка программы на работоспособность инструментами NClaunch и SimVision; 3) создание с помощью GenusSynthesisSolution RTL схемы и .global файла загрузки для проектирования топологии; 4) загрузка его

в программу Innovus и трассировка, подключение глобальных шин, добавление колец и линий питания; 5) выгрузка файла соединений (Netlist) и проверка соответствия топологии RTL-описанию. Полученное проектное решение иллюстрирует рисунок 1.

Выводы

Разработан маршрут проектирования процессора с открытой MIPS архитектурой, который служит основой для практикума по обучению проектированию топологии ИС.

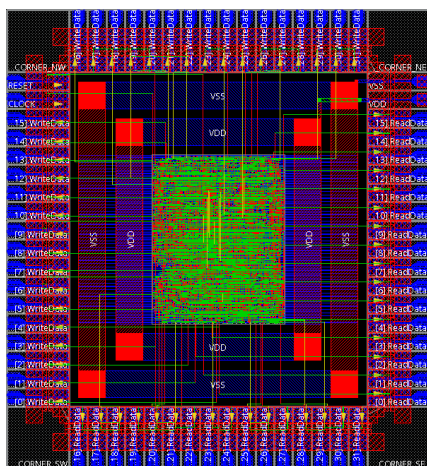


Рисунок 1 – Топология процессора MIPS

Работа выполнена на оборудовании ЦКП РТУ МИРЭА и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFZ-2020-0022).

Список использованных источников

1. Распоряжение от 17 января 2020 года №20-р. Сайт Правительства Российской Федерации. [Электронный ресурс], URL: <http://government.ru/docs/38795/>. Дата обращения 10.06.2020.

2. Дэвид М. Харрис, Сара Л. Харрис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. / пер. с англ. ImaginationTechnologies. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 792 с.: ил.

DESIGNING A MICROPROCESSOR TOPOLOGY WITH THE MIPS ARCHITECTURE

Pavel Andreevich Kuzmin, student ¹, kuzminpaa@inbox.ru,
+7(926) 340-51-07.

¹ National research UNIVERSITY “MIET”, Moscow, Zelenograd

Abstract: based on specialized cadence Design Systems CAD packages, the architecture of an open-source MIPS microprocessor project is considered as a training example, and a route for designing the topology of its main components is developed.

Key words: MIPS architecture, topology, design route, front-end, Genus, NClaunch, Innovus

Acknowledgments: the work was performed on the equipment of the RTU MIREA Central research center and with the support of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project no. FSFZ-2020-0022).

