

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1 (161) 2016

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3

MICROELECTRONICS

Scientific & technical journal

Issue 1 (161) 2016

Москва, 2016

"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"

Редакционный совет

Главный редактор

Красников Г.Я., д.т.н.,
академик РАН

Члены редакционного совета

Аристов В.В.,

член-корреспондент РАН

Асеев А.Л., д.ф.-м.н.,
академик РАН

Бетелин В.Б., д.ф.-м.н.,
академик РАН

Бокарев В.П., к.х.н.,
ответственный секретарь

Бугаев А.С., д.ф.-м.н.,
академик РАН

Быков В.А., д.т.н.

Галиев Г.Б., д.ф.-м.н.

Горбачевич А.А. д.ф.-м.н.,
член-корреспондент РАН

Горнев Е.С., д.т.н.,
зам. главного редактора

Грибов Б.Г., д.х.н.,
член-корреспондент РАН

Зайцев Н.А., д.т.н.

Ким А.К., к.т.н.

Критенко М.И., к.т.н.

Немудров В.Г., д.т.н.

Орликовский А.А., д.т.н.,
академик РАН

Петричкович Я.Я., д.т.н.

Сигов А.С., д.ф.-м.н., академик РАН

Стемповский А.Л., д.т.н.,
академик РАН

Чаплыгин Ю.А., д.т.н.,
член-корреспондент РАН

Шелепин Н.А., д.т.н.,
зам. главного редактора

Эннс В.И., к.т.н.

Адрес редакции

124460 г. Москва, Зеленоград,
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.mikron.ru/journal

Журнал издается с 1965 года

Учредитель

АО "Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники"

РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СМАРТ-КАРТ НА РОССИЙСКОМ И МЕЖДУНАРОДНОМ РЫНКАХ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЙ АО "НИИМЭ"

А.В.Нуйкин, А.С.Кравцов 4–8

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО КОММУТАТОРА ДЛЯ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

Р.Л.Смелянский, В.В.Васин, С.О.Беззубцев 9–17

ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА ОСНОВЕ БИСТАБИЛЬНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ПОЛЕВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

А.А.Малых, В.Н.Мурашев 18–22

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ БМК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Л.Г.Нидеккер, В.Н.Шмигельский, В.И.Эннс 23–25

ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ТРИММИНГ ФОТОРЕЗИСТА КАК ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Т.Л.Бурякова, О.П.Гущин, Е.С.Горнев, А.В.Данила, А.Н.Поляков 26–35

ПРОБЛЕМА ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СПЕЙСЕРА

Г.Я.Красников, И.В.Кирюшина, А.А.Егоров, С.О.Ранчин, Е.С.Горнев 36–41

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ ЯЧЕЙКИ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Г.Я.Красников, Н.А.Зайцев, В.П.Бокарев, Ю.И.Плотников 42–47

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.С.Бенедиктов, П.В.Игнатов 48–53

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

А.С.Коротков, В.В.Лобода 54–58

НАДЕЖНОСТЬ

ТРЕБОВАНИЯ К ЧИСТОТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В ПРОИЗВОДСТВЕ КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В.Л.Евдокимов, С.О.Ранчин 59–71

**"ELECTRONIC ENGINEERING.
Series 3. MICROELECTRONICS"**

Editorial Council

Chief Editor

G.Ya. Krasnikov, Sc.D.,
Full Member of the RAS

**The Members
of Editorial Council**

V.V.Aristov, Sc.D.,
Corresponding Member of the RAS

A.L.Aseev, Sc.D.,
Full Member of the RAS

V.B.Betelin, Sc.D.,
Full Member of the RAS

V.P.Bokarev, Ph.D.,
Responsible Secretary

A.S.Bugaev, Sc.D.,
Full Member of the RAS

V.A.Bykov, Sc.D.

G.B.Galiev, Sc.D.

A.A.Gorbatsevich, Sc.D.,
Corresponding Member of the RAS

E.S.Gornev, Sc.D.,
Deputy Chief Editor

B.G.Gribov, Sc.D.,
Corresponding Member of the RAS

N.A.Zaitsev, Sc.D.

A.K.Kim, Ph.D.

M.I.Kritenko, Ph.D.

V.G.Nemudrov, Sc.D.

A.A.Orlikovsky, Sc.D.,
Full Member of the RAS

Ya.Ya.Petrichkovich, Sc.D.

A.S.Sigov, Sc.D.,
Full Member of the RAS

A.L.Stempkovskiy, Sc.D.,
Full Member of the RAS

Y.A.Chaplygin, Sc.D.,
Corresponding Member of the RAS

N.A.Shelepin, Sc.D.,
Deputy Chief Editor

V.V.Enns, Ph.D.

Editorial Staff Address

1-st Zapadny pr-d 12, str. 1.
Zelenograd, Moscow, 124460, Russian
Federation

Phone: +7 (495) 229-70-43

E-mail: journal_EEM-3@mikron.ru

<http://www.mikron.ru/journal>

Journal was published from 1965 year

Founder

Joint-Stock Company "Molecular
Electronic Research Institute"

DEVELOPMENT AND DESIGNING

RFID FOR DOMESTIC AND INTERNATIONAL MARKETS BASED ON JSC

MERI CHIPS

A.Nuykin, A.Kravtsov 4–8

DEVELOPMENT OF THE FIRST RUSSIAN SDN-SWITCH

R.Smeliansky, V.Vasin, S.Bezzubtsev 9–17

**THE MAGNETIC FIELD SENSOR WITH CONTROLLABLE FREQUENCY-
OUTPUT ON THE BASE OF THE BISTABLE MULTIVIBRATOR AND THE
FIELD-EFFECT HALL SENSOR AS THE SENSING ELEMENT**

A.A.Malykh, V.N.Murashev 23–26

DEVELOPMENT OF DIGITAL IC BASED ON GA USING STANDARD CELLS

L.G.Nidekker, V.N.Shmigelskiy, V.I.Enns 23–25

PROCESSES AND TECHNOLOGY

PHOTORESIST TRIMMING FOR OPTICAL LITHOGRAPHY

RESOLUTION ENHANCEMENT

T.L.Buriakova, O.P.Gushin, E.S.Gornev, A.V.Danila, A.N.Polyakov 26–35

COBALT REDEPOSITION ISSUE DURING SPACER FORMATION

G.Y.Krasnikov, I.V.Kiryushina, A.A.Egorov, S.O.Ranchin, E.S.Gornev 36–41

**PHYSICAL-TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF
FERROELECTRIC FILMS FOR CELL STORAGE DEVICES.**

G.Ya.Krasnikov, N.A.Zaytsev, V.P.Bokarev, Yu.I.Plotnikov 42–47

MATHEMATICAL SIMULATION

**THE COMPUTER MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SOI
MOSFET'S AT THE HIGH TEMPERATURES**

A.S.Benediktov, P.V.Ignatov 69–72

**SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF
THERMOELECTRIC GENERATORS**

A.S.Korotkov, V.V.Loboda 54–58

RELIABILITY

**REQUIREMENTS FOR PURITY PROCESS FACILITIES IN THE CHIPS
PRODUCTION OF NANOELECTRONIC ICs**

V.L.Evdokimov, S.O.Ranchin 59–71

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СМАРТ-КАРТ НА РОССИЙСКОМ И МЕЖДУНАРОДНОМ РЫНКАХ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЙ АО "НИИМЭ"

► А.В.Нуйкин, А.С.Кравцов
АО "НИИМЭ"

Работа посвящена системам радиочастотной идентификации (RFID), в том числе, разработанным в АО "НИИМЭ", актуальность которых непрерывно возрастает в области систем социального и промышленного назначения. В статье рассматривается история развития продуктовой линейки RFID изделий на базе кристаллов собственной разработки АО "НИИМЭ" для карт памяти и микропроцессорных карт, суммарный объем поставок которых на сегодняшний день превышает миллиард штук. Отдельно для смарт-карт рассматриваются возникающие в процессе работы вопросы требований по сертификации в зависимости от области применения, а также необходимость унификации применяемых решений для совместимости инфраструктуры при использовании различных продуктов.

RFID FOR DOMESTIC AND INTERNATIONAL MARKETS BASED ON JSC MERI CHIPS

A.Nuykin, A.Kravtsov
JSC MERI

This paper presents RFID systems designed by JSC MERI. The relevance of RFID systems for social and industrial needs is steadily growing. The paper examines in particular a history of the RFID solutions development produced on the base of JSC MERI chips for smart cards. The total amount of cards production currently accounts for 1 billion pieces. The issues of smart-cards certification for different appliances and unification of solutions aimed at infrastructure compatibility are also disclosed in the present paper.

Работа посвящена системам радиочастотной идентификации, в том числе, произведенным ОАО "НИИМЭ и Микрон" [1, 2], актуальность которых непрерывно возрастает в области систем социального и промышленного назначения.

Системы радиочастотной идентификации получают все большее распространение в нашей жизни. Ежедневно в мире миллиарды контактных и бесконтактных носителей используются:

- в системах проезда в общественном транспорте (пластиковые карты и бумажные билеты);
- в системах персонализации личности гражданина: в России это электронный заграничный паспорт гражданина, электронное

удостоверение личности гражданина, электронный паспорт военнослужащего, универсальная электронная карта (УЭК);

- в системах банковских платежей (Visa PayWave™, MasterCard Paypass™, Union QuickPass™, ApplePay™ и др.);
- в системах ограничения доступа организаций (электронные пропуска, удостоверения);
- для защиты конфиденциальной информации (криптографические модули, устройства с электронной цифровой подписью);
- в области торговли и логистики (маркировка, инвентаризация и учет товаров) и др.

У большинства из нас постоянно находится в кармане одно или несколько RFID-устройств: смартфоны

с NFC модулем, банковские карты с возможностью бесконтактных платежей, транспортные карты для проезда в общественном транспорте, RFID пропуска для доступа в различные учреждения, электронные загранпаспорта и т.д. И таких устройств у каждого из нас будет все больше и больше. Одни из последних новинок – транспондеры для проезда по платным автодорогам, полисы медицинского страхования. В ближайшем будущем нас ожидают электронные гражданские паспорта, бесконтактные медицинские карты, водительские удостоверения и мн. др.

Графики исследований развития рынка RFID в России на ближайшие годы (рис.1) показывают, что в ближайшие пять лет нас ждет увеличение рынка RFID-изделий в пять-шесть раз количественно, и в 2-2,5 раза объем рынка увеличится в стоимостном выражении (рост составит 20-30% в год). Так в 2013 году увеличение импорта RFID-микросхем в Россию составило около 33%, при этом в 2014 году импорт упал с учетом предполагаемого роста практически в 2,5-3 раза. Это связано, в том числе, и с выходом на российский рынок продуктов, произведенных ОАО "НИИМЭ и Микрон". В последние несколько лет ОАО "НИИМЭ и Микрон" удалось занять значительную долю рынка кристаллов RFID в России. На ID Forum в России в сентябре 2015 года, участниками конференции было констатировано, что Микрон является крупнейшим поставщиком на рынке RFID, особенно в части изделий HF-диапазона. А ведь в недалеком прошлом – всего пять лет назад практически весь рынок RFID был занят изделиями зарубежных поставщиков, в основном – компанией NXP.

Основным локомотивом роста в России выступают крупные инфраструктурные проекты: транспорт, электронные документы, маркировка товаров

и запасных частей, книг, почтовых отправлений, сельскохозяйственных животных, лекарств и т.д. Главная особенность российского рынка – возможность реализовать крупные проекты главным образом связана с государством. Наибольшее распространение RFID-технологии в России получают в области транспорта, электронных документов, маркировке животных и различных товаров.

Начало развития направления разработки RFID-кристаллов в ОАО "НИИМЭ и Микрон" было связано с двумя основными событиями: первое – это открытие собственной фабрики с топологическими нормами 0,18 мкм EEPROM, второе – заключение контракта на поставку в Московский метрополитен электронных бланков билетов. В 2007-2008 годах Московский метрополитен полностью перешел на RFID-билеты, с этого времени Зеленоградский завод является официальным поставщиком транспортных билетов для Московского метрополитена.

В конце 2009 года перед разработчиками ОАО "НИИМЭ и Микрон" была поставлена задача спроектировать собственный кристалл для транспортных приложений. Были выделены три основных направления: разработка аналоговой и радиочастотной части, разработка на базе ячейки ЭСППЗУ уникального блока энергонезависимой памяти, разработка протокольного уровня кристалла. Была определена основная задача разработки – максимальная минимизация площади и потребления всех составных блоков.

К середине 2012 года был разработан стабильно работающий кристалл, который в июне 2012 года успешно прошел сертификационные испытания в международной лаборатории AIT, после чего начались пилотные, а затем и массовые поставки билетов, на основе собственного кристалла, в Московский

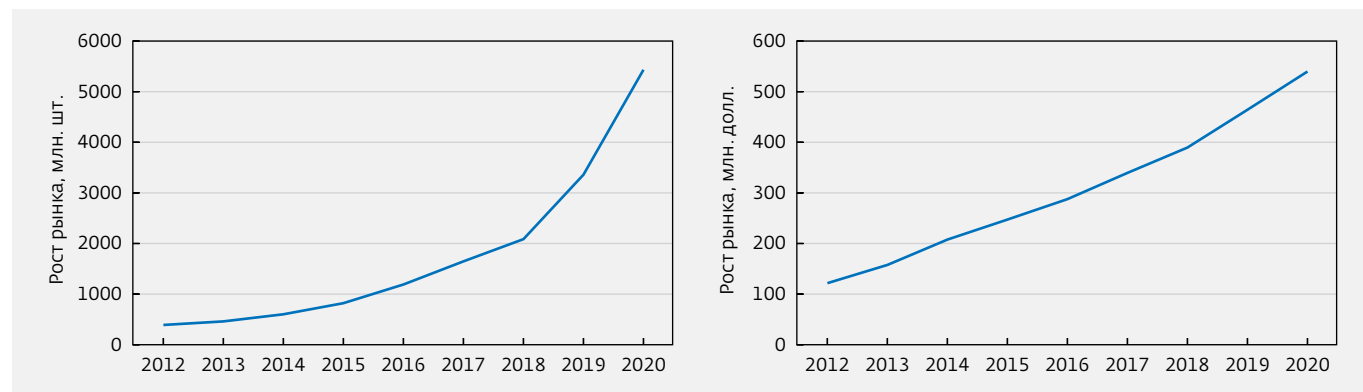


Рис.1. Прогноз роста рынка RFID в России

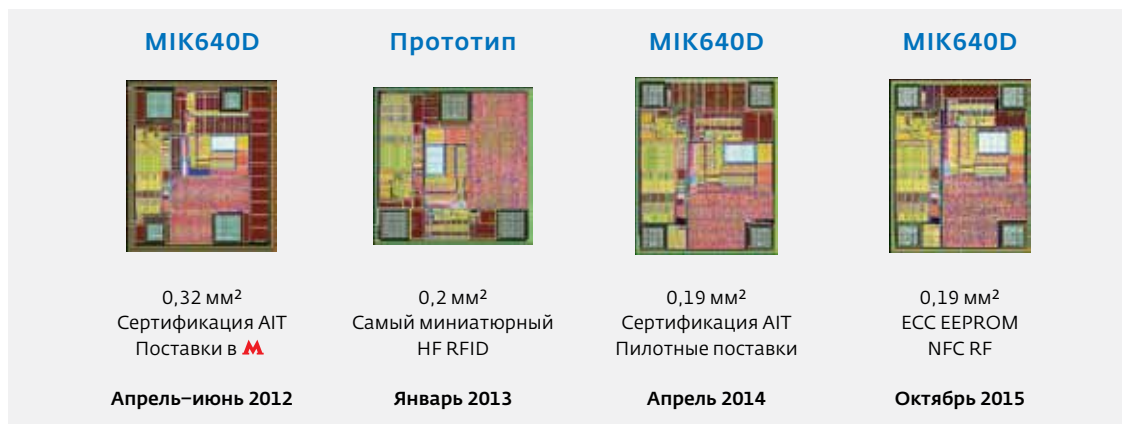


Рис.2. История развития транспортного кристалла, спроектированного АО "НИИМЭ"

метрополитен. С разработки транспортного кристалла стартовало развитие направления разработки RFID-кристаллов карт памяти в АО "НИИМЭ". К настоящему моменту разработано более 10 кристаллов карт памяти различного назначения.

Транспортный кристалл MIK640D является одним из самых успешных примеров коммерческой разработки в России, к настоящему моменту продано около 1 млрд. кристаллов. Поставки данного кристалла осуществляются по всему миру.

Безусловно, у этого кристалла были свои слабые стороны, обнаруженные как во время последующего тестирования и производства, так и во время массовой эксплуатации. Поэтому работа по этой тематике продолжается до сих пор. Так в 2013 году была разработана модификация кристалла с площадью 0,2 мкм². Это был самый миниатюрный HF RFID-кристалл в мире, который был презентован на выставке RFID Journal LIVE! 2013 в г. Орландо (США). Из-за нестандартного расположения контактных

площадок проект уменьшенного транспортного кристалла не был запущен в массовое производство. На основе этого кристалла на текущий момент разработана обновленная версия транспортного кристалла, которая впервые в отрасли карт памяти получит энергонезависимую память с коррекцией ошибок (что позволит значительно увеличить надежность хранения информации). При этом кристалл до сих пор остается самым миниатюрным – его площадь составляет всего 0,19 мм², что позволяет разместить на кремниевой пластине диаметром 200 мм до 150 тыс. кристаллов (рис.2).

В 2013 году анализ рынка показал, что заказчикам были необходимы кристаллы со встроенными функциями защиты. Поэтому было принято решение о разработке второго поколения кристаллов карт памяти, которые имеют различные степени защиты: защита паролем, электронная цифровая подпись производителя, криптографический сопроцессор 3-DES или с проприетарной криптографией. Все эти кристаллы также были успешно сертифицированы в международной лаборатории и сейчас осуществляются их пилотные и массовые поставки по всему миру (рис.3).

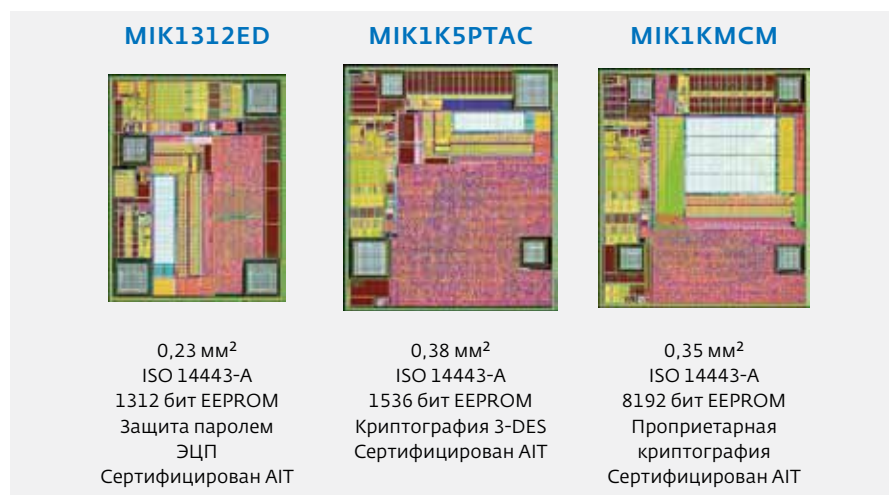


Рис.3. Кристаллы со встроенными функциями защиты

Дальнейшее развитие кристаллов для карт памяти связано с развитием уровня приложений кристаллов карт памяти. Здесь можно выделить три основные ветви развития: решения лидера отрасли фирмы NXP на базе проприетарного уровня приложений MIFARE™, решения на базе стандартов NFC Forum – семейство NFC кристаллов, решения на базе уровня приложений CIPURSE™.

Третье поколение кристаллов, разработанных АО "НИИМЭ", поддерживает как решения на базе стандартов NFC Forum, так и на базе уровня приложений CIPURSE™ (рис.4). Презентация семейства NFC кристаллов прошла в этом году на выставке RFID Journal LIVE! 2015 в г. Сан-Диего (США), на текущий момент осуществляются пилотные поставки кристаллов на российский и международный рынок. Основным рынком NFC кристаллов в России – это маркировка товаров, акцизные марки для алкоголя и табака.

Сегодня самый массовый рынок карт памяти в России – это рынок транспортных билетов с объемом в 50 млн. штук в месяц. Основные преимущества транспортных решений, разработанных АО "НИИМЭ" – это:

- полная совместимость со всеми существующими на рынке технологиями: ISO14443, NFC, MIFARE™, CIPURSE™;
- наличие кристаллов с различной степенью защиты: пароль, ЭЦП, 3-DES, AES-128;
- полная совместимость с используемыми системами и инфраструктурой – независимая сертификация кристаллов в международных лабораториях AIT / Arsenal Testhouse / KEOLABS.

Большой опыт в области разработки, тестирования, производства и сертификации решений в области RFID.

В 2008 году параллельно с разработкой карт памяти в ОАО "НИИМЭ и Микрон" началось проектирование микропроцессорных карт. Связано это было с переходом в России на электронные паспортно-визовые документы (загранпаспорта РФ). С кристалла для ПВД документов (MIK51AB72D) началась история развития на предприятии направления микропроцессорных карт. В 2011 году была закончена разработка кристалла, который успешно прошел все необходимые межведомственные испытания в 2012 году. Практически во всех паспортах, выпущенных за последние два-три года используется кристалл, произведенный в ОАО "НИИМЭ и Микрон". Ядром этого кристалла является 8-битный микроконтроллер. В изделии поддерживаются как российские, так и международные стандарты шифрования, что позволяет дополнительно гарантировать защиту персональных данных и расширить сферу

применения изделий. Объем энергонезависимой памяти составляет 72 Кбайта. На текущий момент поставлено более 3 млн. кристаллов для паспортно-визовых документов. В связи с компрометацией ряда зарубежных поставщиков, с 2015 года данные микросхемы поставляются для производства электронных паспортов ряда зарубежных стран.

В 2010–2011 годах в стране стартовал проект по внедрению универсальной электронной карты гражданина, которая должна была совместить в себе документ, удостоверяющий личность, банковское и транспортное приложение, ЭЦП, медицинский полис, СНИЛС и мн. др. ОАО "НИИМЭ и Микрон" за счет собственных средств взялся за разработку кристалла УЭК. Одной из ключевых особенностей при разработке кристалла была необходимость защиты кристалла в соответствии с требованиями Mastercard™, одним из которых является требование на соответствие стандарта безопасности программно-аппаратных платформ для осуществления банковских платежей (EMVCo). Разработчики предприятия в 2012 году успешно справились с поставленной задачей разработки кристалла и приобрели компетенции в области защиты кристаллов на аппаратном и программном уровне. Хотя проект УЭК не получил должного распространения в России (фактически закрыт в 2015 году), микроконтроллер MIK51SC72D на текущий момент является одним из основных решений для российской банковской карты Мир (НПСК). Кроме того, на сегодня поставлена задача о реализации нового поколения микроконтроллера, ориентированного исключительно для банковского сектора, обладающего необходимым и соответствующим обновленным

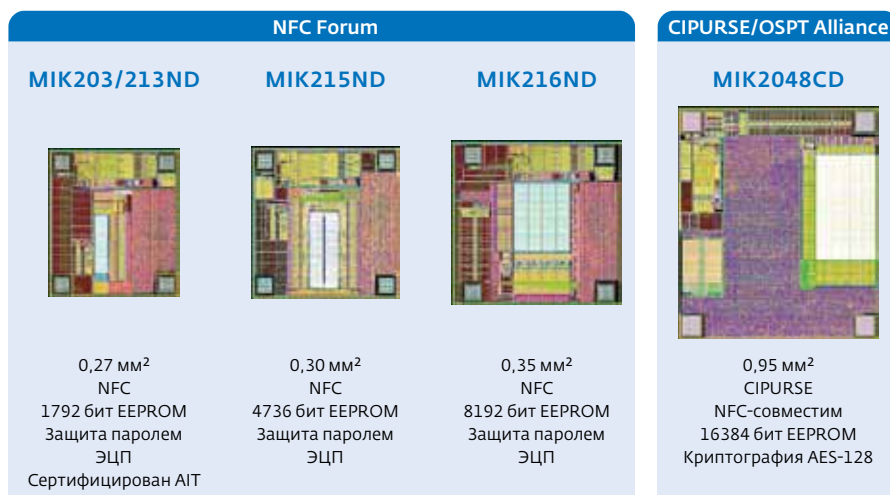


Рис.4. Кристаллы карт памяти третьего поколения, разработанные АО "НИИМЭ"

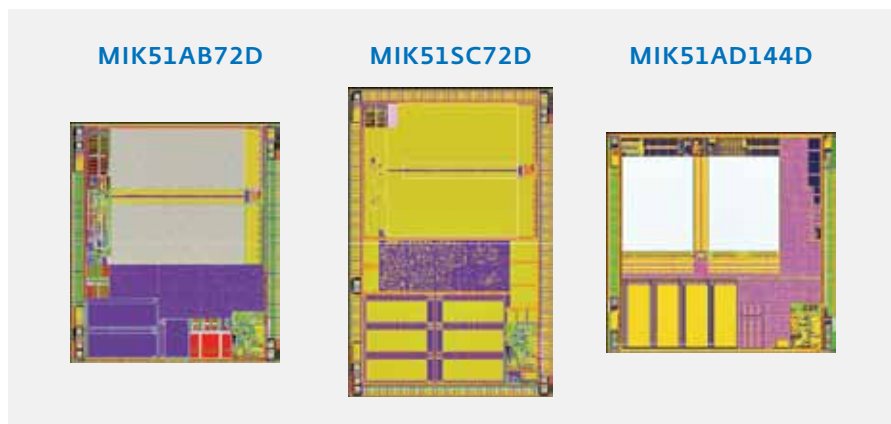


Рис.5. Кристаллы для микропроцессорных карт, разработанные АО "НИИМЭ"

международным требованиям уровнем безопасности. К сегодняшнему моменту ОАО "НИИМЭ и Микрон" реализовано более 3 млн. кристаллов УЭК в 57 регионах РФ.

На смену проекту УЭК в 2014 году пришел проект удостоверения личности гражданина (УЛГ), то есть замены бумажного общегражданского паспорта на электронную карту. Для такой карты был определен объем энергонезависимой памяти не менее 144 Кбайт, что в два раза превышает требования, к выдвигаемым ранее разработанным проектам. Требования по площади кристалла также были очень жесткие – она не должна измениться, иначе может возникнуть проблема в размещении кристалла в корпусе (в чип-модуле). На основе большого опыта в разработке блоков ЭСППЗУ для карт памяти небольшой емкости [3, 4] за 1,5 года конструкторами АО "НИИМЭ" был разработан модифицированный блок ЭСППЗУ с уменьшенной в два раза ячейкой памяти объемом 144 кБайт, что позволило сохранить ту же площадь кристалла при увеличении объема энергонезависимой памяти в 2 раза. На сегодняшний момент кристалл MIK72AD144D, произведенный ОАО "НИИМЭ и Микрон", используется в УЛГ (пилотный проект), а также ведется тестирование этого же кристалла в качестве элемента основной платформы для персональной электронной карты военнослужащего.

Сейчас ОАО "НИИМЭ и Микрон" выступает за открытие в России независимого сертификационного центра RFID. Одним из сдерживающих факторов для успешного внедрения разрабатываемых микросхем является необходимость проведения сертификации конечного изделия за рубежом. В результате чего происходит существенное удорожание стоимости изделия (дороговизна

сертификации), увеличение времени выхода изделия на рынок. Еще одним немаловажным фактором является потеря компетенций в России по проведению подобного вида анализа с построением необходимых моделей угроз, понимания мер противодействия, сдерживания развития промышленного оборудования для проведения экспертиз подобного рода не только отечественных, но и зарубежных поставщиков для выявления потенциальных угроз.

К настоящему моменту ОАО "НИИМЭ и Микрон" продано около 1 млрд. кристаллов для карт памяти, более 3 млн. кристаллов для ID-документов, более 3 млн. кристаллов УЭК. Планируется разработка и распространение модифицированной версии универсального защищенного микроконтроллера для различного применения с поддержкой последних требований по элементам криптографии, безопасности. Данный микроконтроллер планируется предлагать и сторонним разработчикам ПО для реализации их собственных проектов на базе полностью российского кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я., Горнев Е.С.** Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО "НИИМЭ и Микрон" / История отечественной электроники. В 2-х т. – М.: 2012.
2. **Красников Г.Я., Шелепин Н.А.** Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью / Международная научн.-техн. конф. с элементами научной школы для молодежи. – М.: Зеленоград, 2010.
3. **Nuykin A., Kravtsov A., Timoshin S., Zubov I.** A low cost EEPROM design for passive RFID tags. 2012 Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE). Hue, Vietnam – 2012.
4. **Нуйкин А.В., Кравцов А.С.** Современные тенденции развития систем радиочастотной идентификации в России / Научн.-практ. конф., посвященная 50-летию полета в космос Ю.А.Гагарина. – М.: Зеленоград, 2011.

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО КОММУТАТОРА ДЛЯ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

► Р.Л.Смелянский, В.В.Васин, С.О.Беззубцев
НП "ЦПИКС"

Представлены результаты экспериментальных исследований прототипа OpenFlow-коммутатора, использующего отечественные компоненты. Приведено описание стенда, входящих в его состав компонент, потоков данных и потоков управления. Приведены оценки результатов исследования, сделаны выводы о перспективах развития построенного решения.

DEVELOPMENT OF THE FIRST RUSSIAN SDN-SWITCH

R.Smeliansky, V.Vasin, S.Bezzubtsev

ARCCN

This paper presents the results of experimental researches of an OpenFlow-switch prototype that uses Russian electronic components. Testbed and its components, data and control flows are described, obtained research results are estimated and conclusions on the prospects of the solution development are made.

ВВЕДЕНИЕ

В статье "Разработка отечественного коммутатора для программно конфигурируемых сетей" [1] была представлена архитектура OpenFlow коммутатора корпоративного уровня, определены функциональные требования, структура, функциональные блоки и схема работы устройства. Целью данной статьи является представление результатов экспериментальных исследований прототипа отечественного OpenFlow [2] коммутатора для линий связи с пропускной способностью 10 Гбит/с, проведенных в Центре прикладных исследований компьютерных сетей*.

1. ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью проведения экспериментальных исследований коммутатора для программно-конфигурируемых сетей (далее – ПКС), удовлетворяющего

требованиям протокола OpenFlow v1.3, работающего на скоростях не менее 10 Гбит/с и использующего уже имеющиеся отечественные разработки сетевых интерфейсов, был собран прототип OpenFlow-коммутатора, включающий в свой состав аппаратные компоненты приемо-передатчиков и центральный вычислительный узел, совместно реализующие основную тракт обработки сетевых сообщений. В качестве приемо-передающего устройства было использовано изделие АО "ИТМиВТ", реализующее двухпортовый 10G сетевой адаптер, построенное на базе СБИС Xilinx Kintex 325 и созданное в рамках проекта Минпромторга "Супермодуль" (далее – модуль ИТМиВТ).

2. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА

Прототип ПКС коммутатора был реализован на базе ЭВМ общего назначения. В разработанном прототипе центральный процессор ЭВМ реализует функции анализа и преобразования пользовательского трафика, а также необходимый для взаимодействия с контроллером сети функционал в соответствии с требованиями стандарта OpenFlow. Модули

* Проект поддержан грантом Инновационного фонда "Сколково" от 2 июля 2012 г. № 29.

ввода-вывода реализуют сопряжение вычислительного узла с физическими каналами среды обмена информации Ethernet. Взаимодействие модулей ввода-вывода с программным обеспечением осуществляется через оперативную память ЭВМ и интерфейс ввода-вывода PCI express (рис.1).

Схема прохождения потоков данных через компоненты программно-аппаратного комплекса представлена на рис.2.

В представляемой работе в качестве модулей расширения использовались комбинации модулей ввода-вывода, разработанных компаниями Intel и ИТМиВТ. Общая схема организации и функционирования модулей ввода-вывода сетевого обмена представлена на рис.3.

Для модулей ввода-вывода характерны следующие свойства:

- наличие двух интерфейсов SFP+, обслуживаемых одной СБИС;
- наличие независимых трансиверов и MAC-контроллеров для каждого из интерфейсов SFP+;
- встроенные в СБИС буферы ввода-вывода достаточные для приема-отправки не менее одного кадра на интерфейс;
- встроенные контроллеры прямого доступа к памяти (далее – ПДП), реализующие фоновые, по отношению к центральному процессору, операции обмена данными между СБИС и оперативной памятью ЭВМ;
- поддержка колец дескрипторов буферов ввода-вывода, позволяющих осуществлять прием-отправку более одного кадра Ethernet без промежуточного вмешательства центрального процессора.

Кардинальное отличие адаптеров Intel и ИТМиВТ состоит в применяемой ЭКБ. В случае адаптера Intel используется специализированная СБИС, не подлежащая

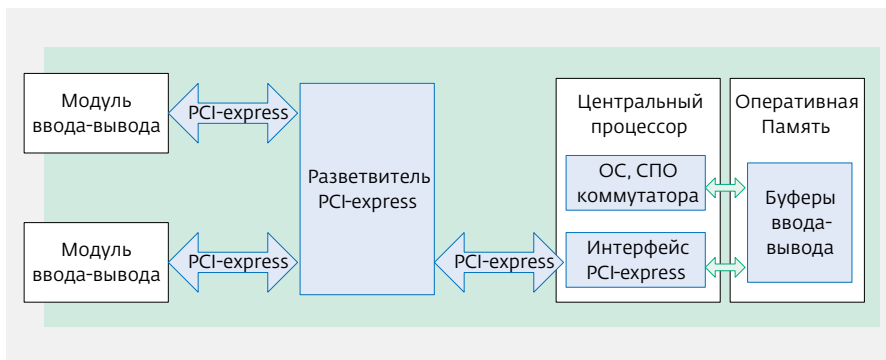


Рис.1. Структурная схема макета коммутатора

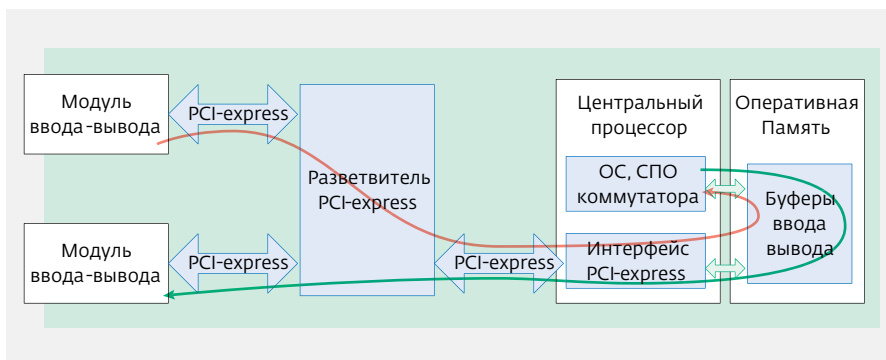


Рис.2. Схема прохождения потока данных через аппаратные компоненты

модификации и адаптации к прикладным задачам. Модуль ИТМиВТ, в свою очередь, базируется на СБИС собственной разработки, использующей ПЛИС, за счет чего может быть модифицирован и оптимизирован под специальный класс

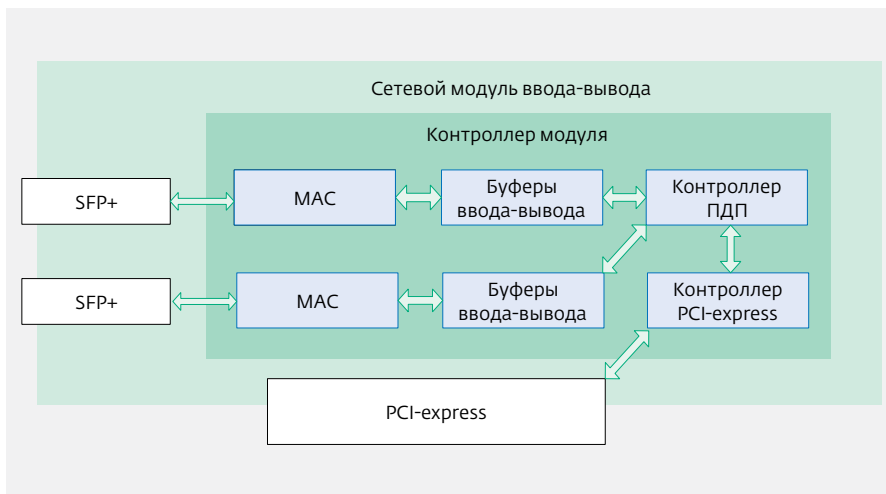


Рис.3. Общая схема организации модулей ввода-вывода

прикладных задач в силу возможности замены управляющих микрокодов.

Описанная особенность, как показали экспериментальные исследования, не ограничивает возможность применения данного устройства для приема-передачи высокоскоростных потоков данных, однако эффективное использование модуля и достижение пиковых скоростей в сценарии использования изделия в качестве модуля ввода-вывода в коммутационном оборудовании невозможно без внесения модификаций в управляющую логику СБИС.

3. ПРОГРАММНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Программные компоненты, используемые в рамках прототипа ПКС коммутатора были представлены пакетом программного обеспечения OpenVSwitch, реализующего функции:

- анализа входящих кадров сетевого трафика (далее – кадров) с целью выделения заголовочных данных и полезной нагрузки;
- анализа заголовочных данных кадров с маркированием каждого из них согласно заданным правилам классификации;
- модификации заголовочных данных кадров согласно маркировке кадров и заданным параметрическим данным, описывающим процедуру модификации;
- формирования новых данных кадров из модифицированных заголовочных данных и не модифицированных данных полезной нагрузки;
- отправки сформированных данных кадров с использованием одного из сетевых интерфейсов.

Среда выполнения системного программного обеспечения представлена ОС Ubuntu и служит цели формирования программного уровня абстракции над аппаратными ресурсами коммутатора.

4. ПОТОКИ ДАННЫХ

Потоки данных в коммутаторе независимо от типа модуля ввода-вывода имеют следующую структуру.

Прием данных:

- каждый кадр, передаваемый на коммутатор принимается во временный буфер ресивера (контроллера МАС СБИС сетевого интерфейсного модуля);
- контроллер ПДП реализует передачу принятого кадра в один из предварительно выделенных буферов обмена в оперативной памяти коммутатора;
- контроллер ПДП сигнализирует об окончании передачи входящего кадра в буфер обмена

посредством маркирования дескриптора буфера в оперативной памяти и формирования аппаратного прерывания ЦП ЭВМ;

- ПО драйвера ОС модуля ввода-вывода инициирует чтение регистров модуля и проверку полей дескрипторов буферов входящих кадров;
- для каждого из дескрипторов буферов входящих кадров, маркированных как заполненные, осуществляется захват буфера сокета сетевого стека ОС, заполнение его служебных полей (таких как длина сообщения, тип данных) и последующее уведомление служб ОС о завершении приема входящего кадра посредством передачи управления в соответствующую процедуру ядра ОС;
- последующая диспетчеризация и выбор прикладного программного обеспечения (далее – ППО) для обработки данных реализуется стандартными средствами сетевого стека ОС;
- ППО реализует вычитывание данных из файлового дескриптора сокета во внутренний буфер в ОП и последующую обработку данных.

Анализ данных:

- ПО осуществляет выделение заголовочных данных для каждого из кадров и их анализ в соответствии с правилами классификации;
 - в результате проведенного анализа входящего кадра ПО может изменить значения заголовочной информации, добавить или удалить заголовки канального уровня, направить кадр на один из исходящих интерфейсов, дублировать кадр для отправки на несколько интерфейсов, прекратить обработку кадра без отправки.
- Отправка данных:
- для отправки кадра в сеть ПО осуществляет системный вызов ОС записи необходимых сведений в файловый дескриптор сокета – передачу управления в процедуру отправки данных драйвера модуля ввода-вывода с указанием виртуального адреса буфера исходящих данных и числа байт, подлежащих отправке;
 - сетевые службы ОС реализуют заполнение служебных полей дескриптора буфера обмена с модулем ввода-вывода в ОП, информирование контроллера ПДП о готовности буфера к отправке;
 - контроллер ПДП для каждого из готовых к отправке буферов осуществляет:
 - чтение данных дескриптора буфера обмена из ОП во внутренний буфер контроллера (регистровый файл памяти);
 - вычленение адресов буфера и размера исходящего кадра;

- фоновое, по отношению к ЦП, чтение данных кадра из ОП с одновременной записью данных в ПППО* буфер трансмиттера;
- запись в дескриптор буфера обмена в ОП информации о завершении обработки данного буфера;
- формирование аппаратного прерывания для информирования драйвера сетевого интерфейса об окончании обработки буфера;
- драйвер сетевого интерфейса осуществляет проверку дескрипторов исходящих буферов, освобождение буферов путем маркирования, а также информирование сетевой подсистемы ОС об освобождении буферов сокетов.

5. ПОТОК УПРАВЛЕНИЯ

Поток управления аппаратно-программным комплексом реализуется в соответствии с требованиями стандарта OpenFlow средствами программного пакета OpenVSwitch** (далее – OVS) с задействованием сетевых интерфейсов ОС Linux.

OVS – программный коммутатор, который обеспечивает соединение между виртуальными и физическими сетевыми интерфейсами ОС. OVS предоставляет специализированный интерфейс для модификации таблиц коммутации со стороны процессов ОС. Наполнение таблиц коммутации определяет, как будут обработаны и в какие исходящие интерфейсы будут отправлены пакеты. Обработываемый коммутатором пакет может быть отправлен на один или несколько портов, сброшен или ин/декапсулирован. OVS поддерживает управление по протоколу OpenFlow версии 1.3.

Реализация OVS включает в свой состав следующие основные компоненты:

- Fastpath – компонента "быстрого пути", реализованная на уровне ядра ОС. Данная компонента обеспечивает такие функции OVS как: поиск правил в таблицах коммутации, извлечение заголовков пакетов, обработку пакетов в соответствии

с правилами, поддержку счетчиков таблиц коммутации;

- Slowpath – компонента "медленного пути", работающая в пользовательском пространстве, обеспечивает основной функционал OVS:
 - логику маршрутизации на уровнях с L2 по L4, включая MAC-learning*** и балансировку нагрузки между интерфейсами,
 - удаленную конфигурацию,
 - протоколы управления, включая OpenFlow.

Модуль OVS ядра ОС поддерживает маршрутизацию для пакетов только с полным соответствием заголовков (exact match), а маршрутизация по неполному соответствию (wildcard) может реализовываться только на уровне прикладного ПО. Таким образом, для формирования правил в Fastpath каждое неполное правило из модуля пользовательского пространства преобразуется в несколько простых правил с полным соответствием и загружается в таблицы коммутации модуля ядра.

Общая архитектура программного коммутатора OVS приведена на рис. 4.

Внутренняя архитектура OVS (см. рис. 4) состоит из следующих частей:

1. Ovs-vswitchd – главная программа, работающая в пользовательском пространстве. Реализует такие функции как:
 - получает нужную пользователю конфигурацию от программы ovsdb-server через канал IPC, а затем передает эту конфигурацию далее, в библиотеку ofproto,
 - получает информацию о статусе и статистике от ofproto и сохраняет ее в базе данных;
2. Ofproto – библиотека, реализующая OpenFlow-коммутатор, обеспечивает:
 - общение с OpenFlow-контроллерами по протоколу OpenFlow,
 - общение с нижележащим программным обеспечением с помощью интерфейса ofproto provider;
3. Netdev – специальная библиотека, описывающая абстракции для работы с сетевым оборудованием, например, с Ethernet-интерфейсами. Представляет собой небольшую прослойку над Netdev provider;
4. Netdev provider – модуль, реализующий специфичные для ОС и оборудования интерфейсы для взаимодействия с сетевым оборудованием;

* ПППО – алгоритм обслуживания очереди заданий, разрешения конфликтных ситуаций доступа по схеме: "Первым пришел – первым обслужен". Широко применяется в вычислительной технике, как механизм взаимодействия между асинхронными процессами читателей и писателей, средство взаимодействия компонентов, функционирующих в различных частотных доменах.

** Проект поддержан грантом Инновационного фонда "Сколково" от 2 июля 2012 г. № 29.

*** OpenVSwitch – ПО с открытым исходным кодом, распространяемое под лицензией Apache 2.0.

5. Ofproto provider – модуль, определяющий интерфейсы для работы с нижележащим программным обеспечением и оборудованием и реализующий доступ к OpenFlow-совместимому коммутатору для компоненты ofproto;
6. Ofproto-dpif – встроенный в ofproto-provider OVS, построенный с использованием библиотеки dpif, необходимой для управления таблицей datapath;
7. Datapath – таблица потоков, поддерживающая поиск по полному соответствию заголовков.

Компонентой datapath реализован следующий алгоритм поиска потоков по полному соответствию заголовков:

- при получении пакета сетевым интерфейсом, datapath пытается найти соответствующий ему поток в таблице правил классификации с полным соответствием полей,
- если совпадение найдено, то выполняются соответствующие этому потоку действия,
- если совпадения нет, то datapath отправляет пакет в ofproto-dpif для поиска правил классификации с неполным соответствием,
- если нужный поток существует в ofproto-dpif, то пакет отправляется обратно в datapath для выполнения нужных действий, а также в datapath формируется эквивалентное правило полного соответствия, чтобы все последующие пакеты с таким же заголовком не отправлялись в ofproto-dpif и обрабатывались по схеме Fastpath,
- в противном случае пакет отправляется на OpenFlow-контроллер.

6. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Для экспериментального исследования возможностей прототипа OpenFlow-коммутатора в рамках проделанной работы использовался стенд, построенный на базе:

- сервера SuperMicro SRV Legion SL2000;
- модуля сетевого ввода-вывода ИТМиВТ;
- модуля сетевого ввода-вывода Intel X520-DA2. Сервер SuperMicro включает в свой состав:
- процессоры Intel Xeon E5645 – 2 шт.;

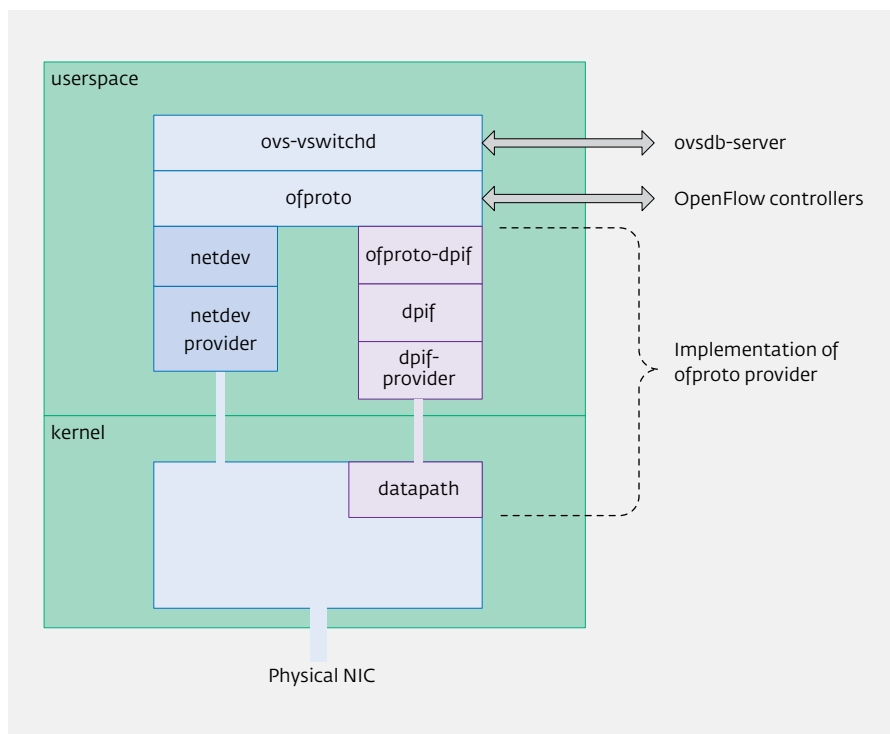


Рис.4. Архитектура Open vSwitch

- оперативную память DDR3 – 1333 МГц с ECC – 48 Гб, распределенную равномерно между восьмью портами памяти процессоров;
- НЖМД 2 Гб – 2 шт.

Архитектура экспериментального стенда приведена на рис.5.

Коммутация сетевых интерфейсов была реализована с помощью кабелей SFP+ Passive Cable 30AWG Huawei. Нулевой порт модуля Intel соединен с нулевым портом модуля ИТМиВТ, первый порт модуля Intel с первым портом модуля ИТМиВТ (см. рис.5).

На стенде были проверены следующие свойства:

- интероперабельность оборудования – успешное взаимодействие по приему и отправке данных между модулями Intel и ИТМиВТ;
- совместимость оборудования по PCI-express – успешное взаимодействие ЦП с модулями;
- возможность использования оборудования ИТМиВТ для комплексирования управляемого коммутационного оборудования;
- достижимые характеристики по пропускным способностям интерфейсов и возможностям ЦП.

В рамках проведенной серии экспериментов реализовывалась отправка потока сетевых пакетов, их прием и обработка согласно различным наборам

правил обработки OpenFlow. При этом замерялись показатели числа полученных, отправленных, потерянных на интерфейсах пакетов при варьировании размера полезной нагрузки пакета.

Проведенные экспериментальные исследования позволили нам подтвердить на практике функциональную корректность предложенной системы, а также оценить скорость обработки пакетов при работе через различные интерфейсы.

Эксперименты проводились по четырем сценариям.

Сценарий 1

OVS с Ethernet портами на базе модулей ввода-вывода ИТМиВТ настроен таким образом, чтобы трафик, получаемый на порт № 0 модуля ИТМиВТ, пересылался на порт № 1 того же модуля, и наоборот, трафик с порта № 1 пересылался на порт № 0.

На стенде инициируется генератор тестового трафика. Проверяется, что сгенерированный трафик проходит через порты тестируемой карты.

С помощью анализатора трафика проверяется корректность получения пакетов трафика.

Без изменения настроек OVS запускается автотест, постепенно увеличивающий генерируемый трафик от 50 тыс. пакетов в секунду до 5 млн. пакетов в секунду с размером пакета 64 байта. Далее автотест проводится для пакетов размером 128, 512, 1024, 1500, 2048 байт.

Определяется скорость получения трафика на принимающем порту. Журналируется соотношение количества переданных и принятых байт.

Сценарий 2

OVS с Ethernet портами на базе модулей ввода-вывода ИТМиВТ и модулей Intel настроен таким образом, чтобы трафик, получаемый на порту № 0 модуля ИТМиВТ, пересылался на порт № 0 модуля Intel, и наоборот, с порта № 0 модуля Intel на порт № 0 модуля ИТМиВТ.

Одновременно с этим трафик, получаемый на порту № 1 модуля ИТМиВТ, должен пересылаться на порт № 1 модуля Intel и наоборот, с порта № 1 модуля Intel на порт № 1 модуля ИТМиВТ.

На стенде инициируется генератор тестового трафика. Проверяется, что сгенерированный трафик проходит через порты тестируемых карт.

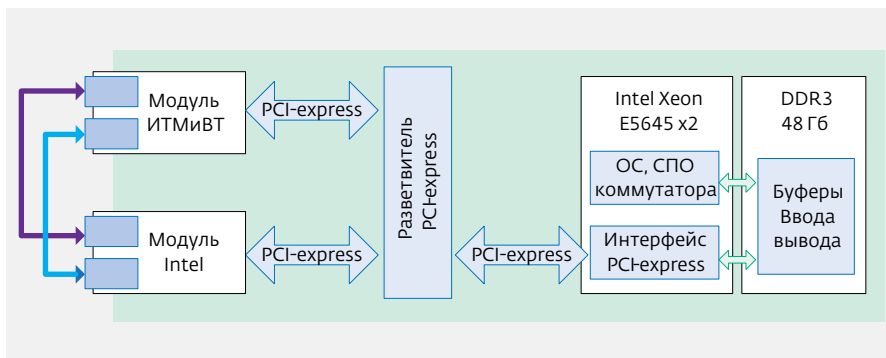


Рис.5. Архитектура стенда

С помощью анализатора трафика проверяется корректность получения пакетов трафика.

Без изменения настроек OVS запускается автотест, постепенно увеличивающий генерируемый трафик от 50 тыс. пакетов в секунду до 5 млн. пакетов в секунду с размером пакета 64 байта. Далее автотест проводится для пакетов размером 128, 512, 1024, 1500, 2048 байт.

Определяется скорость получения трафика на принимающем порту. Журналируется соотношение количества переданных и принятых байт.

Сценарий 3

Сценарий 3 аналогичен сценарию 1, только в ходе эксперимента фиксируется соотношение количества передаваемых пакетов и количество принимаемых пакетов.

Сценарий 4

Сценарий 4 аналогичен сценарию 2, только в ходе эксперимента фиксируется соотношение количества передаваемых пакетов и количество принимаемых пакетов.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис.6 приведены графики зависимости скорости обработки трафика для поданных на порт адаптера сгенерированных нагрузчиком (отражено по оси абсцисс в Кбит/с) и вышедших через второй порт, уже обработанных адаптером (отражено по оси ординат в Кбит/с) потоков данных, которые были сгенерированы из пакетов фиксированной длины. Их размер последовательно менялся в каждом следующем тестовом прогоне в диапазоне значений от 64 до 2048 байт в соответствии со сценарием № 1 при транзите трафика между двумя портами ввода-вывода модуля ИТМиВТ.

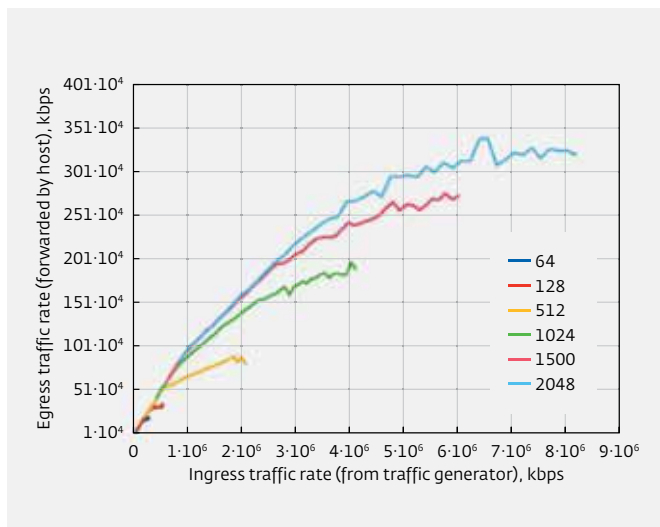


Рис.6. График зависимости принимаемого и обрабатываемого трафика портами модуля ИТМиВТ

На рис.7 приведены графики зависимости скорости обработки трафика для поданных на порт адаптера (отражено по оси абсцисс в Кбит/с) и вышедших через второй порт, уже обработанных адаптером (отражено по оси ординат в Кбит/с) потоков данных, которые были сгенерированы из пакетов фиксированной длины. Их размер последовательно менялся в каждом следующем тестовом прогоне в диапазоне значений от 64 до 2048 байт в соответствии со сценарием № 2 при передаче трафика между портами ввода-вывода модуля ИТМиВТ и Intel.

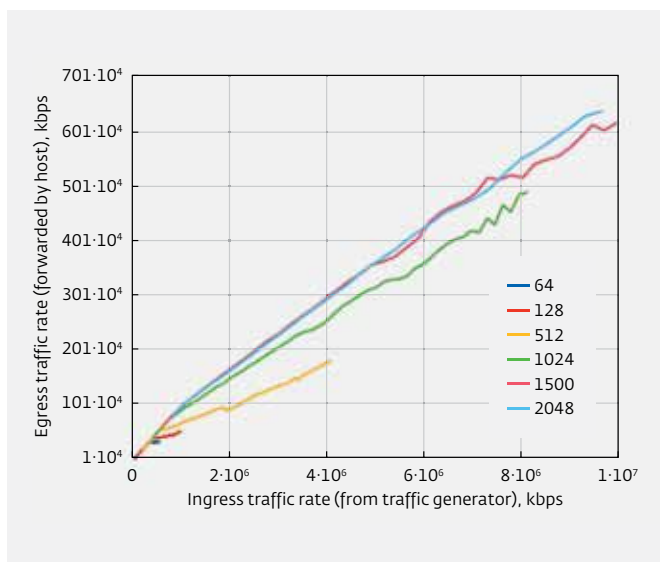


Рис.7. График зависимости принимаемого и обрабатываемого трафика модулями ИТМиВТ и Intel

На рис.8 приведены графики зависимости скорости обработки трафика для поданных на порт адаптера (отражено по оси абсцисс в пакетах/с) и вышедших через второй порт, уже обработанных адаптером (отражено по оси ординат в пакетах/с) потоков данных, которые были сгенерированы из пакетов фиксированной длины. Их размер последовательно менялся в каждом следующем тестовом прогоне в диапазоне значений от 64 до 2048 байт в соответствии со сценарием № 3 при транзите трафика между двумя портами ввода-вывода модуля ИТМиВТ.

На рис.9 приведены графики зависимости скорости обработки трафика для поданных на порт адаптера (отражено по оси абсцисс в пакетах/с) и вышедших через второй порт, уже обработанных адаптером (отражено по оси ординат в пакетах/с) потоков данных, которые были сгенерированы из пакетов фиксированной длины. Их размер последовательно менялся в каждом следующем тестовом прогоне в диапазоне значений от 64 до 2048 байт в соответствии со сценарием № 4 при передаче трафика между портами ввода-вывода модуля ИТМиВТ и Intel.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного экспериментального исследования можно заключить:

- модуль ИТМиВТ физически совместим с серверной платформой общего назначения;

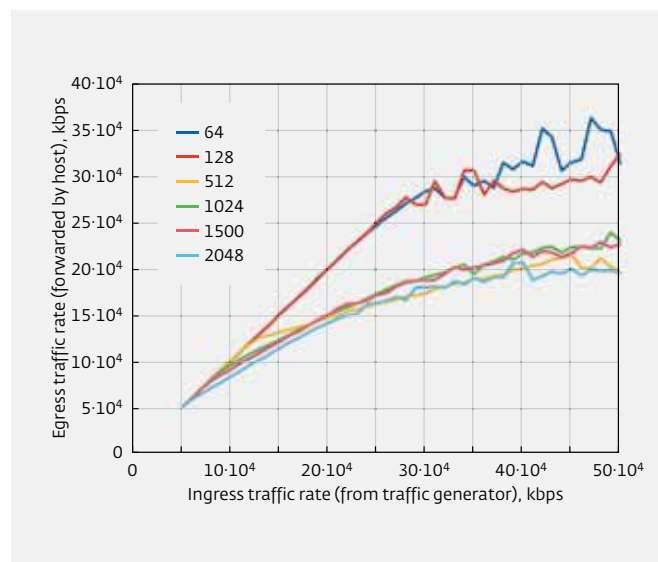


Рис.8. График зависимости принимаемого и обрабатываемого трафика портами модуля ИТМиВТ

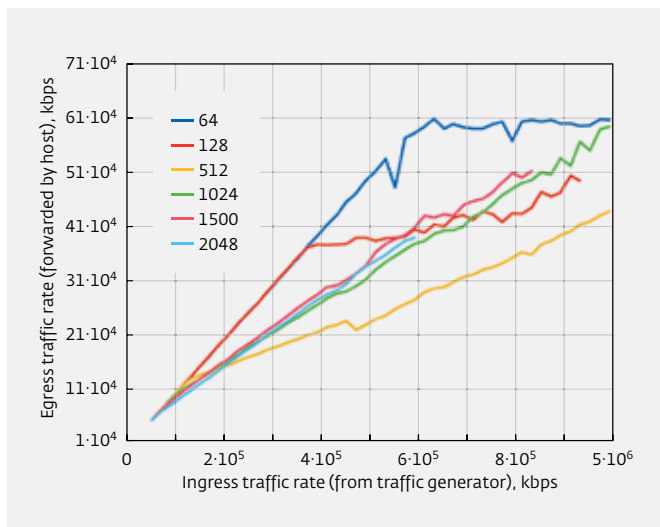


Рис.9. График зависимости принимаемого и обрабатываемого трафика модулями ИТМиВТ и Intel

- модуль ИТМиВТ может взаимодействовать с оборудованием других производителей, в частности с модулем фирмы Intel;
- на модуле ИТМиВТ могут быть достигнуты приемлемые показатели производительности сетевых обменов в сетях 10 Гбит/с.

Макет коммутатора, построенный на базе ЭВМ общего назначения и аппаратуры российского производства, успешно прошел функциональные испытания. Построенный макет может быть использован для проектирования и отработки аппаратно-программных решений, улучшения ТТХ и проектирования конечного изделия отечественного производства.

В то же время необходимо отметить, что показатели производительности с применением модулей ИТМиВТ уступают теоретически достижимым и аналогичным адаптерам, предназначенным для использования в серверных шасси от ведущих западных производителей. Имеющиеся недостатки обусловлены особенностями реализации тракта обработки данных в логике адаптера и могут быть устранены путем модификации микрокодов модуля ИТМиВТ.

Для улучшения ТТХ оборудования при использовании модуля ИТМиВТ необходимо реализовать:

- поддержку множества независимых колец дескрипторов приемо-передатчиков;
- параметризуемый классификатор входящих кадров, селектор входящей очереди по параметрам входящего кадра (подобие 5-tuple классификатора в адаптерах Intel);

- параметризуемый контроллер прерываний с возможностями:
 - формирования различных прерываний по событиям, связанным с обработкой разных колец дескрипторов;
 - параметризации условий формирования прерываний: по абсолютному времени после возникновения события, по относительному времени после возникновения однотипного события.

Описанные модификации позволят распределить нагрузку обслуживания модуля ввода-вывода на все процессоры системы за счет разведения привязки прерывания по ним, а также за счет снижения числа коллизий на доступе к критическим точкам колец дескрипторов, снизив тем самым время ожидания процессов, реализующих прием и отправку данных, латентность системы в целом. Данные изменения в конечном итоге позволят достичь производительности и латентности, эквивалентных показателям адаптера Intel.

Таким образом, можно заключить, что с учетом доработок управляемый коммутатор, построенный с задействованием российских компонентов, может обеспечить показатели, не уступающие показателям, достижимым на аналогичной композиции, построенной с задействованием только элементов не российского производства.

Дополнительного внимания заслуживает пробирование применения ЭВМ отечественного производства как основы для комплексирования управляемого аппаратно-программного коммутатора, например, серверные платформы, построенные на базе процессоров семейства Эльбрус, обладающие, согласно заявлению производителей, достаточным запасом вычислительной мощности и пропускных способностей внутренних интерфейсов.

Особого интереса в свете требований протокола OpenFlow заслуживает расширение аппаратного классификатора, реализующего выбор очереди входящих пакетов. Так, в случае адаптеров Intel применяется анализатор 5-tuple, реализующий выбор очереди по значению хеша от маскируемого набора полей входящего пакета, включающего в свой состав: тип полезной нагрузки, входящий и исходящий IPv4-адреса, входящий и исходящий порты (для TCP, UDP). С точки зрения OpenFlow данный набор является недостаточным для оптимального распределения нагрузки между вычислительными потоками центральной системы в силу допустимого разнообразия сценариев применения, а,

следовательно, и правил конечной классификации и преобразования.

Повышение качества обслуживания в аппаратно-программном комплексе, подобном описанному в данной работе, может быть достигнуто при расширении картежа полей кадра, влияющих на выбор очереди пакетов, в сторону добавления анализируемых полей согласно спецификации OpenFlow, например, меток vlan, mpls, в случае их наличия. Данная модификация не может быть выполнена на уровне закрытых микрокодов Intel, но вполне может быть проведена для модулей ИТМиВТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смелянский Р.Л., Васин В.В. Беззубцев С.О.** Разработка отечественного коммутатора для программно-конфигурируемых сетей // Электронная техника. 2015. Вып. 2 (158). (Серия 3. Микроэлектроника).
2. OpenFlow Switch Specification Version 1.3.0. [PDF]. – www.opennetworking.org/images/stories/downloads/specification/openflow-spec-v1.3.0.pdf
3. Kintex-7 FPGA Base Targeted Reference Design. User Guide [PDF]. – www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug882_K7_Base_TRD.pdf
4. LogiCORE IP 10-Gigabit Ethernet MAC v11.1. User guide [PDF]. – www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ug773_ten_gig_eth_mac.pdf
5. LogiCORE IP 10-Gigabit Ethernet MAC v11.1. Product specification [PDF]. – www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ds813_ten_gig_eth_mac.pdf
6. OFTestTutorial. – URL: <http://www.openflow.org/wk/index.php/OFTestTutorial>
7. **Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж.** Построение и анализ вычислительных алгоритмов. – М.: Мир, 1979.
8. **Таненбаум Э.** Компьютерные сети / Изд. 5-е. – М.: Питер, 2012.
9. Jumbo Frame. – en.wikipedia.org/wiki/Jumbo_frame
10. **Татт У.** Теория графов. – М.: Мир, 1988.
11. **Митчелл М., Оулдем Дж., Самьюэл А.** Программирование для Linux. Профессиональный подход. – М.: Вильямс, 2003.
12. **Лав Р.** Linux. Системное программирование. – М.: Питер, 2008.
13. **Rosen R.** Linux Kernel Networking – Implementation and Theory. – Apress, 2014.
14. Ubuntu. – www.ubuntu.com
15. Xilinx 7 Series FPGAs Overview [PDF]. – www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds180_7Series_Overview.pdf
16. CMake. – www.cmake.org
17. GCC, the GNU Compiler Collection. – gcc.gnu.org
18. TcpDump & LibPCAP. – www.tcpdump.org
19. Open VSwitch repository. – github.com/openvswitch/ovs
20. Packet Processing on Intel Architecture. – www.intel.com/content/www/us/en/intelligent-systems/intel-technology/packet-processing-is-enhanced-with-software-from-intel-dpdk.html
21. Open VSwitch. Product Description. – openvswitch.org
22. **Pettit J., Gross J., Pfaff B., Casado M., Crosby S.** Virtual Switching in an Era of Advanced Edges, 2nd Workshop on Data Center – Converged and Virtual Ethernet Switching (DC-CAVES), ITC 22, Sep. 6, 2010.

ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА ОСНОВЕ БИСТАБИЛЬНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ПОЛЕВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

► А.А.Малых^{1,2}, В.Н.Мурашев¹

¹НИТУ "МИСиС", ²АО "ПКК Миландр"

Разработан датчик магнитного поля с частотным выходом (ДЧВ) на основе бистабильного мультивибратора, использующий оригинальный чувствительный элемент – полевой датчик Холла (ПДХ). Конструкция ПДХ совмещает полевой МДПДМ-транзистор и традиционный кремниевый элемент Холла, что позволяет ему, наряду с регистрацией магнитного поля, осуществлять динамическую подстройку исходной частоты ДЧВ. В работе обсуждаются пути оптимизации разработанного ДЧВ. Экспериментальная магнитная чувствительность ДЧВ составляет 2 кГц/мТл при частоте около 400 кГц.

THE MAGNETIC FIELD SENSOR WITH CONTROLLABLE FREQUENCY-OUTPUT ON THE BASE OF THE BISTABLE MULTIVIBRATOR AND THE FIELD-EFFECT HALL SENSOR AS THE SENSING ELEMENT

A.A.Malykh^{1,2}, V.N.Murashev¹

¹NUST "MISIS", ²JSC "PKK Milandr"

The magnetic frequency-output sensor (FOS) based on the bistable multivibrator construction that uses an original sensing element – the field-effect Hall sensor (FEHS) is developed. FEHS combines the field-effect double-gate MOS transistor and the conventional Hall sensor in the same construction. This allows to measure the magnetic field as well as to implement dynamic adjustment of the initial frequency of the FOS. The paper discusses ways to optimize the developed magnetic field FOS. The experimental value of magnetic sensitivity is 2 kHz/mT at the frequency of about 400 kHz.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно развиваются и внедряются технологии беспроводной передачи данных, а также сенсорные сети, построенные на данном принципе, так называемые беспроводные сенсорные сети (БСС). В ячейках БСС – "нодах" широкого спектра применения, – как правило, используются недорогие микроконтроллеры с ограниченным количеством цифровых входов. В связи с этим крайне полезным может быть использование в "нодах" микроэлектронных датчиков магнитного

поля с частотным выходом. ДЧВ позволяют передавать информацию о внешнем воздействии в виде частоты электрического сигнала на микроконтроллер, используя единственный цифровой вход [1].

В данной работе представлен ДЧВ магнитного поля, использующий специальный чувствительный элемент – полевой датчик Холла (ПДХ), выполненный по технологии "кремний на изоляторе" (КНИ) и позволяющий, наряду с регистрацией магнитного поля, осуществлять подстройку исходной частоты ДЧВ.

КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ

На рис.3 представлена общая схема датчика магнитного поля с частотным выходом. За основу была взята схема, предложенная в [2], с наибольшей чувствительностью. Как видно, основой датчика является схема бистабильного мультивибратора с возможностью изменения выходной частоты за счет управления сопротивлениями транзисторов Q5 и Q6 через изменение потенциалов $V_{g_{Q5}}$ и $V_{g_{Q6}}$ на их затворах.

При использовании в качестве чувствительного элемента традиционного элемента Холла отклонение от исходного значения частоты ДЧВ на выходе происходит пропорционально величине индуцируемого на холловских контактах сигнала. Сигнал с холловских контактов подается на затворы транзисторов Q5 и Q6 и определяет разность их внутреннего сопротивления под воздействием магнитного поля, что приводит к разбалансировке сопротивления "плеч" схемы, в которые входят Q5 и Q6, вызывая отклонение от исходного значения частоты ДЧВ.

ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ И РЕГУЛИРУЕМОЙ ИСХОДНОЙ ЧАСТОТОЙ

В данной работе в качестве чувствительного элемента ДЧВ магнитного поля используется так называемый полевой датчик Холла, представляющий собой интеграцию в единой структуре $n^+ - n - n^+$ КНИ полевого МДП-транзистора со встроенным каналом и двумя управляющими затворами, а также традиционного кремниевого элемента Холла [2]. Основным режимом работы ПДХ является режим аккумуляции носителей на границах Si-SiO₂.

Важной особенностью ПДХ является возможность управления величиной регистрируемой ЭДС Холла с помощью выбора электрического режима работы, а именно напряжения питания V_d и потенциала на затворах V_g . На рис.2 показаны зависимости

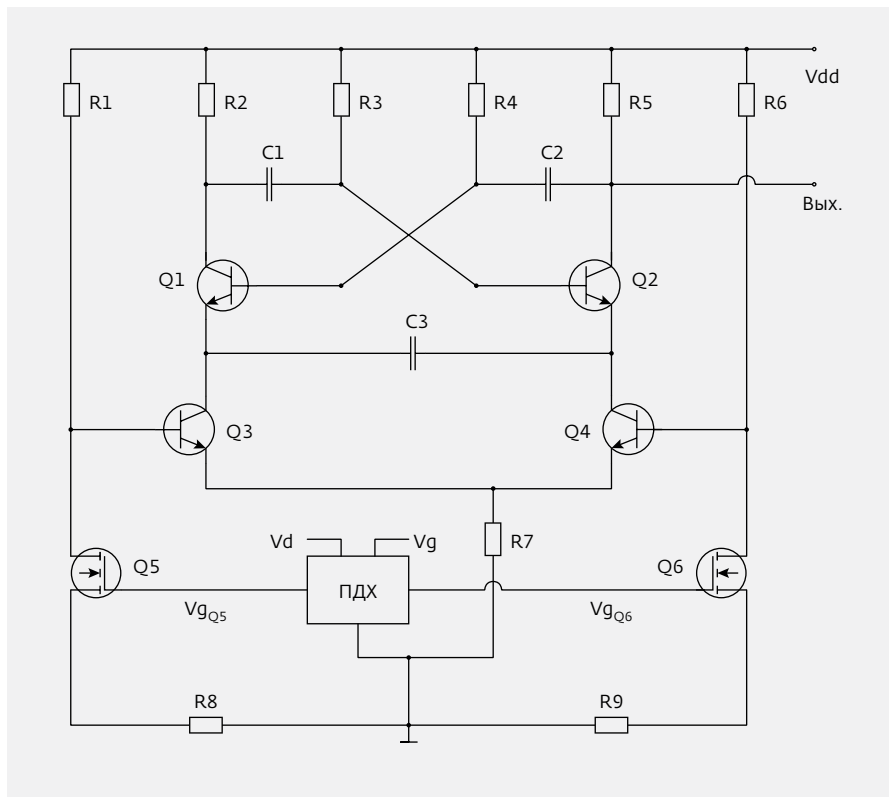


Рис.1. Общая схема датчика магнитного поля с частотным выходом

напряжения Холла от различных режимов включения ПДХ.

При использовании ПДХ в представленном ДЧВ потенциалы $V_{g_{Q5}}$ и $V_{g_{Q6}}$ регулируются как режимами работы ПДХ, так и величиной регистрируемого внешнего воздействия. Это делает возможной, наряду с проведением измерений магнитного поля, подстройку выходной частоты ДЧВ. При этом, в отличие от схемы, используемой в [2], питание ПДХ организовано отдельно от питания схемы мультивибратора, что обеспечивает возможность подстройки частоты и чувствительности ДЧВ как с помощью потенциалов V_g на его затворах, так и с помощью выбора напряжения питания V_d .

На рис.3а приведена типовая зависимость выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ, полученного с помощью моделирования схемы ДЧВ в программе для моделирования и отладки электронных схем Multisim. При моделировании ДЧВ в Multisim потенциалы $V_{g_{Q5}}$ и $V_{g_{Q6}}$ задаются при помощи двух источников питания, эмулирующих напряжения на холловских контактах ПДХ при заданном режиме питания ПДХ. Зависимость на рис.3а разделена на области, которые соответствуют областям, указанным на рис.3б,

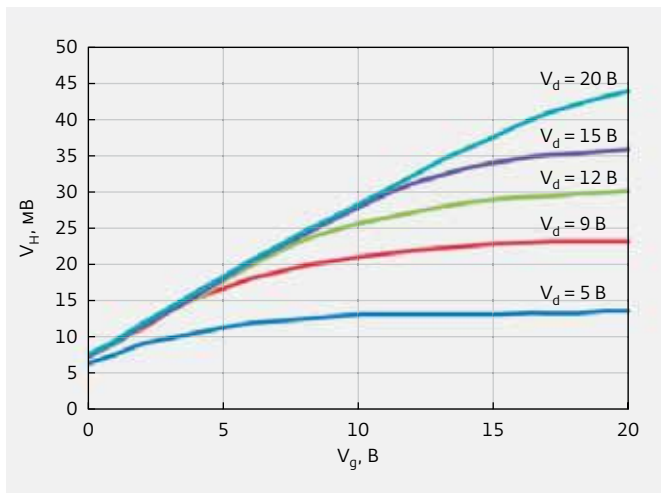


Рис.2. Зависимость ЭДС Холла от режимов работы ПДХ

где представлена типовая передаточная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом. Область I соответствует подпороговому режиму работы транзисторов Q5 и Q6, область II – переходу в открытое состояние, а область III – это область полного открытия транзисторов.

Область II является рабочей областью функционирования разработанного ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ. Как видно из рис.3б, данной области соответствует наибольшая зависимость тока транзисторов Q5 и Q6, а следовательно, их сопротивления от напряжений на их затворах $V_{g_{Q5}}$ и $V_{g_{Q6}}$. Наличие у ПДХ зависимости остаточной разности потенциалов на холловских контактах от режима его работы определяет разность напряжений $V_{g_{Q5}}$

и $V_{g_{Q6}}$ в отсутствии магнитного поля, а следовательно, и проводимости транзисторов Q5 и Q6 и "плеч" схемы ДЧВ, в состав которых они входят. Указанная особенность позволяет обеспечить возможность регулирования исходной частоты ДЧВ (в отсутствие магнитного поля) с помощью выбора электрического режима работы ПДХ. В области III транзисторы полностью открыты, и разность между напряжениями $V_{g_{Q5}}$ и $V_{g_{Q6}}$ не оказывает влияние на их проводимость, что приводит к невозможности как управления исходной частотой, так и регистрации воздействия магнитного поля.

Для практического применения важно определить возможности изменения динамического диапазона управления рабочей областью (область II на рис.3а) разработанного ДЧВ магнитного поля. При заданном напряжении питания V_{dd} схемы ДЧВ и заданных транзисторах мультивибратора Q1-Q4 этого можно добиться выбором транзисторов Q5 и Q6 с необходимыми параметрами. Из рис.3б понятно, что для смещения области II в сторону меньших напряжений необходимо, чтобы транзисторы Q5 и Q6 имели как можно меньшее пороговое напряжение V_{th} . Это подтверждается рис.4, на котором приведены экспериментальные зависимости выходной частоты ДЧВ от напряжения на затворе ПДХ в схеме измерения магнитного поля для двух пар транзисторов Q5 и Q6 с разным значением V_{th} . Для транзистора с $V_{th} = 2-4$ В переход из области I в область II происходит заметно позднее, нежели для транзистора с $V_{th} = 1-2$ В. Однако можно заметить, что выбор транзисторов Q5 и Q6 с более низким V_{th} приводит одновременно к сужению области II

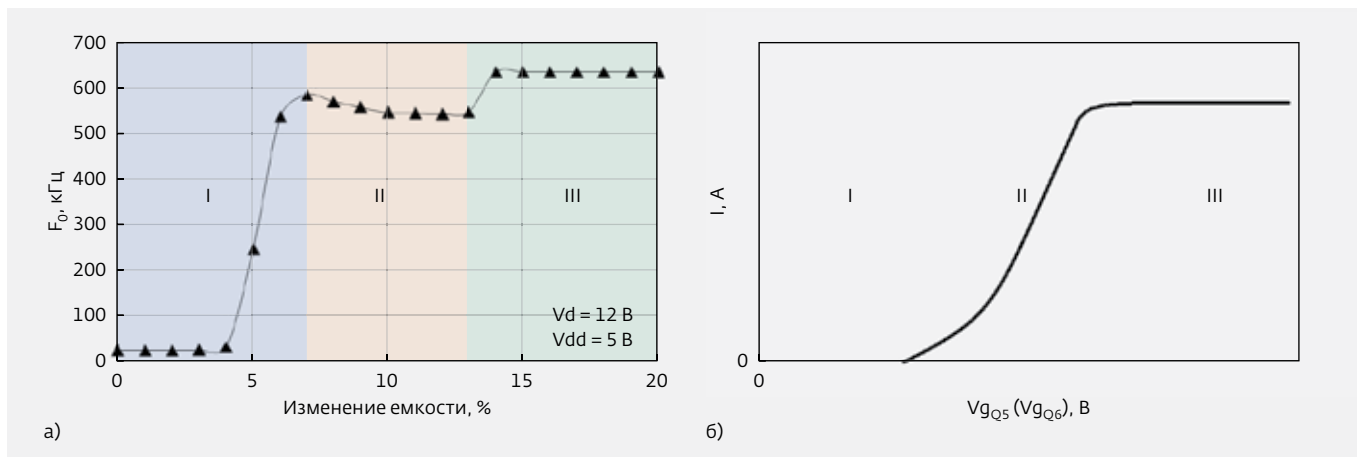


Рис.3. Зависимость выходной частоты ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ от потенциала на его затворах: V_d – напряжение питания ДЧВ; V_{dd} – напряжение питания ПДХ (а) и типовая передаточная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом (б)

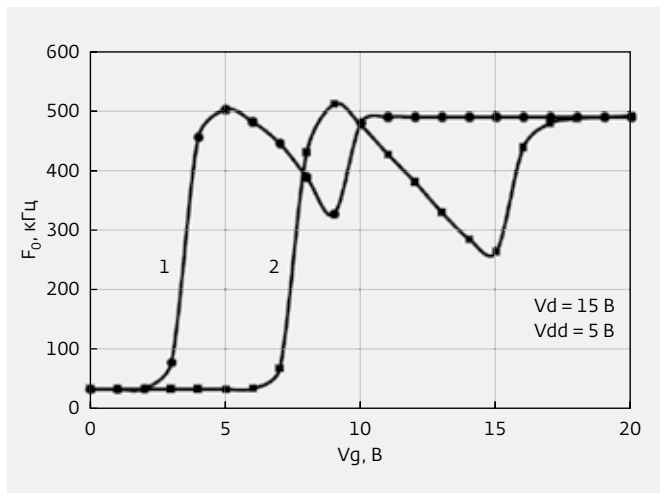


Рис.4. Экспериментальные зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для двух пар транзисторов Q5 и Q6 с разными пороговыми напряжениями V_{th} : 1) IRLD110 ($V_{th} = 1-2$ В); 2) IRFD110 ($V_{th} = 2-4$ В)

со стороны более высоких напряжений на затворах V_g ПДХ, при этом уменьшается и динамический диапазон управления.

Немаловажным является параметр крутизны преобразования выходной частоты с помощью ПДХ. С одной стороны, согласно рис.3б повышения крутизны можно достичь выбором транзисторов Q5 и Q6 с большей крутизной передаточной характеристики, что также положительно скажется и на чувствительности ДЧВ. С другой стороны повышения крутизны управления можно добиться при использовании резисторов R8 и R9 с отличающимися номиналами. На рис.5 приведены экспериментальные зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для трех различных соотношений сопротивлений R8 и R9. Из рис.5 можно определить, что крутизна преобразования в области II увеличилась как минимум в три раза - с 20 до 60 кГц/В при увеличении исходной разбалансировки "плеч".

Разработанный ДЧВ магнитного поля, помимо возможности управления исходной частотой, обладает высокой магниточувствительностью. На рис.6 приведены зависимости изменения исходной частоты ДЧВ под воздействием на ПДХ магнитного поля от потенциалов V_g на затворах ПДХ для различных напряжений V_d питания ПДХ. Видно, что магниточувствительность достигает свыше 2 кГц/мТл, при этом исходная частота в отсутствии магнитного поля составляет около 400 кГц.

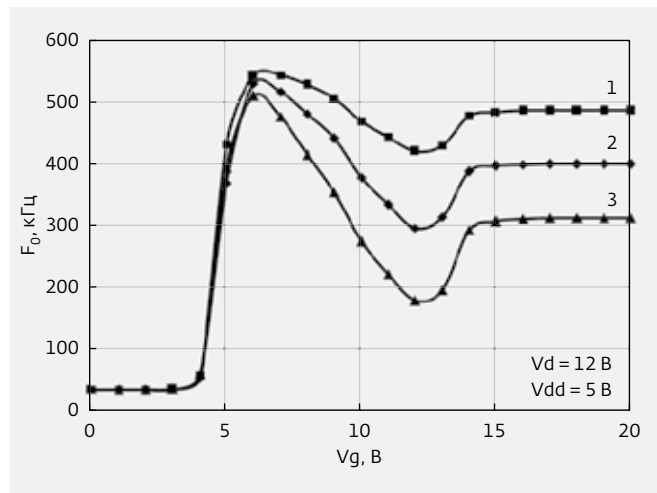


Рис.5. Зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для трех различных соотношений сопротивлений R8 и R9: 1) $R_8 = R_9 = 3,3$ кОм (исходная); 2) $R_9 + 36$ Ом; 3) $R_9 + 62$ Ом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный ДЧВ магнитного поля на основе бистабильного мультивибратора и полевого датчика Холла в качестве чувствительного элемента имеет высокий показатель чувствительности к магнитному полю. В экспериментах эта величина составила более 2 кГц/мТл при частоте около 400 кГц. Кроме того, особенности ПДХ позволяют осуществлять подстройку исходной частоты

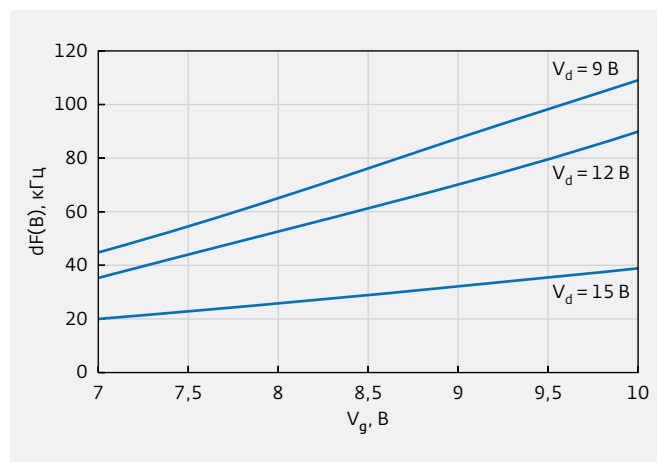


Рис.6. Зависимости изменения исходной частоты ДЧВ под воздействием на ПДХ магнитного поля с индукцией $B = 50$ мТл от величины потенциалов V_g на затворах ПДХ для различных напряжений V_d питания ПДХ

разработанного ДЧВ с помощью выбора электрического режима самого чувствительного элемента, а именно напряжения питания и потенциала на его затворах.

Показано, что для изменения динамического диапазона управления рабочей областью разработанного ДЧВ магнитного поля можно выбирать транзисторы, входящие в цепь управления выходной частотой с необходимыми параметрами. Кроме того, показано, что добиться крутизны управления исходной частотой ДЧВ можно путем использования резисторов, входящих в цепи управления частотой, с отличающимися номиналами.

Разработанный ДЧВ представляет собой перспективный датчик для использования, например, в беспроводных сенсорных сетях широкого спектра применения (промышленность, системы типа "умный дом", космическая электроника, портативные измерительные системы и др). Прибор характеризуется простотой конструкции, возможностью реализации в монолитном исполнении, а также возможностью управления исходной частотой датчика с помощью выбора электрического режима работы ПДХ (на 50% и более). Это может быть полезно при создании многодатчиковых систем, обрабатываемых одной схемой ДЧВ.

Используемый в качестве чувствительного элемента ПДХ в виду его конструктивных особенностей и особенностей режима работы обладает расширенным диапазоном рабочих температур – от температуры жидкого гелия до как минимум 375°C [4]. Тем

самым обеспечивается возможность создания датчиков с частотным выходом с расширенным диапазоном рабочих температур, что открывает дополнительные возможности для разработки датчиковой аппаратуры и ее использования БСС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.576.21.0026, УИ: RFMEFI57614X0026).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Azcona C., Calvo B., Celma S., Medrano N., Martínez P.A.** Ratiometric voltage-to-frequency converter for long-life autonomous portable equipment // IEEE Sensors J. 2013. Vol. 13. № 6. PP. 2382–2390.
2. **Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омелянская Н.М., Пажин Д.М.** Полевой датчик Холла – новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. 2003. № 7. С. 33–37.
3. **Негоденко О.Н., Мардамшин Ю.П.** Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негетронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 5–6. С. 19–22.
4. **Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I.** Field Controlled Si Hall Element with Extended Operation Temperature Range from Liquid Helium Temperature up to 650K // Procedia Engineering. 2015. T. 120. PP. 1197–1200.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ БМК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

► Л.Г.Нидеккер, В.Н.Шмигельский, В.И.Эннс
АО "НИИМЭ"

В настоящей статье рассматривается метод проектирования цифровых микросхем с использованием стандартных элементов в приложении к базовым матричным кристаллам. Описаны основные преимущества и недостатки данного подхода. Также представлен маршрут разработки библиотеки стандартных элементов.

DEVELOPMENT OF DIGITAL IC BASED ON GA USING STANDARD CELLS

L.G.Nidekker, V.N.Shmigelskiy, V.I.Enns
MERI JSC

In this article the method of development of digital IC based on GA using standard cell library is considered. Some advantages and disadvantages of this method are described. Also, this paper consist overview of standard cell library development flow.

ВВЕДЕНИЕ

Для космической промышленности требуются небольшие партии микросхем, устойчивых к воздействиям радиации. Оптимальным решением при проектировании цифровых СБИС в этом случае является использование базовых матричных кристаллов, изготовленных по технологии КНИ. Отличительной особенностью БМК является то, что зашивка схемы производится на завершающем этапе изготовления полупроводниковых пластин изменением слоев металлизации. Так как матрица транзисторов при проектировании схем на основе БМК не меняется (а, следовательно, не меняется набор фотошаблонов), то стоимость изготовления существенно ниже по сравнению с производством полностью заказных схем. Также микросхемы, разработанные на основе базовых матричных кристаллов, обладают большей информационной емкостью, чем их аналоги на ПЛИС, реализованные по тем же проектным нормам. Из всего сказанного выше следует, что развитие направления интегральных схем на базе БМК актуально в современных условиях.

В настоящей статье рассматривается метод проектирования цифровых микросхем БМК на основе стандартных элементов. Идея данного подхода

заключается в использовании оптимально спроектированных логических вентилях и сложных функциональных блоков на этапе разработки СБИС.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

К преимуществам применения стандартных элементов в маршруте проектирования цифровых схем можно отнести:

- упрощение процесса разработки схемы, в этом случае инженеру нет необходимости вникать в схемотехническое и технологическое устройство логических элементов, а можно использовать их как "черные ящики", выполняющие конкретную логическую функцию и обладающие определенными параметрами;
- сокращение сроков проектирования (и как следствие уменьшение параметра TTM – Time to Market) и уменьшение требуемой вычислительной мощности для разработки схемы, так как при использовании библиотеки стандартных элементов нет необходимости в проведении SPICE симуляции всей схемы целиком, а достаточно лишь статического временного анализа. Это следует

БИБЛИОТЕКА СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривая состав библиотеки, все элементы можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся комбинаторные и составные элементы, например NAND, NOR, AOI и т. д. Вторая группа содержит последовательную логику, то есть триггеры и защелки. К третьей группе можно отнести оптимально спроектированные арифметические блоки, такие как сумматоры, шифраторы, дешифраторы, компараторы и т. д. Четвертая группа состоит из специальных элементов, таких как буферы, подтяжки к земле и питанию (TIE0 и TIE1), элементы для балансировки дерева тактовых сигналов, линии задержки и филлеры. Часто в состав библиотеки включают элементы для построения clock-gating архитектур и тестирующей логики (DFT).

Для полного набора, необходимого для проектирования цифровых схем, также разрабатывают отдельную библиотеку, которая содержит элементы ввода-вывода.

Маршрут разработки библиотеки стандартных элементов представлен на рис.1. Основными пунктами маршрута является создание электрической схемы и топологии. Так как в приложении к БМК нет возможности изменять параметры транзисторов, то основной из задач при разработке библиотеки становится создание оптимальной топологии элементов. Для этого необходимо добиваться использования минимального количества зашивочных слоев при формировании логических элементов из транзисторов БМК.

Отдельным этапом разработки библиотеки стандартных элементов является характеристика, которая подразумевает описание временных и мощностных параметров разработанных элементов. Основная идея заключается в SPICE симуляции электрических схем логических вентилей с различными значениями нагрузочных емкостей и параметрами входного сигнала и измерении соответствующей задержки переключения. Данная процедура проводится для всех "углов" технологии, то есть различных крайних значений параметров транзисторов, температуры, напряжения питания и т. д. В итоге, для каждого элемента формируется набор таблиц, содержащих задержки переключения с каждого входного контакта до выходного. Как правило, результирующие файлы представляются в формате .lib (Liberate).

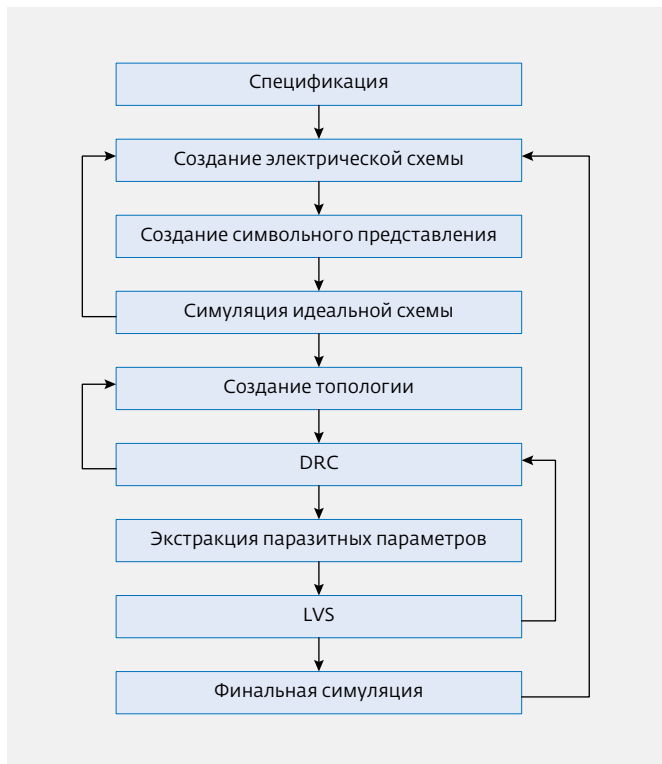


Рис.1. Маршрут разработки библиотеки стандартных элементов

из того, что все временные и мощностные параметры логических вентилях точно рассчитаны на этапе разработки библиотеки;

- универсальность разрабатываемой схемы. Так как в подавляющем большинстве случаев проектирование схемы ведется на уровне регистровых передач (RTL) и на последующих этапах маршрута производится логический синтез RTL кода, то дизайн не привязан к конкретной технологии или фабрике. Именно поэтому после отладки проекта на базе ПЛИС перевод его в БМК занимает минимум времени и средств.

Несмотря на повсеместное использование представленного подхода, он обладает некоторыми недостатками. Во-первых, так как набор стандартных элементов ограничен, то уменьшается гибкость проектирования, что, в свою очередь, может привести к уменьшению быстродействия и увеличению площади схемы по сравнению с ее аналогом, разработанным на транзисторном уровне. Во-вторых, из-за того что в БМК нет возможности изменять параметры транзисторов, библиотека стандартных элементов не может быть спроектирована с учетом оптимизации конкретного параметра, например, быстродействия или потребляемой мощности.

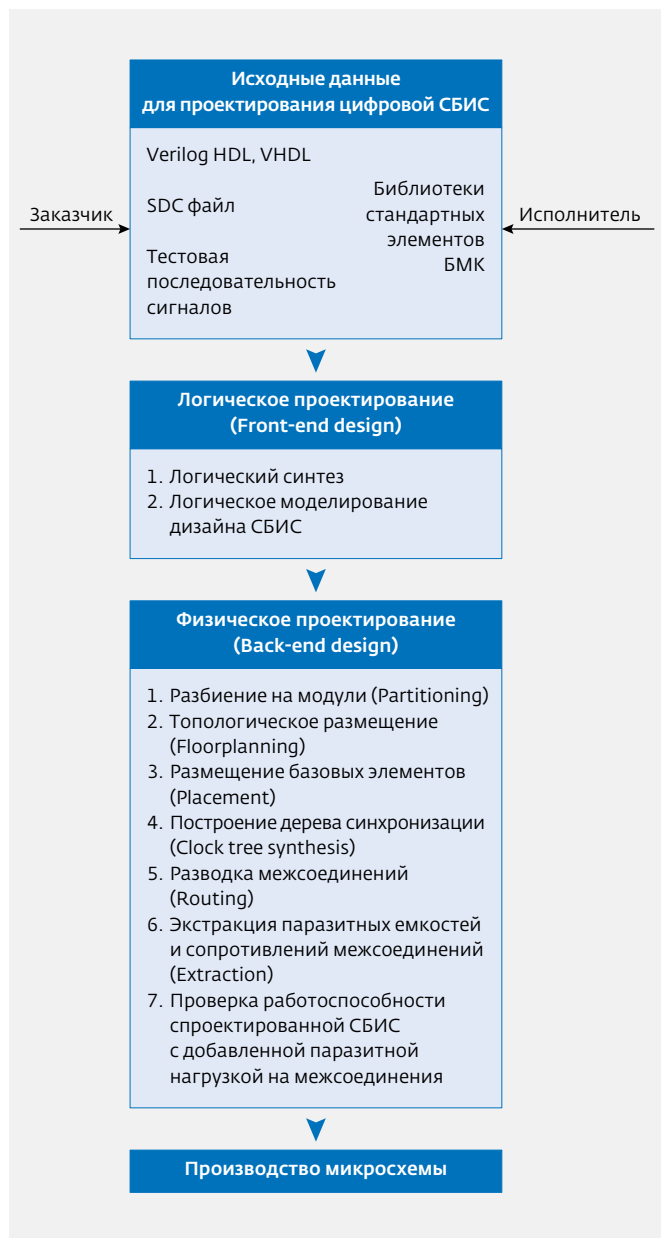


Рис.2. Маршрут разработки цифровых СБИС

МАРШРУТ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

В соответствии с использованием стандартных элементов, маршрут разработки цифровых схем [1] имеет следующий вид (рис.2). В общем виде процесс разработки СБИС состоит из двух частей,

а именно из логического проектирования (front-end design) и физического проектирования (back-end design).

Основным этапом логического проектирования является логический синтез. В общих чертах, синтез представляет собой преобразование проекта из RTL-кода в список соединений (netlist) в базе библиотеки стандартных элементов БМК. Для данного процесса необходим набор .lib файлов всех элементов библиотеки. Далее для моделирования схемы необходим список verilog моделей стандартных элементов, то есть описание их логических функций, входных и выходных контактов. На этапе синтеза топологии в дополнение к уже перечисленным файлам необходим набор файлов, описывающих физическую структуру [2] логических элементов в формате .lef. Стоит отметить, что в зависимости от используемого набора САПР, форматы представления данных о библиотечных элементах могут меняться. В рассмотренном случае представленные форматы соответствуют маршруту фирмы Cadence.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода проектирования цифрового БМК с использованием стандартных элементов позволило разрабатывать микросхемы, содержащие большое количество транзисторов для реализации произвольной логики и сложных функциональных блоков, таких как память, микропроцессоры, различные интерфейсы и др. Также это позволило оптимизировать процесс проектирования цифровых микросхем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нидеккер Л.Г., Эннс В.И.** Маршрут разработки цифровой СБИС на основе БМК // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Электрон. сб. ст. по матер. XXVIII студ. междунар. научн.-практ. конф. – Новосибирск: Изд. "СибАК", 2015. Н. 1 (27). [Электронный ресурс] URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/1\(27\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/1(27).pdf).
2. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов // М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011.

ТРИММИНГ ФОТОРЕЗИСТА КАК ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

► Т.Л.Бурякова¹, О.П.Гущин¹, Е.С.Горнев¹, А.В.Данила², А.Н.Поляков³

¹АО "НИИМЭ", ²ОАО "НИИТМ", ³ОАО "НИИМЭ и Микрон"

В работе исследован процесс усиления разрешения оптической литографии (ArF) с помощью тримминга фоторезиста с использованием плазмы, генерируемой в источнике трансформаторно связанной высокоплотной плазмы. Изучены основные технологические параметры, определяющие результаты тримминга. Сформированная по результатам тримминга фоторезистивная маска, включающая подслой BARC, далее переносилась в слой жесткой маски и поликремний. В результате была сформирована структура поликремниевого затвора с размерами до 50 нм и вертикальными стенками.

PHOTORESIST TRIMMING FOR OPTICAL LITHOGRAPHY RESOLUTION ENHANCEMENT

T.L.Buriakova¹, O.P.Gushin¹, E.S.Gornev¹, A.V.Danila², A.N.Polyakov³

¹JSC MERI, ²JSC RIPMM, ³JSC Micron

In this work the process of optical lithography ArF (193 nm) resolution enhancement using photoresist trimming was investigated. The photoresist patterns were etched in transformer coupled plasma etch system. It was investigated the basic technological parameters, which determine the results of photoresist trimming. Photoresist mask with underlying BARC, formed after trimming, was transferred to hard mask layer and polysilicon. As a result, the polysilicon gate stack with critical dimensions 50 nm and smooth vertical profile was formed.

ВВЕДЕНИЕ

В маршрутах КМОП СБИС с минимальными размерами 65–45 нм выполняется формирование топологической структуры с данными критическими размерами в транзисторном цикле FEOL (формирование структуры затвора транзисторного цикла) и первом слое металлизации цикла BEOL (формирование контактных окон локальной разводки) [1]. Воспроизведение критических размеров таких слоев требует наличия литографических сканеров с уровнем паспортного разрешения не менее 65–45 нм. Такие литографы стоят очень дорого, поэтому в технологии СБИС пытаются использовать различные методы усиления разрешения на критических слоях, такие как: фазовый сдвиг, оптическая коррекция эффектов близости (ОРС), техника

двойного экспонирования или n-кратного паттернинга, либо технологические приемы, такие как тримминг фоторезиста.

ТРИММИНГ ФОТОРЕЗИСТА

Этот прием заключается в контролируемом боковом "подрезании" плазмой рисунка резиста, полученного после литографии (оптической или электронно-лучевой), с использованием изотропного режима травления. В таком случае линия резиста травится с одинаковой скоростью в вертикальном и латеральном направлениях. Таким образом, данный прием позволяет "обогнуть" пределы разрешения имеющейся оптической фотолитографии. В частности, процесс тримминга может уменьшить ширину линии с критическими размерами

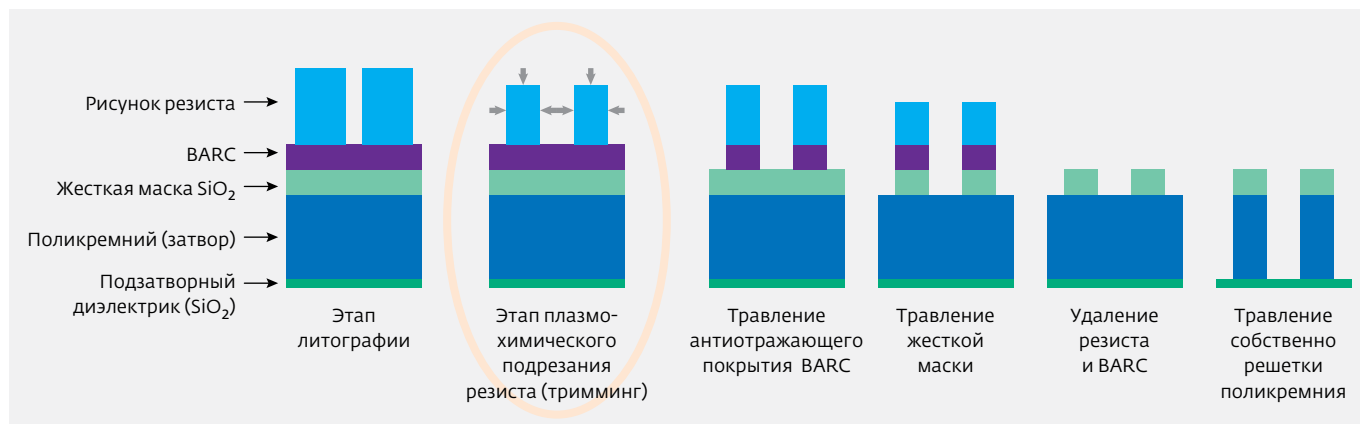


Рис.1. Этапы травления для реализации решетки затвора транзистора в суб 20-нм диапазоне

90 нм до 50 нм с минимальной потерей толщины резиста и с минимальным искажением результирующего профиля линии [3]. После такого контролируемого бокового травления полученные в резисте размеры могут быть затем перенесены в нижележащие технологические слои, как показано на рис.1.

Однако процесс тримминга не применим для миниатюризации за счет увеличения плотности упаковки элементов по пластине. В самом деле, уменьшение ширины линии сопровождается соответственным увеличением расстояния между ними, таким образом сохраняя шаг (pitch) неизменным. Именно поэтому процесс не применим для создания памяти, но главным образом адаптируется для создания быстродействующих логических схем [3].

В данном исследовании процесс тримминга был интегрирован с шагом травления нижележащего органического слоя BARC (bottom antireflective coating), который наносится под слой фоторезиста для улучшения профиля рисунка резиста во время литографического экспонирования. Не нарушая вакуум, травление поликремниевого затвора проводилось на месте с использованием жесткой маски SiO₂, сформированной через подрезанный резист/BARC. Конечная ширина затвора определяется, главным образом, величиной подрезанного резиста. В данном исследовании процесс тримминга проводился в химическом составе плазмы HBr/O₂/CHF₃, генерируемой в источнике с трансформаторно связанной высокоплотной плазмой (TCP). Кислородная плазма обеспечивает высокую скорость травления органического резиста и не затрагивает нижележащие технологические слои диоксида кремния и поликремния.

Проблемы интеграции процесса тримминга

Целью шага тримминга резистивной маски является боковое травление линий с минимальной потерей толщины резиста. Таким образом, очень важно разработать процесс, который позволяет независимо управлять скоростью вертикального и горизонтального травления.

Наилучшее достижимое отношение вертикальной-горизонтальной (В/Г) скоростей травления соответствует идеально изотропному травлению, когда вертикальные и горизонтальные скорости травления одинаковы (В/Г=1). Геометрия рисунка резиста такова, что горизонтальная поверхность рисунка резиста подвержена травлению больше, чем боковые стенки, вследствие чего вертикальная скорость травления будет превышать скорость бокового травления. Поэтому необходимо оптимизировать процесс тримминга таким образом, чтобы оставшейся толщины резиста хватило для последующего травления нижележащего активного слоя, в нашем случае это слой жесткой маски SiO₂. Этот аспект становится более критичным с каждым новым поколением литографии, так как толщина резиста уменьшается наряду с длиной волны излучения. Это толщина 400–500 нм для литографии 248 нм становится не более 400–300 для литографии 193 нм и рискует уменьшиться до 100 нм для создаваемой EUV литографии [2].

Другой эффект, который должен контролироваться и сводиться к минимуму в процессе тримминга – эффект микрозагрузки (microloading effect). Он заключается в разнице в скоростях травления между изолированными и плотноупакованными линиями и зависит от начального аспектного соотношения (высота/ширина) промежутков между линиями резиста. В самом деле, скорость бокового

травления зависит от потока реактивных частиц, прибывающих на боковую стенку рисунка резиста. Если фрагмент рисунка изолирован, то угол падения реактивных частиц будет большим по сравнению с углом падения в пределах структуры плотноупакованных линий. Как следствие, скорость травления и, главным образом боковая, будет выше на изолированных линиях, чем в решетке линий [3].

В общем случае, когда аспектное соотношение более 3:1, возникновение эффекта микрозагрузки весьма вероятно, в отличие от случаев, когда аспектное соотношение порядка 1:1. Однако, эффект микрозагрузки возможно уменьшить, используя специальные добавки в плазме, способствующие образованию полимерных пленок на боковых стенках изолированных линий более толстых, чем на боковых стенках плотноупакованных линий. Это приводит к замедлению скорости бокового травления преимущественно изолированных линий, позволяя контролировать и сводить к минимуму эффект микрозагрузки.

Время травления также должно приниматься во внимание при составлении рецепта тримминга. Продолжительность этого шага должна быть достаточно короткой для обеспечения приемлемой производительности, но достаточно длинной для обеспечения хорошего контроля полученного профиля линии. Например, контролировать тримминг в течение 10 с с точностью ± 1 с очень трудно, в то время как тримминг в течение 150 с может значительно снизить производительность данного процесса. Мы достигли контролируемой скорости травления 3-6 нм/с, что обеспечивает хороший баланс между высокой производительностью и возможностью точно контролировать время травления и профиль.

Одними из наиболее важных параметров, которые должны контролироваться и сводиться к минимуму в процессе тримминга являются шероховатость края и шероховатость ширины линии (LER – line edge roughness, LWR – line width roughness). С каждым новым поколением микроэлектроники влияние шероховатости края линии на производительность устройств становится все важнее. Обычно эти параметры контролируются непосредственно после разработки изделия, однако уровень шероховатости после каждого шага травления становится все более важным. Например, в процессах этапа FEOL (front – end of line) искаженный затвор может повлиять на профили легирования в сток-истоковых областях и, таким образом, изменить характеристики устройств. В процессах этапа BEOL (back end of line)

будет сложно получать конформное осаждение материалов, если линии в диэлектрическом слое не гладкие. Это может вызывать диффундирование меди, увеличение удельного сопротивления и электромиграции, что, в конечном счете, ухудшает производительность устройств на выходе [5].

Чтобы оптимизировать процесс тримминга, важно понимать механизмы процесса и детально исследовать необходимые режимы травления. Эффекты ключевых параметров процесса, таких как мощность ВЧ источника, напряжение смещения на подложке, давление в реакторе и соотношение газовых компонентов в процессе тримминга, были детально изучены ранее в работах [3], [4], [6]. Мы же ограничимся использованием полученных знаний и кратко перечислим важные выводы.

Параметры плазмы для контроля процесса тримминга

Известно, что применяемые в микроэлектронике резисты в основном состоят из соединений углерода, водорода и кислорода. Для разработки оптимального процесса тримминга необходимо создать наиболее подходящие условия плазмы, в частности, подобрать газы, которые имеют хорошую химическую реактивность с резистом и которые в такой плазме при травлении дают летучие соединения. Поскольку резисты – это углеродсодержащие полимеры, в процессе бокового травления логично использовать химический состав плазмы на основе кислорода, так как атомарный кислород является наиболее реактивной частицей по отношению к углеродным цепям, что приводит к деструктивному окислению углеродной цепи с образованием летучих продуктов, таких как H_2O , CO или CO_2 [7]. Однако нельзя использовать только кислород, так как он очень реактивен, следовательно, скорость бокового и вертикального травления будут слишком высокими и неконтролируемыми. Из-за высокой реактивности кислорода целесообразно добавление более инертного по отношению к фоторезисту реагента, такого как N_2 или Cl_2 с целью замедления процесса травления и, следовательно, лучшего контроля скоростей вертикального и бокового травления [3]. Из сказанного выше следует, что скорость тримминга напрямую зависит от концентрации кислорода в газовой смеси.

Процесс тримминга резиста протекает за счет нескольких механизмов: химического травления (управляемое концентрацией реактивных радикалов), ионно-стимулированного травления и физического распыления. Химическая компонента

сокращает ширину линии, сглаживает боковую стенку и уменьшает толщину резиста. Физическая компонента повышает анизотропию травления, уменьшает толщину резиста, но не влияет на ширину линии. Усиление мощности источника ведет к увеличению концентрации нейтральных, химически активных частиц и ионной плотности. Рост напряжения смещения ведет к увеличению кинетической энергии ионов, следовательно, усилению эффекта физического распыления. Именно поэтому в процессе тримминга предпочтительно работать с невысокими мощностями источника (примерно 500 Вт) и ограничивать ионную бомбардировку, чтобы избежать фасетирования рисунка резиста, а также, чтобы процесс был более селективным по отношению к нижележащему слою.

В высокоплотной плазме газовой смеси рост давления ведет к уменьшению энергии ионов из-за значительного увеличения ионных столкновений. В то же самое время нейтральный химический поток возрастает вместе с давлением. Поскольку процесс тримминга более зависим от потока радикалов, чем от энергии ионов, скорость тримминга (бокового травления) увеличивается при повышении давления.

Идеальный процесс тримминга достигается при контролируемом балансе между перечисленными параметрами для создания вертикальных гладких стенок рисунка резиста без больших потерь его толщины.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Высокоплотная плазма низкого давления, используемая для тримминга резиста, была генерирована в TCP реакторе Versys START (рис.2) в составе установки LAM Research 2300. Плазма возбуждается подачей ВЧ мощности на антенну, лежащую на кварцевом окне, от генератора мощностью 1500 Вт и с рабочей частотой 13,56 МГц. В качестве подложкодержателя используется стол с электростатическим прижимом, термостабилизируемый гелием. Гелий вводится под пластину с постоянным давлением 8 мТорр. Для управления энергией ионов на подложкодержатель подается ВЧ-мощность от второго генератора, идентичного генератору на верхнем электроде (1500 Вт и 13,56 МГц).

В этом исследовании использовался химический состав плазмы $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3$, травление было выполнено при температуре стола 60°C. Газы реагента были введены в реактор из центра камеры. Расходом газов и давлением в камере управляли независимо, регулируя удельный массовый расход.

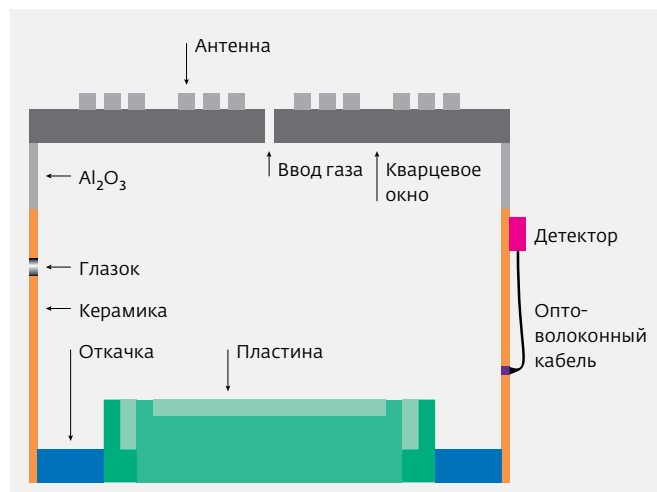


Рис.2. Схема реактора Versys 2300

Для экспериментальных работ использовались подложки 200 мм, маскированные химически усиленным резистом. Стекло затвора представлял собой структуру с нанесенными технологическими слоями в соответствии с табл.1 и рис.3.

Проекционная литография выполнялась на сканере модели ASML PAS 5500/1150C с длиной волны экспонирующего излучения 193 нм (ArF лазер) и фотошаблоном, разработанная топология которого была подвергнута коррекциям эффекта близости (OPC) и фазовому сдвигу (PSM), что позволило получить минимальный размер по фоторезистивной маске 90 нм. Рисунок фотошаблона представлял собой структуру из чередующихся линий (90 нм) и светлого промежутка (90 нм), то есть с регулярным шагом 180 нм. Любые линии резиста с интервалом, превышающим толщину линии более 5 раз, рассматриваются как изолированные линии, в противном случае – как плотноупакованные линии или решетка линий. После фотолитографии выполнялся процесс тримминга в химическом составе плазмы $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ TCP реактора для получения размеров порядка 50 нм. Через подрезанный фоторезист полученные размеры переносились в нижележащий слой (в нашем случае слой жесткой маски SiO_2) в том же самом реакторе без развакуумирования камеры.

Контроль линейных размеров CD (critical dimensions) осуществлялся в растровом электронном микроскопе (РЭМ) CD SEM Hitachi S9060A. Ускоряющее напряжение во время измерения критических размеров было 300 эВ, ток пучка – 10 пА. Воспроизводимость измерений произведена с точностью ± 5 нм. Поперечное изображение, полученное в РЭМ, использовалось для контроля профиля.

Таблица 1.

Слой	Тип	Толщина, А
Фоторезист	AR1682J-30	3000
BARC	AR19	820
Жесткая маска	SiO ₂ , TEOS	550
Затвор	Поликремний	1 500
Подзатворный диэлектрик	SiO ₂	12–20

Скорость тримминга была измерена путем деления разности ширины линии до и после тримминга. Эффект микрозагрузки определен как различие ширины изолированных и плотноупакованных линий после тримминга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе исследовалась и разрабатывалась технология усиления разрешения на критичных слоях маршрута КМОП СБИС с помощью контролируемого процесса тримминга с использованием промышленного оборудования для массового производства СБИС.

В первой части работы был исследован процесс тримминга фоторезистивной маски, сформированной по топологии стека затвора с CD=90 нм, с последующей реализацией стека поликремневого затвора с CD=50 нм под воздействием различных параметров плазмы. Был оптимизирован рецепт тримминга для получения вертикальных гладких стенок линий поликремниевого затвора. Линейный размер по исходной фоторезистивной маске соответствовал CD=90 нм после процесса фотолитографии.

Во второй части был исследован и оптимизирован процесс сквозного плазмохимического травления стека поликремниевого затвора с использованием контролируемого тримминга до CD=50 нм в едином замкнутом цикле травления.

Тримминг фоторезиста в отсутствии напряжения смещения на подложке

Для исследования процесса использовалась смесь газов $\text{HBr}/\text{O}_2 = 104/18 \text{ см}^3/\text{мин}$ с добавкой полимеризующего газа $\text{CHF}_3 = 20 \text{ см}^3/\text{мин}$. Использование этой добавки ведет к образованию полимерной пленки на боковых стенках рисунка резиста, обеспечивающей однородность профилей, что, в конечном счете, приводит к уменьшению эффекта микрозагрузки между изолированными и плотноупакованными



Рис.3. Структура макета для проведения эксперимента

линиями. Напряжение смещения на подложке отсутствовало ($V_{\text{bias}} = 0 \text{ В}$) для обеспечения однородности скорости травления в вертикальном и латеральном направлениях.

Таким образом, процесс тримминга был произведен при следующих условиях: $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3 = 104/18/20 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 0 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$.

Результаты тримминга фоторезистивной маски представлены на рис.4.

Результаты тримминга показывают наличие полимерных осадков, осажденных на боковой стенке и верхней части линии фоторезиста, поэтому получившийся трапециевидный профиль из слоя фоторезиста перенесется далее в слой жесткой маски SiO_2 (рис.5а) и, в конце концов, в слой поликремния (рис.5б), профиль которого не удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к структуре поликремниевого затвора.

Как упоминалось ранее, используемая в процессе тримминга газовая смесь содержит компоненту CHF_3 , образующую полимерную пленку на боковых стенках фоторезиста. Известно [8], что трапециевидный профиль травления с формой "рогов" в верхней части структуры получается при равномерной скорости осаждения полимерных осадков в отсутствие напряжения смещения на подложке. Действительно, в предыдущем эксперименте,

напряжение смещения на подложке отсутствовало. Таким образом, оптимизация процесса тримминга заключается в первую очередь в подаче напряжения смещения на подложку, то есть реализации анизотропного тримминга.

Тримминг фоторезиста с подачей напряжения смещения на подложке

Для дальнейшей оптимизации процесса тримминга с целью получения ровных и гладких стенок линий фоторезистивной маски (а значит, впоследствии, и линий поликремниевого затвора) были предложены и изучены различные дополнительные варианты.

1 вариант: введение дополнительного шага после тримминга, перед травлением нижележащего слоя жесткой маски, призванного удалить полимерный осадок, образовавшийся во время процесса тримминга фоторезиста. Это очень короткий шаг травления при высокой мощности источника и напряжении смещения $\text{HBr}/\text{O}_2 = 104/18 \text{ см}^3/\text{мин}$, $W_{\text{source}} = 600 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 200 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$, $t = 10 \text{ с}$. Плазменные условия процесса анизотропного тримминга: $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3 = 104/18/20 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 25 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$.

На рис.6 представлены результаты после введения дополнительного шага удаления полимерных осадков на поверхности фоторезиста.

Результаты введения дополнительного шага травления показывают значительное увеличение шероховатости края линии (LER), а также неконтролируемое уменьшение CD линии вплоть до значений порядка 24 нм в пределах плотноупакованных линий, однако обрушения линий не обнаружено. Вероятно, такой характер повреждения края линии связан с эффектом разрушения кромки топологического

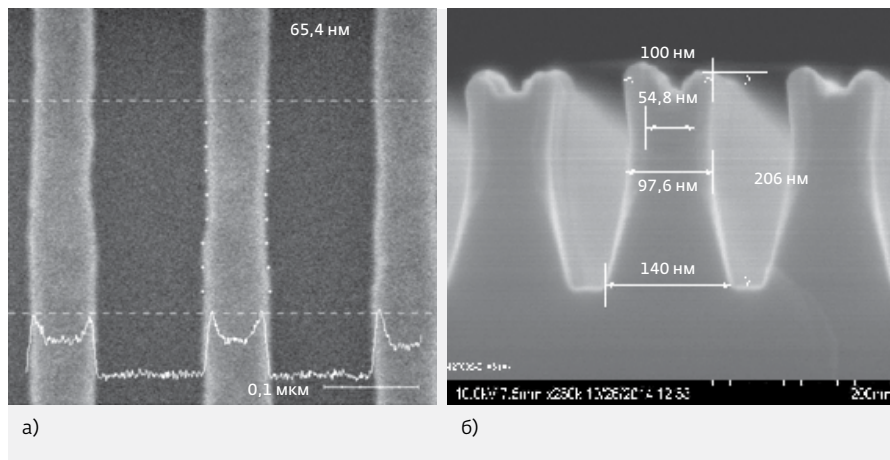


Рис.4. Фотографии РЭМ: а) вид сверху, б) фронтальный вид фоторезистивной маски с CD=65 нм после процесса тримминга, проведенного при следующих плазменных условиях: $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3 = 104/18/20 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 0 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$

рисунка фоторезистивной маски высокоэнергетичными ионами в процессе дополнительного шага травления после тримминга, что впоследствии увеличивает исходную шероховатость фоторезистивной маски перед травлением жесткой маски.

Данный вариант более не представляет интереса, поскольку полученные структуры не удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым

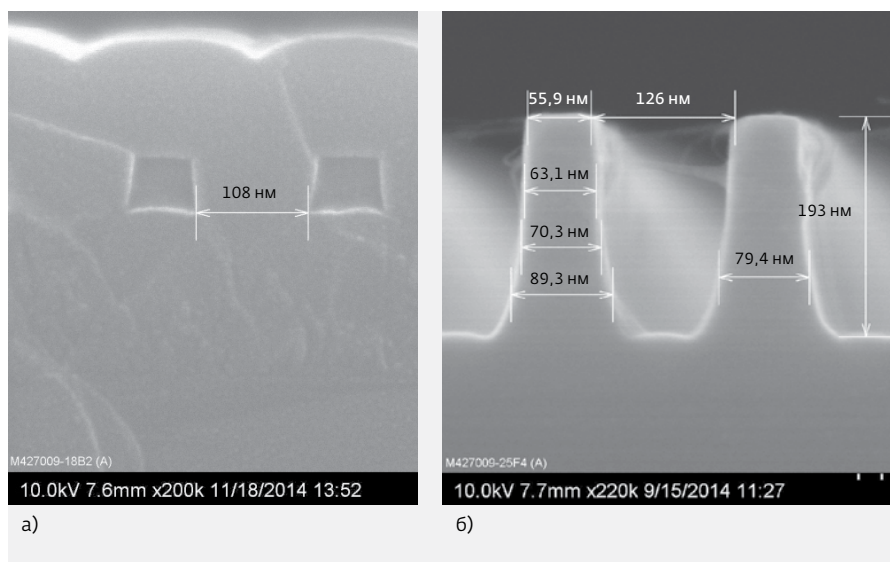


Рис.5. Фотографии РЭМ профилей травления с CD=65 нм в слое (а) жесткой маски SiO_2 ; (б) поликремния, перенесенные из слоя фоторезиста после тримминга, проведенного при следующих плазменных условиях: $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3 = 104/18/20 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 0 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$

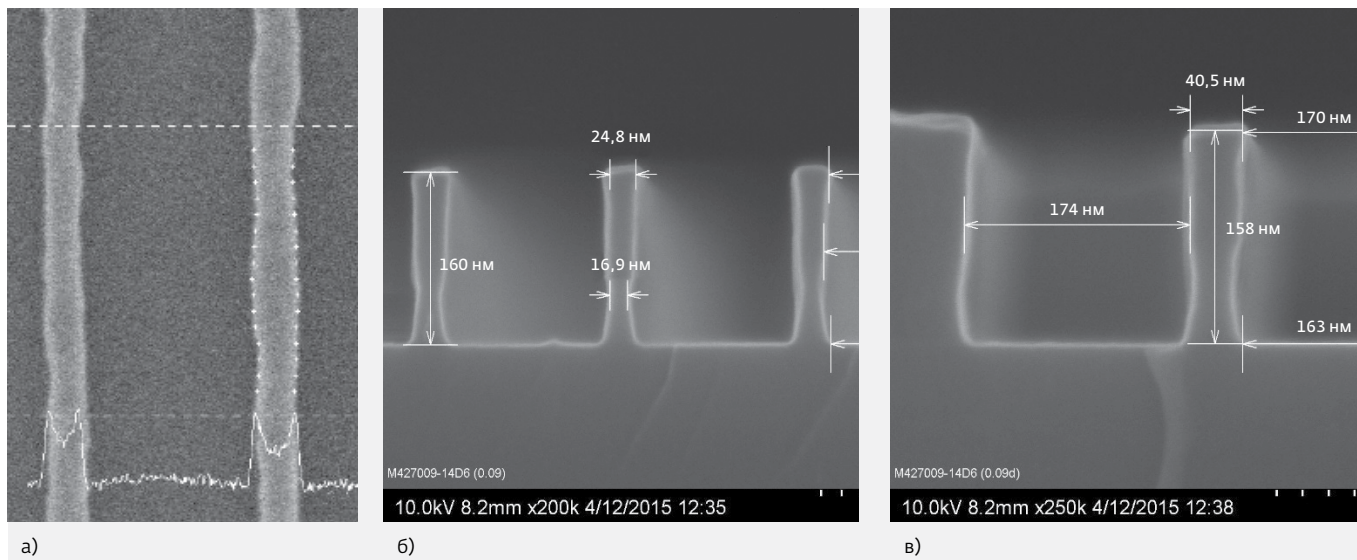


Рис.6. Фотографии РЭМ линий поликремниевого затвора: а) вид сверху, решетка линий; б) фронтальный вид, решетка линий; в) фронтальный вид, изолированная линия; после процесса тримминга с последующим дополнительным шагом удаления полимерных осадков

к структуре поликремниевого затвора с топологическими нормами 65 нм.

2 вариант: отказ от использования полимеризующего газа CHF_3 в процессе тримминга фоторезиста. Данная методика позволяет избежать образования полимерных осадков на вертикальных и горизонтальных стенках рисунка резиста из-за отсутствия полимеробразующей компоненты в газовой смеси.

Плазменные условия процесса тримминга: $\text{NBг}/\text{O}_2 = 104/18 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 25 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$.

На рис.7 представлены результаты тримминга без добавления полимеризующего газа CHF_3 .

Результаты, представленные на рис.7, показывают общее снижение шероховатости края линии после процесса травления поликремниевого затвора.

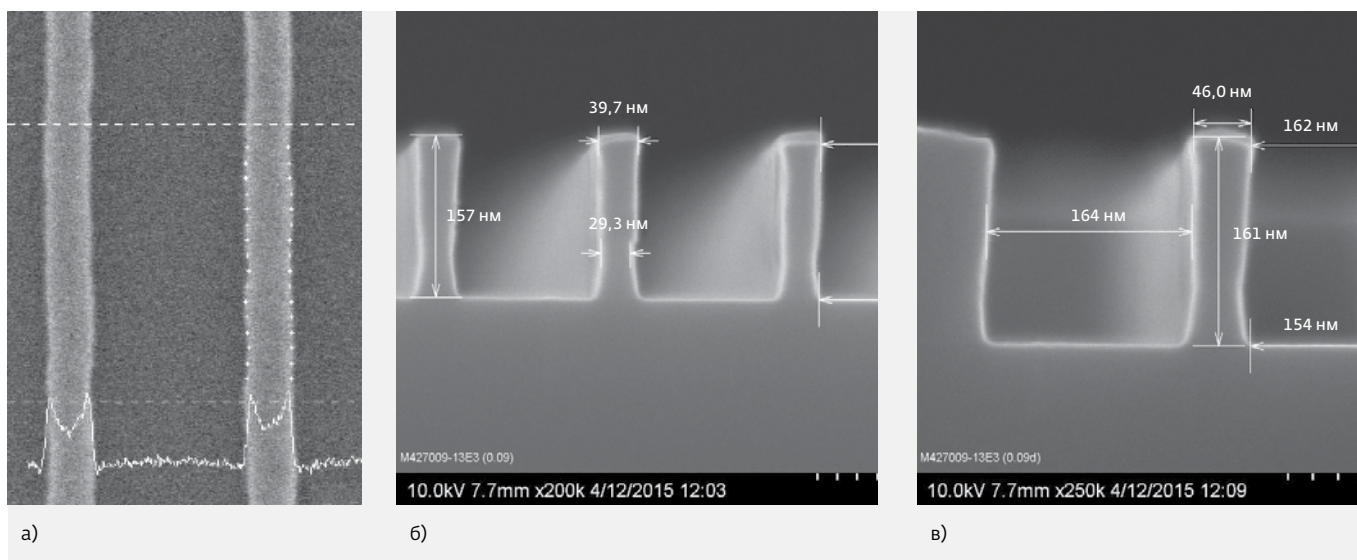


Рис.7. Фотографии РЭМ линий поликремниевого затвора: а) вид сверху, решетка линий, б) фронтальный вид, решетка линий, в) фронтальный вид, изолированная линия; после процесса тримминга фоторезиста при отсутствии полимеризующего газа CHF_3

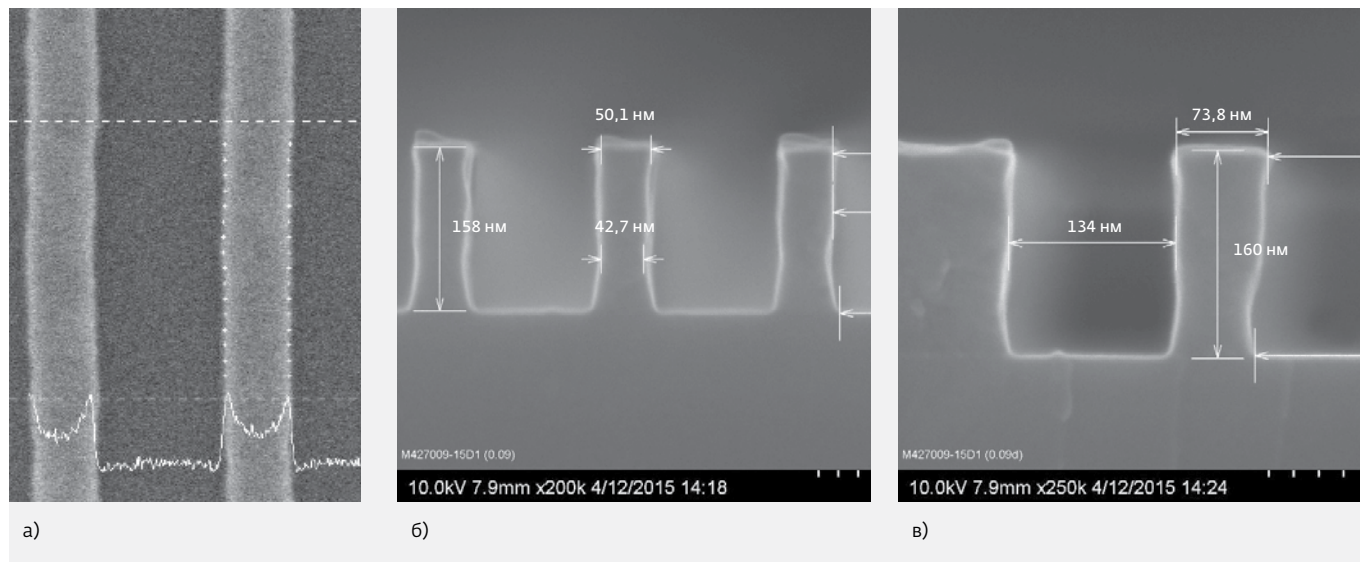


Рис.8. Фотографии РЭМ линий поликремниевого затвора: а) вид сверху, решетка линий, б) фронтальный вид, решетка линий, в) фронтальный вид, изолированная линия; после процесса тримминга фоторезиста при использовании полимеризующего газа CHF_3 и напряжения смещения на подложке 25 В

Однако было выявлено небольшое отклонение CD изолированных и плотноупакованных линий. Это еще раз подтверждает тот факт, что полимеризация имеет важное влияние на однородность травления плотноупакованных и изолированных структур. Как было сказано ранее [4], причиной такого влияния является эффект микрозагрузки, который более значителен в пределах структуры плотноупакованных линий.

Основываясь на полученных результатах первых двух вариантов, можно сделать вывод о необходимости использования полимеризующего газа CHF_3 и увеличении напряжения смещения на подложке от 0 до 25 В в процессе тримминга фоторезиста – без дополнительного шага удаления полимерных осадков после тримминга.

Данный вывод подтверждается экспериментальным путем. На рис.8 показаны результаты, полученные после тримминга в $\text{HBr}/\text{O}_2/\text{CHF}_3 = 104/18/20 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 18 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 500 \text{ Вт}$, $V_{\text{bias}} = 25 \text{ В}$, $P = 5 \text{ мТорр}$.

Результаты в части шероховатости края линии после тримминга могут быть улучшены за счет использования дополнительной

обработки в чистой плазме HBr . Как известно [5, 9], использование этой технологии приводит к увеличению стойкости резиста при последующих этапах травления за счет образования карбонизированного слоя на поверхности резиста, что, в конечном счете, уменьшает шероховатость края линии (LER) поликремниевого затвора до значений порядка 2 нм. Условия проведения обработки фоторезиста в плазме HBr после тримминга: $\text{HBr} = 100 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t = 60 \text{ с}$, $W_{\text{source}} = 1200 \text{ Вт}$, $P = 5 \text{ мТорр}$.

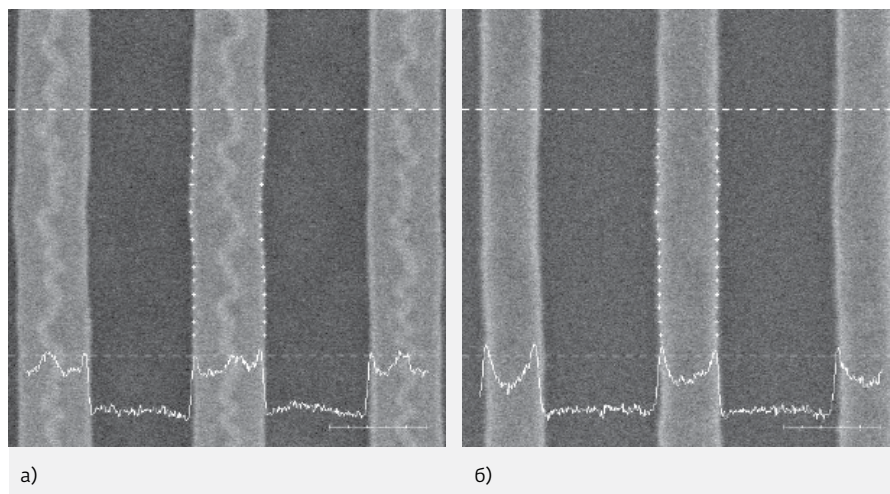


Рис.9. Фотографии РЭМ, вид сверху: а) жесткая маска SiO_2 после вскрытия; б) линия поликремниевого затвора, после проведения тримминга с последующей обработкой в плазме HBr

На основании полученных результатов (рис.9–10) можно сделать вывод о целесообразности использования дополнительного шага обработки фоторезиста в плазме HBr после тримминга, так как это способствует уменьшению шероховатости края линии фоторезистивной маски и далее поликремниевого затвора с 7 нм (в предыдущих экспериментах) до 2 нм. Таким образом, нам удалось оптимизировать процесс тримминга для получения вертикальных гладких стенок поликремниевого затвора, удовлетворяющего техническим требованиям.

Однако, вне зависимости от условий проведения тримминга, в нижней части структуры поликремниевого затвора наблюдался бочкообразный растрав на высоту порядка 1/3 толщины поликремния (рис.6б, в, рис.7б, в, рис.8б, в, рис.10). Было принято решение о корректировке процесса травления в шагах рецепта травления, связанных с травлением поликремниевого затвора. Этому изучению посвящена вторая часть данного исследования.

Как известно [10], процесс травления поликремния происходит в три этапа: первый этап – "прорыв" – заключается в удалении собственного оксида на поликремнии и начале травления непосредственно поликремния. На данном этапе травится примерно 2/3 толщины затвора. В рецепте данного шага в основном используется газ Cl_2 при относительно высоких значениях напряжения смещения на подложке. Второй этап, этап мягкой остановки травления на подзатворном окисле, при котором травится порядка 1/3 толщины затвора. Газовый состав состоит из смеси HBr/ Cl_2 с небольшим добавлением кислорода, разбавленным гелием. Моментально после детектирования конца травления, начинается третий этап травления, этап перетравливания. В этом шаге удаляются остаточные полимеры и поликремний, оставшиеся на пластине после травления.

Технологические условия проведения этапов травления поликремния приведены ниже:

- $Cl_2/HBr/CF_4/O_2=50/330/130/5$ см³/мин, $W_{source}=440$ Вт, $V_{bias}=125$ В, $P=10$ мТорр, $t=18$ с ~2/3 толщины затвора;

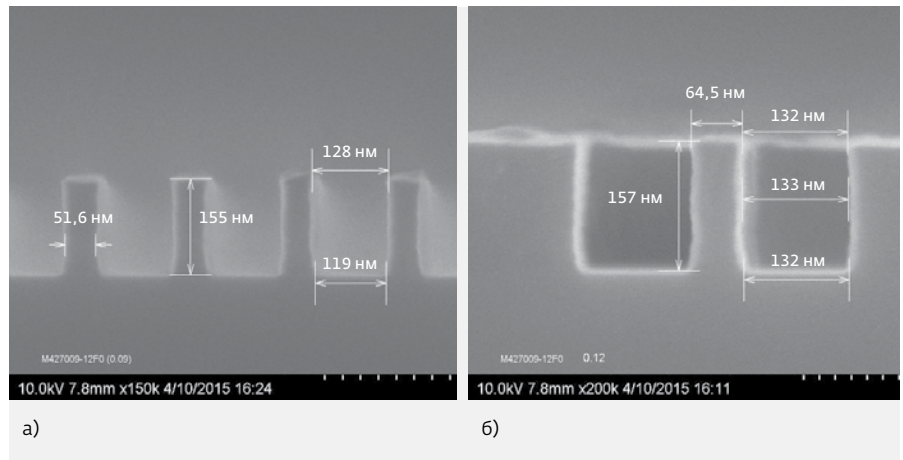


Рис.10. Фотографии РЭМ линий поликремниевого затвора, фронтальный вид: а) решетка линий; б) изолированная линия, после проведения тримминга с последующей обработкой в плазме HBr

- $Cl_2/HBr/He/O_2=15/300/100/6$ см³/мин, $W_{source}=400$ Вт, $V_{bias}=140$ В, $P=20$ мТорр, $t=20$ с ~ 1/3 толщины затвора;
- $HBr/He/O_2=175/325/5$ см³/мин, $W_{source}=640$ Вт, $V_{bias}=220$ В, $P=80$ мТорр, $t=20$ с.

Очевидно, что в нашем случае проблема изотропного растрыва на высоту 1/3 толщины затвора возникла на втором этапе травления поликремниевого затвора. Объяснение этому эффекту следующее: из-за достаточно большого аспектного соотношения структуры поликремниевого затвора и относительно невысокого напряжения смещения на подложке в рецепте второго шага травления, на дне структуры будет превалировать химическое травление, из-за недостатка энергии ионов, ответственных за физическое травление материала. Таким образом, представляется логичным для устранения этой проблемы увеличить напряжение смещения на подложке, либо уменьшить давление в камере. На рис.11 представлены результаты оптимизации этого шага травления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении данной работы был исследован и разработан процесс усиления разрешения по фоторезистивной маске от 90 нм до 50 нм за счет контролируемого бокового подрезания фоторезиста (тримминг). Проведено исследование технологических факторов, определяющих боковое травление, изучены параметры процесса и подобран оптимальный состав плазмы и ее условия: $HBr/O_2/CHF_3=104/18/20$ см³/мин, $t=18$ с, $W_{source}=500$ Вт, $V_{bias}=25$ В, $P=5$ мТорр с использованием

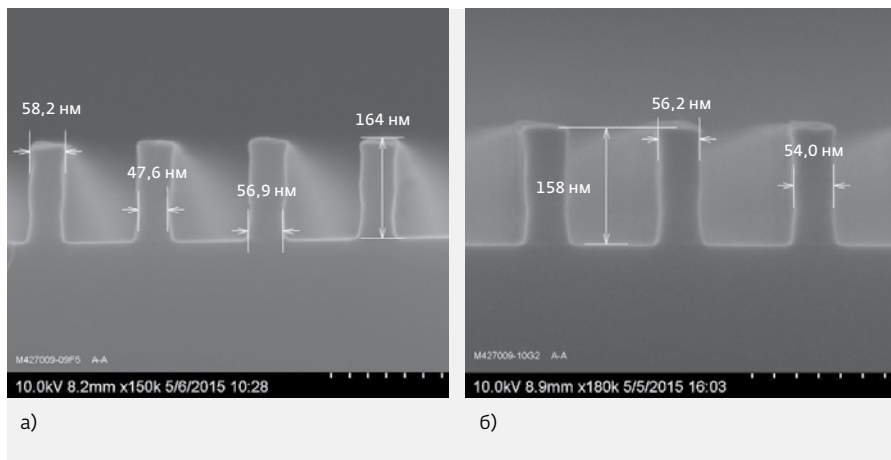


Рис. 11. Фотографии РЭМ, фронтальный вид решетки поликремниевых затворов (а) при уменьшении давления с 20 до 10 мТорр (б) при увеличении напряжения смещения на подложке с 140 до 200 В, CD=50 нм

дополнительного шага обработки пластины в плазме HBr после тримминга $\text{HBr}=100 \text{ см}^3/\text{мин}$, $t=60 \text{ с}$, $W_{\text{source}}=1200 \text{ Вт}$, $P=5 \text{ мТорр}$.

На основе анализа экспериментальных данных был оптимизирован процесс травления поликремниевого затвора и в результате сформирован набор плотно расположенных линий структуры затворов с $\text{CD}=50 \text{ нм}$ с вертикальным профилем травления, отвечающим требованиям маршрута КМОП СБИС с $h_p=65 \text{ нм}$.

Процесс разработан на промышленном оборудовании производства 200 АО "НИИМЭ и Микрон", аттестованном под технологию $h_p=90 \text{ нм}$ с использованием серийных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. Ч. 2. 536 с.
2. **Wei Y., Brainard R.L.** Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography. SPIE press. 2009. 307 p.

3. **Pargon E.** Analyse des mécanismes mis en jeu lors de l'élaboration par gravure plasma de structures de dimensions décananométriques: Application au transistor CMOS ultime. These. L'universite Joseph Fourier de Grenoble. 2004. P. 111–122.
4. **Ramalingam S., Lee Ch. and Vahedi V.** Photoresist Trimming: Etch Solutions to CD Uniformity and Tuning // Semiconductor International. 2002. V. 25. No. 10. P. 63–68.
5. **Mahorowala A.P., Chen K.-J. et al.** Line edge roughness reduction by plasma curing photoresists. Proc. SPIE 5753, Advances in Resist Technology and Processing XXII, 380 (September 14, 2005).
6. **Sin Ch.-Yu. and Chen B.-H., Loh W.L., Yu J., Yelehanka P., See A. Chan L.** Resist trimming in high-density CF_4/O_2 plasmas for sub-0.1 mkm device fabrication // J. Vac. Sci. Technol. 2002. V. 20. P. 1974–1981.
7. **Моро У.** Микролитография. Принципы, методы, материалы. Ч. 2. – М.: Мир, 1990. 632 с.
8. **Doolittle A.** Etching Techniques. Georgia Tech. ECE 6450 (<http://users.ece.gatech.edu/~alan/ECE6450/Lectures/ECE6450L11-Etching%20especially%20Plasma%20Etching.pdf>).
9. **Bazin A., May M., Pargon E., Mortini B., Joubert O.** Study of 193nm resist degradation under various etch chemistries // Proc. SPIE 6519, Advances in Resist Materials and Processing Technology XXIV, 2007. 65192N P. 1–9.
10. **Vincent M.** Donnelly and Avinoam Kornblit. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow // J. Vac. Sci. Technol. A, 2013. Vol. 31, No. 5, p. 050825–31.

ПРОБЛЕМА ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СПЕЙСЕРА

► Г.Я.Красников^{1,2}, И.В.Кирюшина¹, А.А.Егоров¹, С.О.Ранчин¹, Е.С.Горнев²
¹ОАО "НИИМЭ и Микрон", ²АО "НИИМЭ"

Переосаждение кобальта во время удаления непрореагировавших остатков кобальта при формировании спейсера можно предупредить, если используется специально подобранное соотношение компонентов в перекисно-аммиачном растворе (ПАР) или применяются дополнительные обработки, такие как серно-перекисный раствор.

COBALT REDEPOSITION ISSUE DURING SPACER FORMATION

G.Y.Krasnikov^{1,2}, I.V.Kiryushina¹, A.A.Egorov¹, S.O.Ranchin¹, E.S.Gornev²
¹JSC Mikron, ²JSC MERI

Cobalt redeposition during un-reacted cobalt removing for spacer formation process is prevented if SCI special mixture ratio or using additional treatments, for example, sulphuric/peroxide mixture (SPM).

ВВЕДЕНИЕ

Использование силицидов – соединений кремния с переходными металлами – в технологии создания интегральных схем преследует следующие цели:

- повышение проводимости поликремния, выступающего в качестве связующего элемента для соединения затворов разных транзисторов;
- снижение сопротивления контактов к истокам и стокам транзисторов;
- получение низкого сопротивления шины для соединения динамического оперативного запоминающего устройства (ДОЗУ) с матричным транзистором.

Изучение свойств силицидов, используемых в микроэлектронике, длится более тридцати лет (табл.1).

Первая структура, использующая технику самосовмещения при формировании силицидных слоев, была предложена в 1981 году для уменьшения сопротивления истока/стока, а метод ее изготовления был впервые назван как *salicide – Self-Aligned Silicide* (процесс салицидирования).

Метод самосовмещения при использовании силицидов в дальнейшем получил очень широкое распространение. Это связано со следующими преимуществами процесса: силициды образуются только

в областях затвора и истока/стока и не образуются в областях спейсера и изоляции.

На рис.1 показана структура, полученная компанией STMicroelectronics [2] по технологии

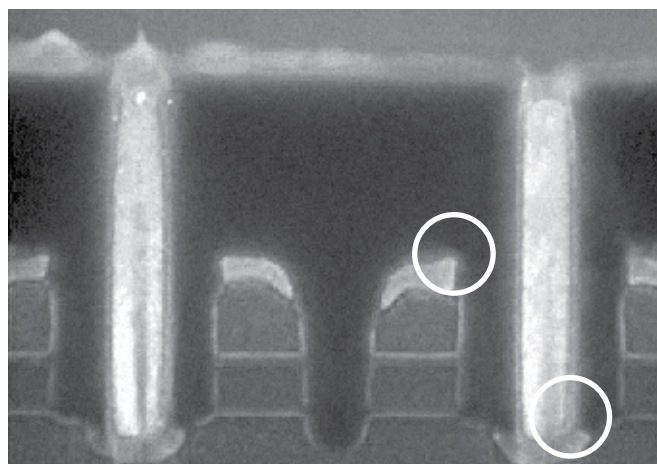


Рис. 1. Фотография, полученная с помощью электронного микроскопа, демонстрирующая использование метода салицидирования кобальтом при формировании НЕ-ИЛИ элемента по технологии с проектными нормами 65 нм (стрелками показан силицид кобальта)

с проектными нормами 65 нм с использованием процесса силицирования кобальта при формировании логического элемента НЕ-ИЛИ.

Суть обсуждаемой в данной работе проблемы заключается в том, что при селективном удалении непрореагировавших остатков кобальта возможно переосаждение кобальта, что приводит к повышенной дефектности на данной операции и к снижению коэффициента выхода годных в целом на изделии.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы стало изучение условий, приводящих к повторному осаждению кобальта при удалении непрореагировавших остатков кобальта в процессе

силицирования. В связи с тем, что при переносе технологии с одной технологической линии на другую всегда имеются различия в оборудовании, инфраструктуре, в свойствах подаваемых энергоносителей существует вероятность попадания передаваемого стабильного процесса на границу процессного окна в новых условиях. При этом приемосдаточные испытания оборудования проводятся стандартными способами, не учитывающими всего спектра изменений, которые существенным образом влияют на процесс.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

Таблица 1. Величины удельных сопротивлений различных силицидов [1]

Силицид	Метод получения	Температура отжига (°C)	Измеренное удельное сопротивление (мкОм · см)	Опубликованные данные по удельным сопротивлениям (мкОм · см)
TiSi ₂	Металл на поликремнии	900	13–16	16,9+0,5
	Распыление сплава	900	25	
ZrSi ₂	Металл на поликремнии	900	35–40	75,8+3,1
HfSi ₂	Металл на поликремнии	900	45–50	
VSi ₂	Металл на поликремнии	900	50–55	66,5+2,5
NbSi ₂	Металл на поликремнии	900	50	50,4+2,3
TaSi ₂	Металл на поликремнии	1000	35–45	46,1+1,3
	Распыление сплава	1000	50–55	
CrSi ₂	Металл на поликремнии	700	~600	914+74,5
MoSi ₂	Распыление сплава	1000	~100	21,6+0,9
WSi ₂	Распыление сплава	1000	~70	12,5+0,2
FeSi ₂	Металл на поликремнии	700	>1000	(27,4+2,2) · 10 ⁴
CoSi ₂	Металл на поликремнии	900	18–20	68,5+6
	Распыление сплава	900	25	
NiSi ₂	Металл на поликремнии	900	~50	118+21
	Распыление сплава	900	50–60	
PtSi	Металл на поликремнии	600–800	28–35	
	Распыление сплава			
Pd ₂ Si	Металл на поликремнии	400	30–35	

Примечание: Выделены материалы, используемые в микроэлектронике в настоящее время.

- изучены условия протекания процесса селективного удаления кобальта на границе процессного окна;
- выявлена зависимость количества обрабатываемых в одной загрузке пластин и возможность повторного осаждения кобальта при проведении процесса на границе процессного окна;
- определены возможные пути смещения процесса селективного удаления кобальта с границы вглубь процессного окна для предупреждения повторного осаждения кобальта;
- разработаны рекомендации по введению дополнительных тестов при переносе технологии для определения состояния процесса селективного удаления кобальта и его корректировке на этапе отработки рецепта.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе исследовались следующие режимы удаления непрореагировавших остатков кобальта:

- трехстадийный процесс последовательных обработок в соляно-перекисном растворе (СПР) с объемным соотношением компонентов (1:1:10 об.ч.) / перекисно-аммиачный раствор (ПАР) 2:1:12 об.ч. / СПР (1:1:10 об.ч.);
- трехстадийный процесс последовательных обработок в СПР (1:1:10 об.ч.) / ПАР (1,8:1:12 об.ч.) / СПР (1:1:10 об.ч.);
- четырехстадийный процесс последовательности обработок в серно-перекисном растворе (Каро) / ПАР / Каро / ПАР;
- двухстадийный процесс Каро / ПАР.

В основе всех обработок лежит следующая функциональная последовательность:

- удаление защитного слоя нитрида титана;
- удаление остатков кобальта;
- очистка от ионов металлических примесей.

Работа велась на кремниевых пластинах диаметром 200 мм, подготовленных в соответствии со следующим маршрутом:

- очистка HF-last перед осаждением кобальта;
- осаждение кобальта (без распыления верхнего слоя пластины / 10 нм Co / 10 нм TiN);
- формирование салицида (RTP 530°C / 30 с);
- разделение для селективного удаления кобальта: процессы, основанные на RCA-обработках (трехстадийные), и процессы, основанные на АПР-Каро обработках (двухстадийные и четырехстадийные).

Селективное удаление кобальта проводилось на установке спреевой обработки с групповой загрузкой пластин ZETA фирмы TEL, специализированной для селективного удаления кобальта (опция CoBRA). Селективное травление непрореагировавших остатков кобальта осуществлялось двумя способами: обработкой в соляно-перекисном растворе (СПР) и в серно-перекисном растворе (Каро). При использовании СПР защитный слой (TiN) и Co удаляли СПР с соотношением компонентов HCl: H₂O₂: H₂O=1:1:10 (об.ч.), остатки кобальта со спейсеров удаляли ПАР 2:1:12 об.ч., финальная очистка проводилась в СПР (1:1:10 об.ч.). При втором способе травления удаление защитного слоя и кобальта осуществлялось в серно-перекисном

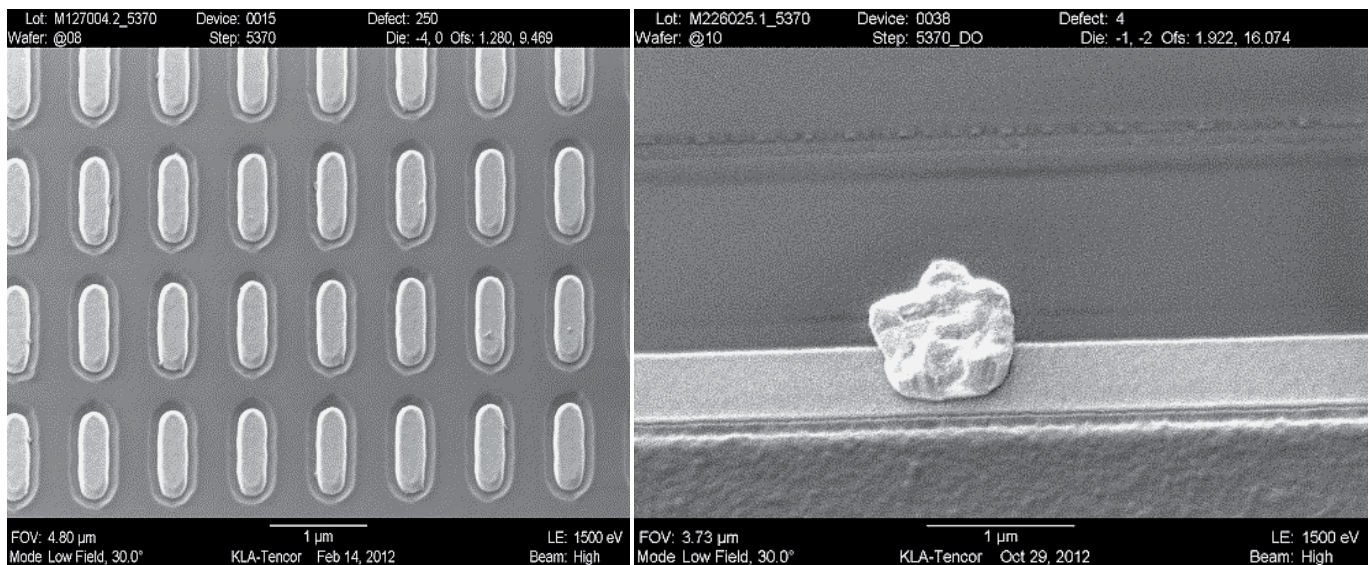


Рис.2. Переосажденные частицы кобальта: а) поверхностные дефекты, б) дефект Co_xO_y

растворе, удаление остатков кобальта со спейсера и финальная очистка осуществлялась в ПАР.

Контроль дефектности проводился на установке контроля дефектности в светлом поле 2139 фирмы KLA-Tencor методом лазерного сканирования с использованием видимого диапазона спектра излучения для пластин со сформированным рисунком для выявления плотности и внешнего вида дефектов, а также мест преимущественного расположения дефектов типа Co_xO_y .

Координаты выявленных дефектов определялись на установке SPI TBI фирмы KLA-Tencor при регистрации интенсивности лазерного излучения, рассеянного дефектом на поверхности пластины в каналах с "широкой" (DW) и "узкой" (DN) апертурой при нормальном или наклонном падении луча лазера.

Элементный состав дефектов, находящихся в выявленных координатах, определялся на просмотром

микроскопе, обеспечивающем режимы оптического и растрового электронных микроскопов, модели eV300 фирмы KLA-Tencor при использовании функции рентгеновского излучения.

Измерение удельного сопротивления салямицированных резисторов проводилось на параметрическом тестере модели S680 фирмы Keithley Instruments:

- трехстадийный процесс последовательных обработок в СПР (1:1:10 об.ч.) / ПАР (2:1:12° об.ч.) / СПР (1:1:10 об.ч.) проводился при температуре 90°C в течение 120 с для первой обработки в СПР и при комнатной температуре в течение 60 с для второй обработки в СПР. Обработка в ПАР осуществлялась при 85°C в течение 360 с;
- трехстадийный процесс последовательных обработок в СПР (1:1:10 об.ч.) / ПАР (1,8:1:12 об.ч.) / СПР (1:1:10 об.ч.) проводился при температуре 9°C в течение 185 с для первой обработки в СПР

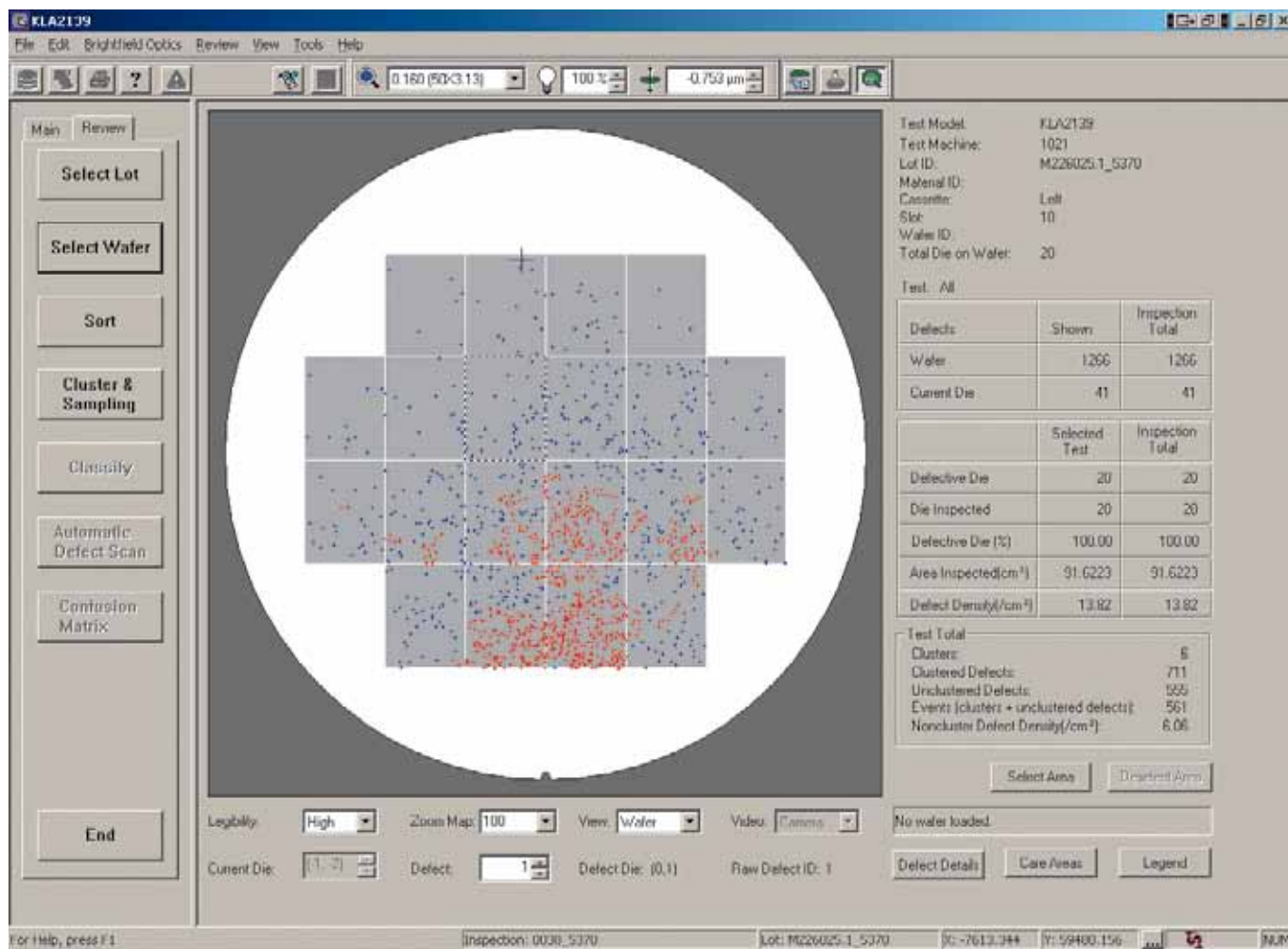


Рис.3. Характерное расположение дефектов по пластине

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. При селективном травлении на основе ПАР-СПР

В ходе эксперимента было получено, что соотношение компонентов ПАР (2:1:12 об.ч.) при обработке неполных партий способствует повторному осаждению кобальта в виде поверхностных дефектов (рис.2).

По пластине расположение дефектов связано с расположением относительно пластины источника подачи химреактивов (рис.3).

С помощью рентгенометрии удалось определить элементный состав дефектов (рис.4).

На сопротивление салицидированных резисторов данный тип дефектов не влияет, что отражено на рис.5, где стрелками показаны партии, имеющие дефекты Co_xO_y . Из рисунка видно, что величина удельного сопротивления салицидированных резисторов для этих партий не выходит за пределы допуска.

Анализ состояния процесса селективного удаления кобальта проводился с помощью диаграммы Пурбэ (зависимость потенциал-рН), представленной на рис.6.

Анализ показал, что соотношение компонентов в ПАР (2:1:12) лежит на границе процессного окна и при незначительных изменениях в проведении процесса (например, обработка неполных партий) может привести к осаждению дефектов Co_xO_y . Из проведенных экспериментов следует, что соотношение компонентов (1,8:1:10) в ПАР не приводит

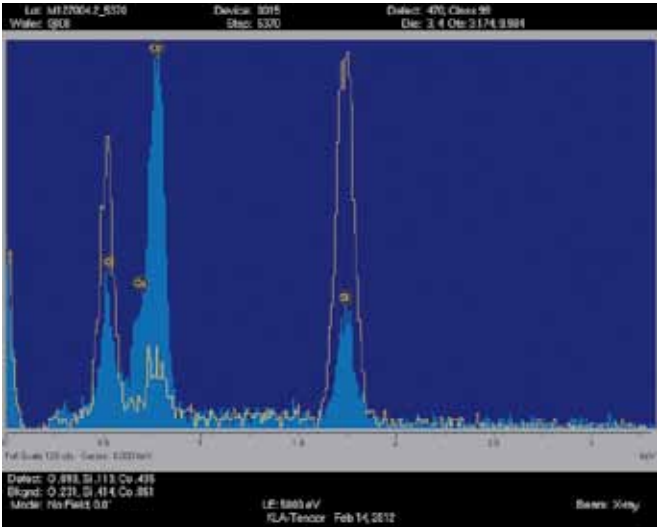


Рис.4. Дефект Co_xO_y

и при комнатной температуре в течение 90 с для второй обработки в СПР. Обработка в ПАР происходила при 85°C в течение 370 с;

- четырехстадийный процесс последовательности обработок в Каро / ПАР / Каро / ПАР проводился при температуре 95°C в течение 670 с для первой обработки в Каро и в течение 450 с для второй обработки в Каро. Обработка в АПР проводилась при 30°C в течение 195 с как первый, так и второй раз;
- двухстадийный процесс Каро / ПАР проводился при температуре 95°C в течение 300 с. Обработка в АПР проводилась при 95°C в течение 210 с.

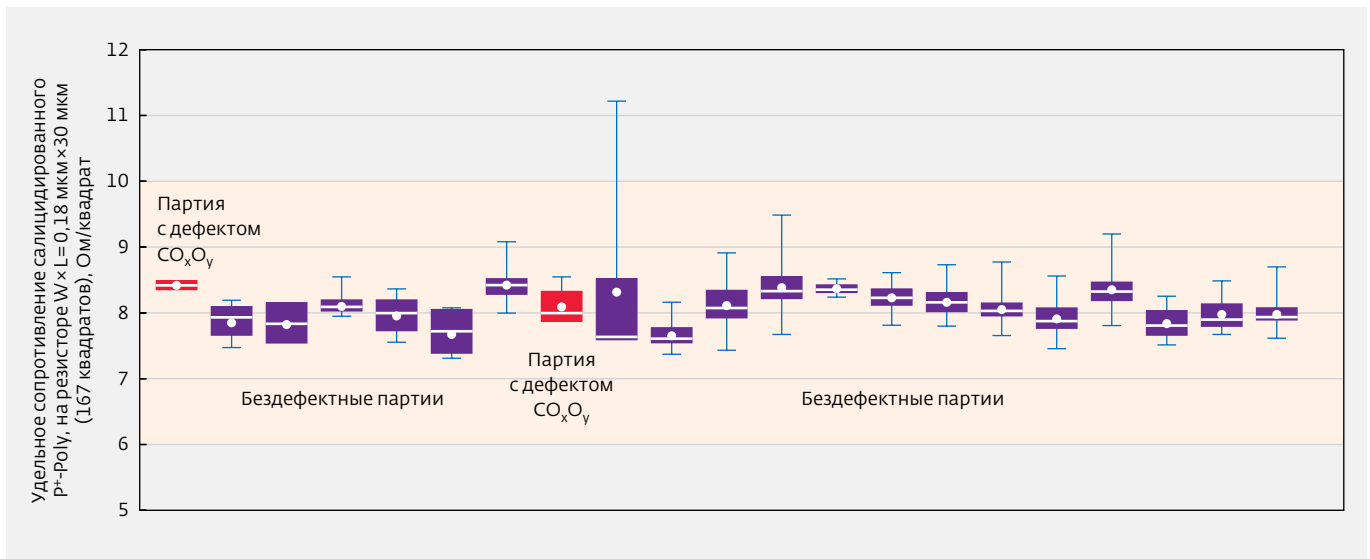


Рис.5. Результаты измерения сопротивления салицидированных резисторов

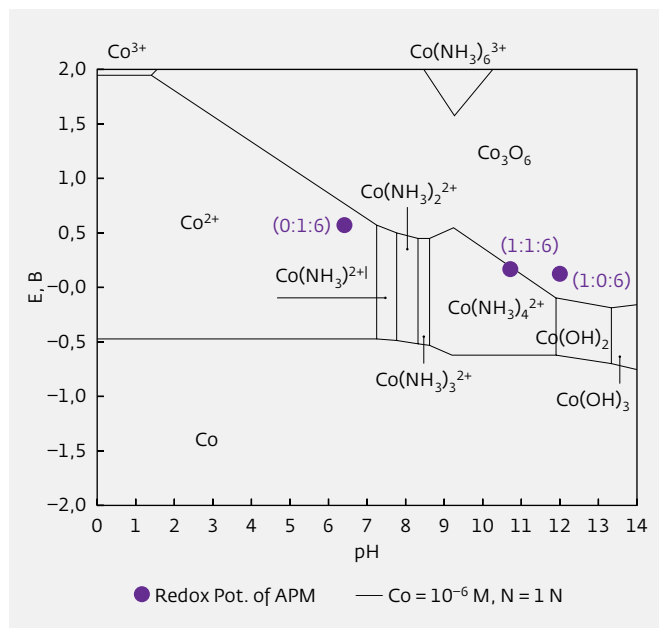


Рис.6. Диаграмма Пурбе для системы Co-NH₃-H₂O, разработанная С.Рагхаваном (Университет Аризоны), где Redox Pot. of APM – окислительно-восстановительный потенциал ПАР, при этом концентрация Co = 10⁻⁶ М, концентрация N = 1 М, pH – показатель концентрации водородных ионов, E (volts) – потенциал (вольты)

к образованию дефектов Co_xO_y вне зависимости от количества обрабатываемых пластин.

2. При селективном травлении на основе ПАР-Каро

Анализ результатов основанного на селективном ПАР-Каро-травлении непрореагировавших остатков кобальта показал отсутствие переосаждения кобальта, а также значительное снижение количества остатков кобальта на нитридном спейсере. Преимуществом данного вида обработки является низкая дефектность процесса и высокий выход годных за счет исключения проблем с открытыми контактами.

Недостатком использования ПАР-Каро-процессов является то, что высокая температура ПАР является причиной подтравы CoSi, а при низкой температуре ПАР плохо удаляются остатки серы после Каро.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ВЫВОДЫ

Некорректное соотношение компонентов в ПАР может приводить к образованию преципитатов Co как при травлении в СПР-ПАР, так и при травлении в ПАР-Каро.

Показано, что использование обработок ПАР-СПР с соотношением компонентов ПАР (1,8 : 1 : 12 объемные части) не приводит к повторному осаждению кобальта и требует меньших затрат при проведении процесса по сравнению с обработками СПР-Каро.

Исследовано влияние количества обрабатываемых пластин в процессе селективного удаления непрореагировавших остатков кобальта на способность повторного осаждения кобальта. Были исследованы процессы, находящиеся на границе процессного окна и процессы, находящиеся в середине процессного окна. Полученные результаты указывают на то, что обработка неполных партий является индикатором нахождения процесса относительно границ процессного окна. Такой показатель является достаточным для пересмотра объемного соотношения компонентов в ПАР в соответствии с диаграммой Пурбе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Murarka S.P.** Refractory Silicides for Integrated Circuits // Journal of Vacuum Science and Technology, 17, Issue 4, 775 (1980).
2. **Servalli G., Brazzelli D., Camerlenghi E., Capetti G., Costantini S., Cupeta C., DeSimone D., Ghetti A., Ghilardi T., Gulli P., Mariani M., Pavan A., Somaschini R.** A 65 nm Flash Technology with 0.042 μm² Cell Size for High Performance Multilevel Application // IEEE IEDM Tech. Dig. Proceedings, 2005, p. 869.

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ ЯЧЕЙКИ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

► Г.Я.Красников, Н.А.Зайцев, В.П.Бокарев, Ю.И.Плотников
АО "НИИМЭ"

На основе анализа диполь-дипольного взаимодействия в работе рассмотрена взаимосвязь стехиометрии, структуры и фазового состава сегнетоэлектрической пленки с ее электрофизическими свойствами и электрическими параметрами приборов на ее основе. Показано, что для качественной оценки электрических параметров приборов, изготовленных на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС), состав которых смещен в правую или левую сторону от морфотропной области, возможно использование аналитических зависимостей, определенных в данной работе.

PHYSICAL-TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF FERROELECTRIC FILMS FOR CELL STORAGE DEVICES.

G.Ya.Krasnikov, N.A.Zaytsev, V.P.Bokarev, Yu.I.Plotnikov

JCS MERI

Based on the analysis of the dipole-dipole interaction in the article the relationship between stoichiometry, structure, phase composition of ferroelectric films on its electrical properties and the electrical parameters of the devices based on it is considered. It is shown that for quality estimation of the electrical parameters of the devices made on the basis of PZT, the composition of which is shifted to the right or left side from the morphotropic region, use of the analytical dependences defined in this article is possible.

Известно, что поляризация сегнетоэлектрика в электрическом поле носит гистерезисный характер, то есть график зависимости поляризации от величины поля имеет петлеобразный вид, представленный на рис.1 [1]. Используя зависимость величины поляризации от направления изменения поля, возможно создать запоминающую ячейку, в которой, например, "1" задается значением остаточной поляризации $-P_r$ при возрастании поля (на возрастающей ветви петли гистерезиса), а "0" - значением $+P_r$ ($U=0$) при уменьшении поля (на ниспадающей ветви). По энергетическому значению величины "1" и "0" существенно

разнесены, что позволяет произвести их однозначную идентификацию.

В многодоменном кристалле при U_k половина диполей ориентирована вдоль поля, а другая - против, при этом суммарная поляризация равна нулю.

Если после снятия электрического поля диполи не изменили своего направления, то значение остаточной поляризации (P_r) и значения поляризации насыщения (P_H) будут равны.

В связи с расширением номенклатуры изделий на основе сегнетоэлектрических материалов, а также с предъявлением к ним повышенных требований к технико-эксплуатационным

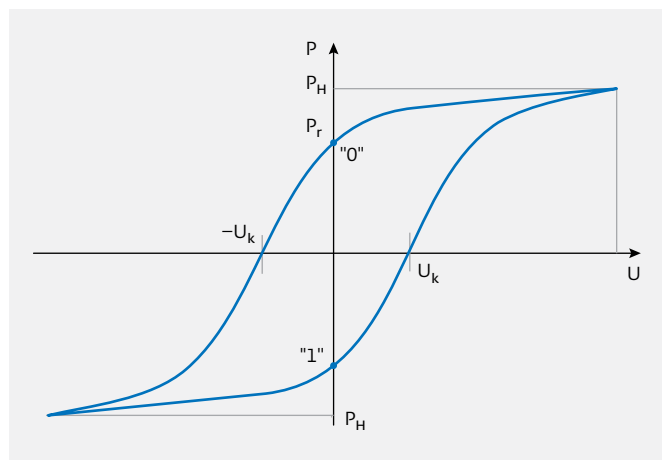


Рис.1. Петля гистерезиса для сегнетоэлектрического конденсатора: P_H – поляризация насыщения, когда диполи поворачиваются вдоль поля; P_r – остаточная поляризация – значение остаточной поляризации при $U=0$. U_k – коэрцитивное напряжение, при котором значение поляризации сегнетоэлектрика становится равным нулю

характеристикам (например, малые управляющие напряжения, высокая чувствительность к внешним воздействиям, однородность и воспроизводимость электрических свойств и т.д.) возникает необходимость целенаправленного синтеза новых материалов или тотальной модификации свойств технологических слоев. При этом синтез требует разработки новых составов, новых технологий, тогда как модификация определяется целенаправленным изменением стехиометрии, структуры, фазового состава сегнетоэлектрических слоев.

Для того чтобы это реализовать, необходимо установить достоверную взаимосвязь перечисленных выше параметров с электрофизическими свойствами сегнетоэлектрических структур и электрическими параметрами приборов на их основе.

Процесс поляризации диэлектрика во внешнем электрическом поле приводит к ориентации диполей параллельно полю. Благодаря этому сегнетоэлектрическая керамика, изотропная в неполяризованном состоянии, вследствие хаотичного распределения доменов кристаллов приобретает полярную пьезоэлектрическую текстуру.

Процесс поляризации определяется следующими основными параметрами: величиной напряженности поляризующего поля, температурой и временем выдержки сегнетоэлектрика под электрическим полем. Поляризующее поле должно превышать

коэрцитивную силу (коэрцитивное напряжение – U_k . Температура поляризации определяется материалом образца и должна быть ниже температуры Кюри (T_k) [2]. Существенно, что при этом токи утечки через образец должны быть минимальны.

Для керамики на основе цирконата-титаната свинца T_k равна 523–623 К. Время поляризации определяется экспериментально и должно обеспечивать ориентацию параллельно вектору электрического поля максимального количества диполей.

Как показали исследования [1], поляризующее поле для твердых растворов многокомпонентных систем на основе ЦТС составляет 3,5–4,5 кВ/мм. Эти системы обладают достаточно высоким удельным объемным сопротивлением (R_v): при 373 К $R_v=10^8-10^9$ Ом·см. Поляризация происходит при температурах 413–433 К в течение 20 мин с последующим охлаждением под электрическим полем до 353–363 К в течение 25–30 мин.

Очевидно, что величина гистерезиса, а также логические уровни "0" и "1" для сегнетоэлектрического конденсатора будут изменяться с изменением частоты переключения из "0" в "1" и обратно. Для уменьшения времени переключения при данной величине логических уровней "0" и "1", необходимо увеличивать скорость процессов поляризации и деполяризации сегнетоэлектрика. Для этого следует увеличить подвижность диполей в поляризованной среде сегнетоэлектрика.

Чтобы повернуть диполь, необходимо преодолеть энергетический барьер, определяющийся суммой энергии деформации и электрической энергии диполей, находящихся в среде с электрической проницаемостью ϵ и плотностью ρ .

Величина энергии деформации характеризуется величиной коэрцитивной силы (F_c), которая, с точки зрения технологии, в большей степени зависит от размера зерна сегнетоэлектрической пленки. Рост зерна приводит к уменьшению внутренних напряжений в пленке, в результате чего уменьшается F_c ; и, соответственно, понижается значение электрического поля (U_k), изменяющего ориентацию диполей. При этом увеличиваются подвижности диполей и величина остаточной поляризации (P_r) сегнетоэлектрической пленки.

Как следует из эксперимента [2], роста кристаллических зерен в пленках ЦТС можно достичь путем изменения технологических параметров нанесения, либо путем их последующего отжига в атмосфере с регулируемым процентным содержанием Pb [2].

Увеличение подвижности диполей за счет роста зерна сопровождается увеличением величины

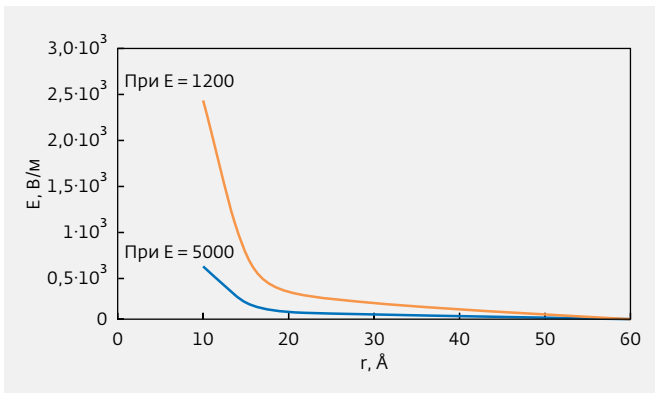


Рис.3. Зависимость напряженности электрического поля диполя от расстояния для диэлектрической среды с различными значениями диэлектрической проницаемости

остаточной поляризации (P_r) сегнетоэлектрической пленки.

Рассмотрим взаимодействие диполей.

На диполь, помещенный во внешнее электрическое поле, действует сила F .

$$F = P_1 \frac{\delta E}{\delta l}, \quad (1)$$

где l – расстояние между зарядами диполя.

Сила F направлена вдоль вектора $\delta E / \delta l$ и стремится переместить диполь в область больших значений E .

При этом величина дипольного момента P_1 равна

$$P_1 = \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1)El}{2\cos\varphi}, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, l – расстояние между зарядами в диполе, φ – угол между осью диполя и напряженностью вектора E .

Напряженность электрического поля диполя (E) на расстоянии r можно определить из уравнения (3):

$$E = \frac{P_1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}. \quad (3)$$

При поляризации структурного комплекса сегнетоэлектрика электрическое поле (E^*), вызывающее смещение зарядов (поляризацию) в нем, равно:

$$E^* = E + P_1 / \beta\epsilon\epsilon_0, \quad (4)$$

где β – поляризуемость молекулы структурного комплекса.

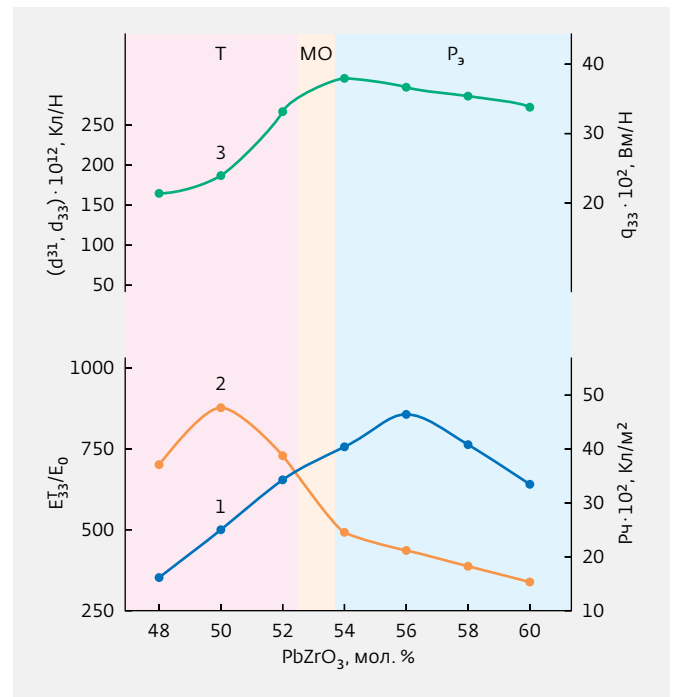


Рис.2. Зависимость параметров P_r – (1), $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ – (2), q_{33} – (3) от состава твердых растворов системы ЦТС

Поляризуемость молекулы можно определить из известного соотношения Клаузиуса – Моссоги:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon - 2} \cdot \frac{\mu}{\rho} = 4 \frac{N_A \beta}{3}, \quad (5)$$

где μ , ρ – молекулярный вес и плотность вещества соответственно, N_A – число Авогадро.

Второй член в уравнении (4) определяет вклад в поляризуемость электростатического поля соседних структурных комплексов, в данном случае за счет диполя P_1 .

Энергия диполя P_{11} во внешнем электрическом поле другого диполя P_{12} равна:

$$W_1 = -\frac{3P_{11}P_{12}\cos\varphi}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l_1 l_2}, \quad (6)$$

где g – расстояние между диполями, $l_1 l_2$ – расстояние между зарядами для первого и второго диполей соответственно, ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, разделяющего диполи.

В этом случае для того, чтобы обеспечить относительно свободное перемещение диполей друг относительно друга необходимо затратить энергию, превышающую энергию их взаимодействия.

На основании уравнения (3) была построена зависимость изменения напряженности поля диполя от расстояния (рис.3).

Как видно из рис.3, влияние электрического поля диполя на соседний точечный заряд сводится к минимуму на расстоянии $r \approx 20\text{Å}$, причем это влияние ослабевает с увеличением диэлектрической постоянной среды, в которой находятся диполи.

Таким образом, на расстоянии $r \sim 40\text{Å}$ два диполя практически не "видят" друг друга и в этом случае на взаимную ориентацию влияют в первую очередь упругие свойства окружающей среды.

При поляризации диэлектрика, как было отмечено выше, его нагревают. В этом случае тепловая энергия приводит к разориентации диполей, и энергию диполя теперь можно записать следующим образом:

$$W_1 = -\frac{2P_{11}^2 P_{12}^2 \cos\varphi}{3kT r^6}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, r – расстояние между диполями.

Чтобы ориентировать относительно свободный диполь по направлению электрического поля в диэлектрике (E), необходимо переместить его в поляризованной среде, приложив усилие (F),

$$F = \frac{d_{33}}{S_{33}} E S,$$

где S_{33} – упругая податливость среды для направления, параллельного оси поляризации; d_{33} – пьезоэлектрический модуль – наведенная поляризация в направлении параллельном оси поляризации на единицу механического давления приложенного в том же направлении; S – площадь.

$$S_{33} = \frac{1}{Y_{33}}, \quad (9)$$

где Y_{33} – модуль Юнга.

Увеличение модуля Юнга среды сопровождается снижением ее упругой податливости (уравнения 8, 9), что делает предпочтительным применение сегнетоэлектриков на основе ЦТС для изготовления на их основе преобразователей большой мощности.

При изменении ориентации диполей относительно электрического поля, величина пьезомодуля изменяется пропорционально величине $E^* \cos j$.

Очевидно, что даже в сильных поляризующих полях могут осуществиться не все доменные повороты. Чем ближе форма элементарной ячейки к кубической, тем меньше затрачивается энергии на механические деформации, возникающие при переориентации доменов. Величина этих

деформаций определяется спонтанной деформацией ячейки. Поэтому можно ожидать увеличения числа доменных переориентаций при уменьшении ячейки, что должно приводить к более высоким значениям остаточной поляризации (P_r). Приведенный выше анализ справедлив для сегнетоэлектрических материалов, обладающих постоянным фазовым и структурным составами.

Наиболее изученная двухкомпонентная система твердых растворов цирконата-титаната свинца $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ широко используется в разработке различных сегнето- и пьезоэлектрических приборов.

На рис.2 приведены зависимости остаточной поляризации (P_r), диэлектрической проницаемости $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, (где индекс T означает значение диэлектрической проницаемости при постоянном давлении, а также пьезоэлектрического коэффициента по напряжению (g_{33}) от состава твердых растворов системы ЦТС [2].

Пунктирными линиями на рис.2 выделена морфотропная область (МО), которая расположена между тетрагональной (Т) и ромбоэдрической (P_3) областями. Видно, что максимум остаточной поляризации $P_r = 48 \cdot 10^2$ Кл/м² принадлежит составу ЦТС с ромбоэдрической структурой, который при этом не обладает максимальными значениями пьезоэлектрических параметров.

Противоречивые точки зрения высказаны по поводу свойств тетрагональной и ромбоэдрической фаз в МО. Так, в одних работах [1, 3-7] делается вывод об изменении структурных параметров сосуществующих фаз в этой области, а в других [8] – утверждается их неизменность. Однако существует и другая, отличная от первых двух, точка зрения [9], согласно которой МО имеет сложную структуру, различную для центральной и периферийной ее частей. Объяснение, а тем более количественное описание совокупности электромеханических параметров ЦТС в МО представляет собой сложную и до сих пор нерешенную задачу [2].

Поэтому, для того чтобы определить пьезокоэффициенты и электрофизические свойства этой области, нужны прямые эксперименты.

Таким образом, проведенный анализ позволяет с помощью зависимостей, определенных в данной работе (уравнения 1-9), качественно и адекватно оценить электрические параметры и поведение приборов, изготовленных на основе сегнетоэлектрических пленок, в частности на основе пленок ЦТС при смещении их состава в правую или левую сторону от морфотропной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen Q., Wong K.H.** growth of highly oriented of Pb (Zr_x Ti_{1-x}) O₃ film on porous silicon // Thin Solid Films. 2001. V. 397. P. 1-3.
2. **Huang Z, Zhang Q, Whatmore R.W.** Low temperature crystallization of lead zirconate titanate thin films by a sol gel method // J. Appl. Phys. 1999. 85. № 10. P. 7355-7361.
3. **Hiroshi Funakubo, Kuniharu Nagashima.** Comparison of deposition behavior of Pb (Zr, Ti) O₃ film and its end-member-oxide films prepared by MOCVD // Thin Solid Films. 2000, V. 368. P. 261-265.
4. **Данцигер А.Я. и др.** Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. Ростов на Дону, изд-во Ростовский университет, 2001. Т. 1. С. 408.
5. **Crescini D., Marioli D.** Large bandwidth and thermal compensated piezoelectronic thin-film acceleration transducer // Sensors and Actuators. 2001. A87. P. 131-138.
6. **Такиев А.С.** Будущие технологии памяти: Fe RAM изнутри. 3D News. Fe RAM memory.
7. **Лалетин Р.А., Бурханов А.И., Шильников А.В., Сигов А.С., Воротилов К.А.** Поведение доменной структуры в электромеханических полях в тонких сегнетоэлектрических пленках PZT // Труды Международной научн.-практ. конф. Ростов на Дону, Россия, 23-26 августа 2005. С. 111.
8. **Lian L., Sottos N.R.** Effects of thickness on the piezoelectric and dielectric properties lead zirconate titanate thin films // J. Appl. Phys., 2000. V. 87. № 8. P. 3941-3939.
9. **Cattan Eric, Velu Gabriel, Haccart Thibautt.** Remanent piezoelectric constant of PZT thin films // Ferroelectrics. 1999. V. 224. № 1-4. P. 307-314.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

► А.С.Бенедиктов¹, П.В.Игнатов²

¹.²МФТИ, ²АО "НИИМЭ"

Приведены результаты исследований, направленных на разработку высокотемпературных КНИ МОП-транзисторов. Исследована возможность устойчивой работы радиационно-стойкой активной элементной базы при температурах свыше 125°C. Проведено моделирование состояний полного и частичного обеднения в карманах МОП-транзисторов в среде TCAD. На основе моделирования проведено изменение параметров МОП-транзисторов с целью повышения их устойчивости к высоким температурам. Испытаны различные варианты системы металлизации интегральных схем на надежность при высоких температурах.

THE COMPUTER MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SOI MOSFET'S AT THE HIGH TEMPERATURES

A.S.Benediktov^{1,2}, P.V.Ignatov²

¹MFTI, ²JSC MERI

The results of creating of high-temperature SOI MOSFETs are shown in this paper. The possibility of steady work of radiation-resistant active element base at temperatures above 125°C are studied. The TCAD-modelling of fully and partially depleted MOSFET's states are completed and MOSFET's parameters are changed for increasing its resistance to high temperatures. The different variants of integration circuits metallization are tested at high temperatures.

ВВЕДЕНИЕ

В класс высокотемпературной электроники (High Temperature Electronics, HTE) принято выделять электронные компоненты, рассчитанные на устойчивую работу в диапазоне температур от -60 до 225°C (рис.1) [1, 2].

Для реализации высокотемпературной элементной базы используются структуры на основе КНИ, карбида кремния (SiC) или нитрида галлия (GaN) [1, 3, 4]. При этом электронные компоненты на основе технологии КНИ имеют меньшую конечную стоимость, а сама технология отработана при

производстве радиационно-стойких интегральных схем [4]. Вследствие низкой стоимости и высокой технологичности элементная база на основе КНИ актуальна в приложениях авиационной, автомобильной, нефтегазовой, космической и атомной отраслей промышленности [1, 4, 5].

В качестве базовой технологии для проведения исследований и реализации высокотемпературных транзисторов выбраны технология радиационно-стойких электронных компонентов на КНИ-структурах КНИ180. Выбор данной элементной базы для высокотемпературных исследований обусловлен

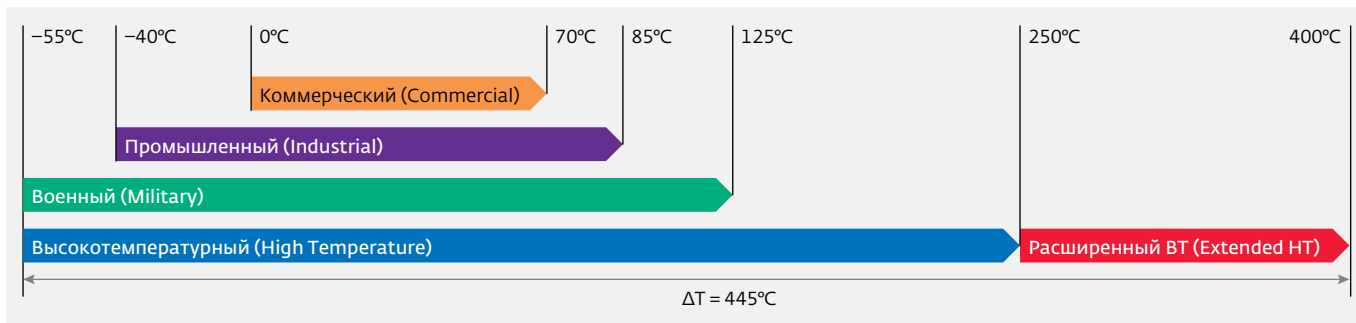


Рис.1. Классификация электронных компонентов в соответствии с диапазонами рабочих температур

исследованиями транзисторов, проведенными Honeywell [6], XFAV [7] и IBM [8].

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ. СОСТОЯНИЯ ОБЕДНЕНИЯ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Рассмотрим поперечное сечение структуры металл-оксид-полупроводник-оксид-полупроводник (рис.2).

На рис.2 ноль оси Ox совпадает с границей раздела $Si-SiO_2$ вблизи верхнего затвора, а положительное направление оси перпендикулярно слоям структуры. Обозначим за x_{d1} и x_{d2} толщины областей пространственного заряда (ОПЗ) – таких областей в слое кремния, в которых отсутствуют свободные носители зарядов. Также обозначим через f_{S1} (при $x=0$) и f_{S2} (при $x=t_{Si}$) поверхностные потенциалы, а через V_{G1} и V_{G2} – напряжения, подаваемые на верхний и нижний затворы соответственно.

Обычно различают два основных состояния обеднения КНИ МОП-транзистора носителями зарядов:

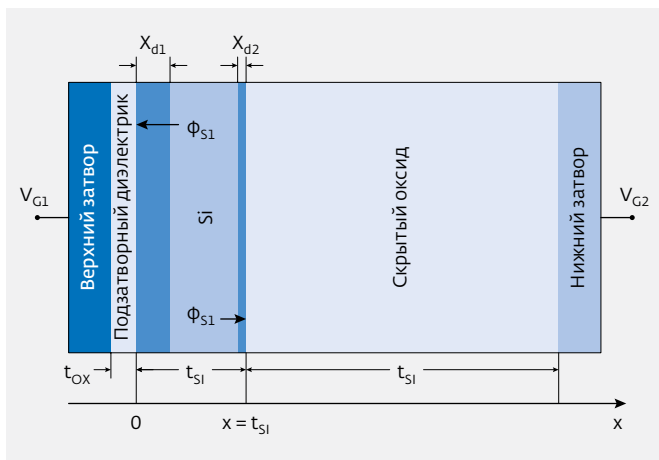


Рис.2. Структура металл-оксид-полупроводник-оксид-полупроводник

частично обедненное (рис.3а) и полностью обедненное (рис.3б). При этом с учетом введенных обозначений случай частичного обеднения характеризует неравенство $(x_{d1} + x_{d2}) < t_{Si}$, а случай полного обеднения – неравенство $(x_{d1} + x_{d2}) > t_{Si}$. Заметим также, что в случае частичного обеднения в области кремния между стоком и истоком существует электрически нейтральная область, называемая основанием.

Переключение между состояниями частичного и полного обеднения происходит в зависимости от напряжений на затворах V_{G1} и V_{G2} , напряжения сток-исток V_{DS} и температуры T . Для реализации высокотемпературной активной элементной базы актуально сохранение состояния полного обеднения в широком диапазоне температур, так как в данном состоянии, в отличие от состояния частичного обеднения, обеспечиваются:

- понижение встроенного потенциала p-n-переходов, что позволяет компенсировать эффект

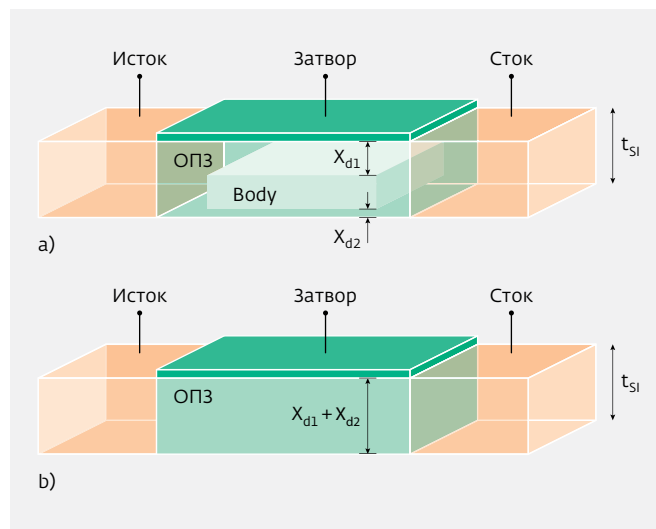


Рис.3. а – частично обедненный транзистор, б – полностью обедненный транзистор

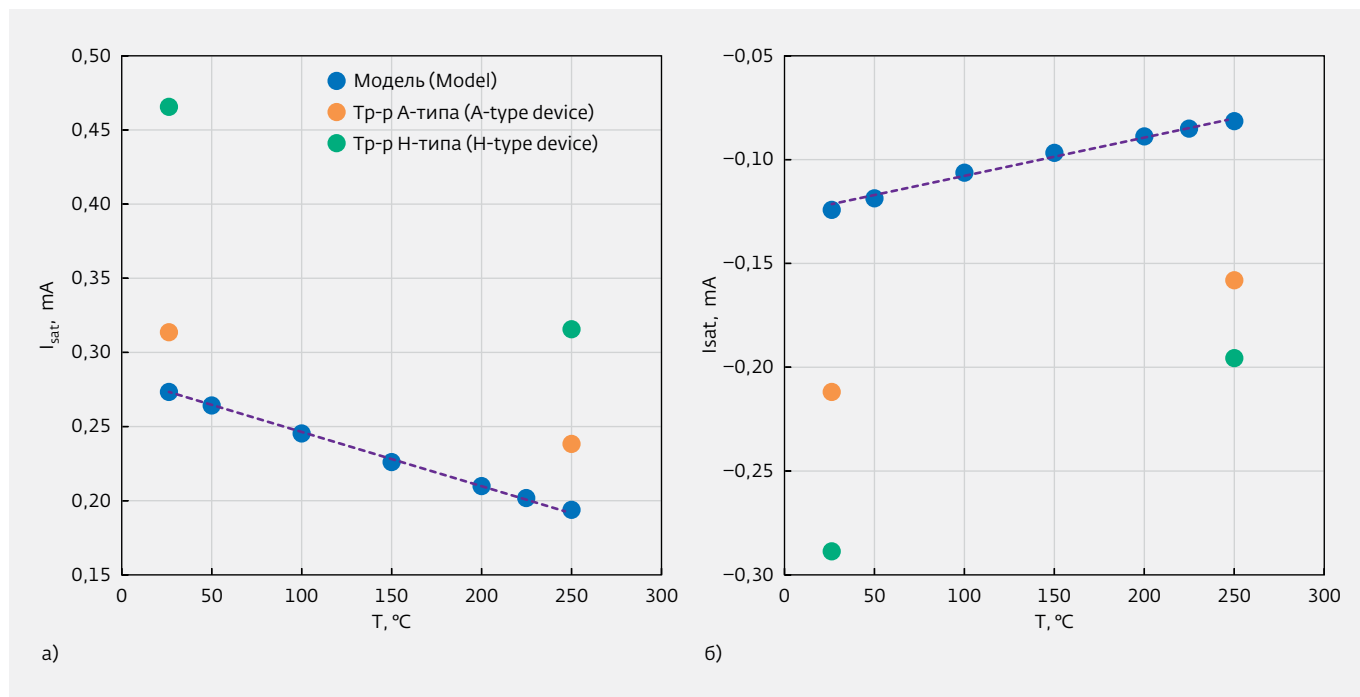


Рис.4. Зависимости тока насыщения I_{sat} от температуры T для МОП-транзисторов: а – зависимость для НМОП-транзистора, б – зависимость для РМОП-транзистора

плавающей подложки, проявляющийся по мере повышения температуры окружающей среды [9];

- пороговое напряжение МОП-транзистора, не зависящее от температуры [9];
- минимальные токи утечки при больших температурах за счет исключения электрически нейтральной области, накапливающей заряд [9];
- уменьшение воздействия эффектов плавающего напряжения, в том числе кинк-эффекта и эффекта паразитного биполярного транзистора [9].

Так как толщины областей обеднения в пространстве между стоком и истоком МОП-транзистора зависят от концентрации легирующей примеси, то задача разработки технологии высокотемпературных транзисторов на структурах КНИ должна включать отработку различных вариантов распределения легирующих примесей в пространстве между стоком и истоком транзистора.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИСХОДНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В качестве объекта исследования выбрана двумерная модель высоковольтных НМОП- и РМОП-транзисторов, выполненная в САПР TCAD в соответствии с правилами проектирования и технологическим маршрутом изготовления

радиационно-стойкой элементной базы КНИ180. Ниже приведены значения основных параметров высоковольтных транзисторов, входящих в состав модели:

- минимальная длина канала транзистора: 0,5 мкм;
- напряжение питания транзисторов: 5 В;
- толщина нижнего изолирующего слоя (BOX): 0,146 мкм;
- толщина приборного слоя кремния: 0,088 мкм;
- концентрация бора в кремниевой подложке: $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;
- толщина подзатворного слоя SiO_2 : 100 Å;
- толщина первого слоя поликремния: 0,2 мкм;
- концентрация мышьяка в областях стока/истока: $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$;
- концентрация бора в областях стока/истока: $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$;
- толщина промежуточного слоя SiO_2 : 125 Å;
- толщина второго слоя поликремния: 0,2 мкм.

В ходе эксперимента получены выходные вольт-амперные характеристики моделей МОП-транзисторов для различных температур в диапазоне от 0 до 250°C, а также зависимости порогового напряжения от температуры, токов насыщения и утечки от температуры. Температурные зависимости соотнесены с соответствующими результатами

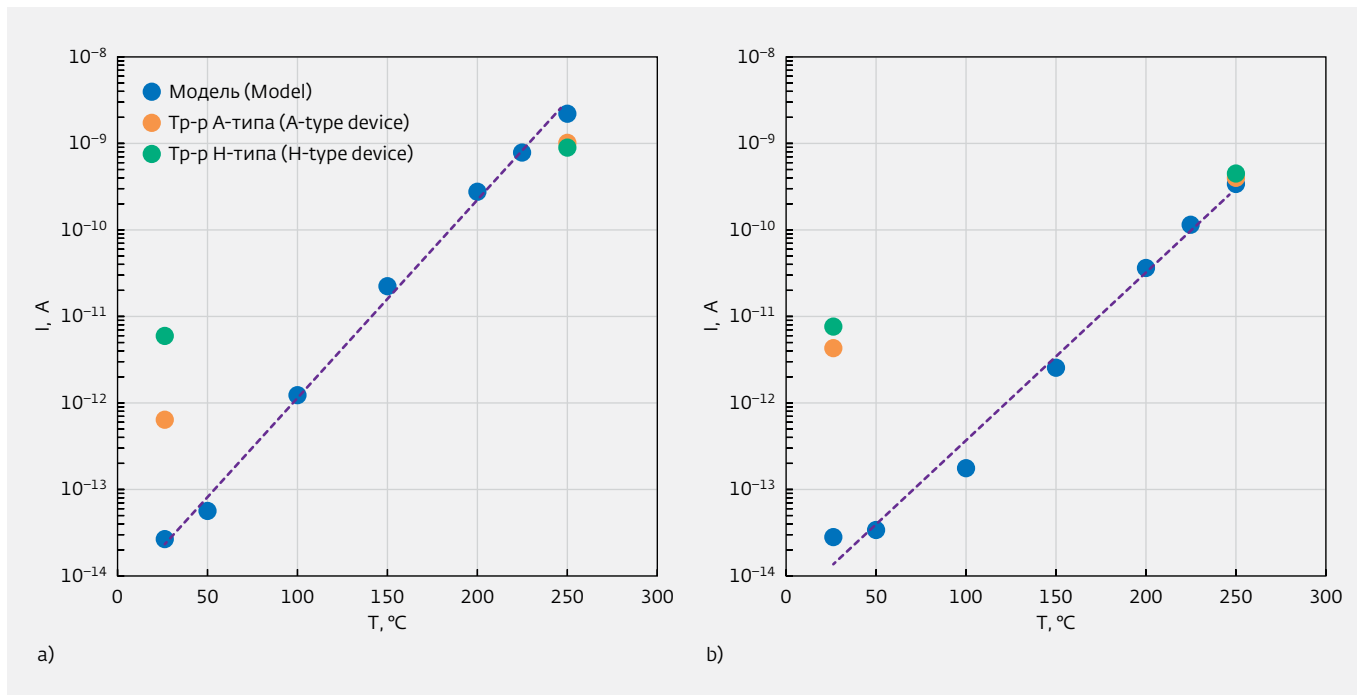


Рис.5. Зависимости тока утечки I от температуры T для МОП-транзисторов: а – зависимость для НМОП-транзистора; б – зависимость для РМОП-транзистора

измерений транзисторов А- и Н-типов на тестовом кристалле.

Зависимости токов насыщения моделей НМОП- и РМОП-транзисторов от температуры, показанные на рис.4а, б, позволяют определить изменения токов на 1°C (табл.1). Данные значения изменений токов справедливы и для тестовых транзисторов А-типа. В свою очередь, для транзисторов Н-типа характерны большие значения изменений токов насыщения, а абсолютные значения тока насыщения на $1...2 \cdot 10^{-4}$ А отличаются от результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования.

Зависимости токов утечки транзисторов от температуры показаны в логарифмическом масштабе на рис.5. Как в случае с НМОП-транзистором (рис.5а), так и в случае с РМОП-транзистором (рис.5б) ток утечки максимален при температуре 250°C и равен $2,14 \cdot 10^{-9}$ А для модели НМОП-транзистора и $3,56 \cdot 10^{-10}$ А для модели РМОП-транзистора. Указанные значения совпадают по порядку величины с аналогичными значениями для тестовых транзисторов.

Как у компьютерной модели, так и у полупроводниковых тестовых транзисторов максимальные токи утечки на 5–6 порядков меньше минимальных токов насыщения транзисторов ($0,5...2 \cdot 10^{-4}$ А), достигаемых при температуре 250°C . Следовательно,

ввиду малости токов утечки по отношению к токам насыщения, исследуемые транзисторы на структурах КНИ сохраняют усилительные свойства при высоких температурах. Таким образом, МОП-транзисторы на структурах КНИ с технологическими нормами $0,5$ мкм и напряжением питания 5 В отвечают критериям, предъявляемым к работе МОП-транзисторов в диапазоне температур от 0 до 250°C .

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ОБЕДНЕНИЯ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Для исследования обедненных состояний МОП-транзисторов использовалась двумерная TCAD-модель. В исходной модели, соответствующей

Таблица 1. Изменения порогового напряжения и тока насыщения, приходящиеся на 1°C для МОП-транзисторов

Тип транзистора	Удельное пороговое напряжение, V_{th}/T 10^{-3} В/ $^{\circ}\text{C}$	Удельный ток насыщения, I_{sat}/T 10^{-7} А/ $^{\circ}\text{C}$
НМОП	1,67	3,6
РМОП	1,65	1,9

Таблица 2. Значения порогового напряжения МОП-транзисторов при различных температурах до оптимизации

Температура, °C	NMOS	PMOS
	Vth, В	Vth, В
0	0,949	-1,137
27	0,911	-1,100
50	0,878	-1,068
100	0,803	-0,996
150	0,725	-0,919
200	0,641	-0,837
225	0,596	-0,794
250	0,550	-0,750

радиационно-стойким МОП-транзисторам, были изменены доза примеси BF_2 , имплантируемой в карман NМОП-транзистора, повышена с $2,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При этом аналогичный параметр для PМОП-транзистора был оставлен неизменным ($1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Доза примеси была увеличена с целью уменьшения значения порогового напряжения NМОП-транзистора, приходящегося на 1°C. В табл. 2-3 показаны значения порогового напряжения транзисторов при разных температурах до и после изменения дозы примеси соответственно.

Таким образом, по сравнению с транзисторами, выполненными по исходной технологии, было уменьшено изменение порогового напряжения на рабочем диапазоне температур. При этом двумерные распределения носителей заряда в МОП-транзисторах при различных температурах позволяют судить и об изменении температуры, при которой наступает частично обедненное состояние прибора.

ИСПЫТАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ

Как известно, в настоящее время при производстве интегральных схем используется ограниченное количество вариантов исполнения системы металлических шин и соединений интегральных схем. К их числу относятся алюминиевая металлизация с вольфрамовыми межуровневыми переходами и медная металлизация с медными межуровневыми

Таблица 3. Значения порогового напряжения МОП-транзисторов при различных температурах после оптимизации

Температура, °C	NMOS	PMOS
	Vth, В	Vth, В
0	1,273	-1,137
27	1,229	-1,100
50	1,191	-1,068
100	1,106	-0,996
150	1,016	-0,919
200	0,920	-0,837
225	0,870	-0,794
250	0,818	-0,750

переходами. При этом для указанных систем металлизации характерны следующие типы высокотемпературных деградаций:

- электромиграция (Electromigration) – это явление переноса вещества в проводнике за счет постепенного дрейфа ионов, возникающее вследствие обмена импульсами при столкновениях между проводящими носителями зарядов и атомной решеткой металла;
- образование пустот в металлах (Stress Voiding) – происходит при повышении температуры в многоуровневой металлизации и вызвано миграцией вакансий;
- расслоение межуровневых диэлектриков (Structural Delamination) происходит в результате расширения диэлектрических и проводящих слоев, вызванного повышением температуры многоуровневой металлизации, контактных переходов и межуровневых диэлектриков.

Перечисленные варианты исполнения системы металлизации были испытаны на устойчивость к различным деградациям. Методики испытаний предполагают первичное измерение омического сопротивления и межуровневого тока металлических шин и соединений, высокотемпературное воздействие, вторичное измерение сопротивлений и токов и получение соотношений между параметрами, измеренными до и после высокотемпературного воздействия.

По результатам испытаний установлено отсутствие отказов тестовых структур каждого

из вариантов металлизации. При этом в дальнейшем для высокотемпературных интегральных схем было решено использовать медную металлизацию с медными межуровневыми переходами, так как медь обладает большей температурой плавления, а следовательно, медные металлические шины более устойчивы к температурным воздействиям. Наряду с этим, медную систему металлизации от алюминиево-вольфрамовой отличает использование меди в качестве материала для межуровневых соединений. Данное решение позволяет при высоких температурах уменьшить количество структурных деградаций, вызванных различными коэффициентами температурного расширения у различных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований и испытаний, была отработана технология изготовления высокотемпературных КНИ МОП-транзисторов, полученных путем модификации радиационно-стойких КНИ МОП-транзисторов с проектными нормами 0,5 мкм и напряжением питания 5 В.

Произведены первичные исследования радиационно-стойкой активной элементной базы при высоких температурах, в результате которых была подтверждена принципиальная возможность создания высокотемпературных КНИ МОП-транзисторов.

Были изменены дозы легирования примесь кармана NМОП-транзистора, в результате чего достигнуто уменьшение изменения порогового напряжения на рабочем диапазоне температур.

Также были испытаны на устойчивость к высокотемпературным деградациям алюминиево-вольфрамовая и медно-медная системы металлизации интегральных схем. По результатам испытаний медно-медная система металлических шин и межуровневых соединений была выбрана в качестве базовой для высокотемпературных интегральных схем.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы" по соглашению № 14.576.21.0063 от 23 октября 2014 года (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57614X0063).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Полищук А.** Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации // Современная электроника. 2006. № 4. С. 20–21.
2. **Janssens E.** Smart High-Temperature High-Reliability Integrated Electronics // 4th European Networking Event. Düsseldorf, 2012. 10 p.
3. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: В 2-х ч. – М., 2004. Ч. 2. 535 с.
4. **Mantooth A.** Emerging Capabilities in Electronics Technologies for Extreme Environments Part I – High Temperature Electronics // IEEE Power Electronics Society NEWSLETTER. 2006. VOL. 18. № 1. P. 9–14.
5. **Johnson R. Wayne [et al.]** The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics // IEEE Transactions on Electronic Packaging Manufacturing. 2004. № 3, P. 164–176.
6. **Ohme B. [et al.]** Updated Results from Deep Trek High Temperature Electronics Development Programs. Plymouth: Honeywell International Inc., 2007. 8 p.
7. 0,18 μm Process Family: XT018. 0.18 Micron HV SOI CMOS Technology // XT018 Data Sheet. – X-FAB Semiconductor Foundries AG, 2014. 11 p.
8. Foundry technologies 180-nm CMOS, RF CMOS and SiGe BiCMOS // Data Sheet. – IBM Microelectronics Division. 4 p.
9. **Шелепин Н.А.** Физические основы моделирования паразитных элементов КНИ КМОП СБИС // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5. С. 9–13.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

► А.С.Коротков^{1,2}, В.В.Лобода¹
¹ФГАОУ ВО СПбПУ, ²АО "ВНИИРА"

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) используются как первичные (автономные) источники питания во многих практических приложениях при требуемых мощностях от единиц милливатт до единиц ватт. В статье представлен сопоставительный анализ результатов моделирования и эксперимента двух типов промышленно выпускаемых ТЭГ. Моделирование ТЭГ проводилось с использованием метода конечных элементов на основе программной платформы ANSYS Workbench. Применение предлагаемой методики моделирования позволяет определить режимы включения термоэлектрических генераторов, рабочий диапазон температур, сопротивления нагрузок, выходную мощность. Показано, что результаты моделирования с высокой точностью соответствуют эксперименту.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS

A.S.Korotkov^{1,2}, V.V.Loboda¹

¹SPbPU, ²JSC VNIIRA

Thermoelectrical generators are widely used in many practical applications as autonomous energy sources with the range of power from a few mW to several W. The paper presents a comparative analysis of simulation and experimental results of two types of commercially available thermoelectrical generators. Thermoelectrical generator simulations were performed using the finite element method based on software ANSYS Workbench platform. Application of the proposed simulation techniques allows the user to determine modes, working temperature range, load resistance, and output power of thermoelectric generators. It is shown that the simulation results are in a good agreement with experiments.

1. ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия термоэлектрического генератора (ТЭГ) основан на применении эффекта Зеебека [1]. При использовании термоэлектрических генераторов необходимо определить оптимальный режим включения для обеспечения передачи максимальной мощности в нагрузку и для повышения КПД. Как правило, данных, приведенных в справочных листах ТЭГ, для этого недостаточно. Действительно, производители ТЭГ приводят расчетные параметры для одной разности температур. При разработке реальных устройств необходимо знать поведение ТЭГ

при иных перепадах температур. Данное положение делает актуальным разработку методик моделирования ТЭГ в различных возможных режимах включения с последующими практическими рекомендациями. Целью данной статьи является методика моделирования ТЭГ и сопоставительный анализ результатов моделирования и эксперимента. Статья построена следующим образом. Во втором разделе описана экспериментальная установка и методика эксперимента, в третьем разделе рассмотрена методика моделирования с применением метода конечных элементов, в четвертом разделе представлены

результаты моделирования и эксперимента и проведено их сопоставление. В заключении сформулированы основные выводы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Термоэлектрический генератор состоит из соединенных последовательно пар термоэлементов (ТЭ) п- и р-типа, расположенных между двумя керамическими пластинами (горячая и холодная стороны). Термоэлементы соединяются металлическими контактными площадками (рис.1).

Напряжение термоэдс $E_{ТЭДС}$, генерируемое ТЭГ, прямо пропорционально коэффициенту Зеебека α генератора и разнице температур ΔT между горячей T_h и холодной T_c сторонами термоэлектрического генератора:

$$E_{ТЭДС} = \alpha \Delta T.$$

На внешней нагрузке R_H создается напряжение U , равное термоэдс за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора R :

$$U = IR_H = E_{ТЭДС} - IR,$$

где сила тока I в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R + R_H}. \quad (1)$$

Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, вычисляется по следующей формуле:

$$P = UI = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{(R + R_H)^2} R_H. \quad (2)$$

Чтобы создать разность температур на сторонах ТЭГ, к его горячей стороне необходимо подвести тепловой поток Q_h , а с холодной стороны отвести тепловой поток Q_c . Разница тепловых потоков по закону сохранения энергии составит электрическую мощность P :

$$P = Q_h - Q_c.$$

Эффективность работы термоэлектрического генератора оценивается коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{P}{Q_h}.$$

Величины Q_h и Q_c определяются из уравнения теплового баланса и подробно рассмотрены в [1,

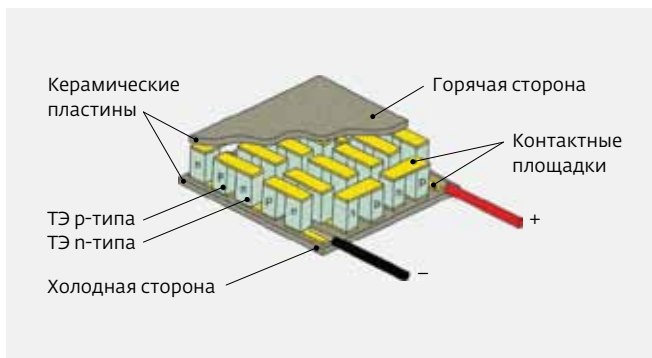


Рис.1. Структура термоэлектрического генератора

с. 44]. Термоэлектрический генератор характеризуется следующими параметрами: внутренним электрическим сопротивлением:

$$R = N(\rho_n + \rho_p) \frac{h}{a^2}, \quad (3)$$

где N – число пар ТЭ, h – высота ТЭ, a – сторона поперечного сечения ТЭ, ρ_n, ρ_p – удельное электрическое сопротивление ТЭ п- и р-типа соответственно; тепловой проводимостью:

$$K_m = N(\lambda_n + \lambda_p) \frac{a^2}{h}, \quad (4)$$

где λ_n, λ_p – коэффициент теплопроводности ТЭ п- и р-типа соответственно; коэффициентом Зеебека:

$$\alpha = N(\alpha_p^n - \alpha_p^p), \quad (5)$$

где α_p^n, α_p^p – коэффициенты Зеебека ТЭ п- и р-типа соответственно.

Для построения ТЭГ используются полупроводниковые термоэлектрические материалы, обеспечивающие наиболее высокий коэффициент преобразования тепла в электричество. Максимальная эффективность термоэлектрического материала определяется безразмерным параметром – произведением коэффициента термоэлектрической

эффективности $Z = \frac{\alpha}{R + K_m}$ на температуру T .

Максимальные значения ZT для полупроводниковых материалов лежат в диапазоне 0,8-1,1. Причем большие значения достигаются для полупроводников р-типа.

Устройство и принцип работы экспериментальной установки для определения параметров ТЭГ следующие: источник тепла подводит тепловой поток

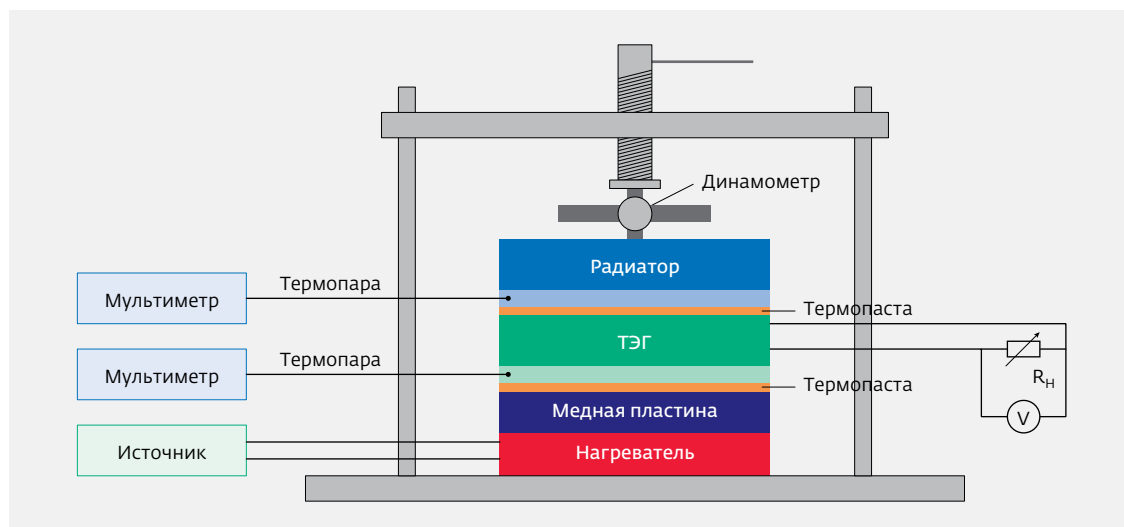


Рис.2. Экспериментальная установка для определения параметров термоэлектрического генератора

Q_h к горячей стороне ТЭГ, радиатор (в более общем случае – система охлаждения) отводит от холодной стороны ТЭГ тепловой поток Q_c . Для обеспечения эффективной работы ТЭГ необходимо обеспечить максимально допустимую разность температур между сторонами генератора. ТЭГ преобразует разность значений температур горячей и холодной сторон в ток, который поступает в сопротивление внешней нагрузки R_n . Экспериментальная установка снабжена измерительными приборами: вольтметром для измерения падения напряжения на внешней нагрузке, электронными термометрами для замера температуры (рис.2). ТЭГ фиксировался между источником тепла и радиатором с прижимным усилием 1 кН, контролируемым динамометром. Для обеспечения равномерного температурного поля на поверхностях ТЭГ между генератором и источником тепла, а также генератором и радиатором использовались промежуточные медные пластины. Кроме того, для наилучшего теплового контакта на границе "ТЭГ – медная пластина" использовалась термопаста Nano Grease.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы ТЭГ двух типов: ТЕС 1-7105 (производитель Conrad Electronics SE, Германия) и ТГМ-287-1.0-2.5 (производитель "Криотерм", Россия). Термоэлементы выбранных генераторов выполнены на основе твердых растворов Bi_2Te_3 для ТЭ п-типа и Sb_2Te_3 для ТЭ р-типа [2]. Данные материалы являются наиболее эффективными

в диапазоне температур до 200°C . При этом параметр ZT близок к единице.

Режимы температурных испытаний ТЭГ представлены в табл.2. Во время эксперимента постоянно поддерживалась температура горячей стороны T_h . Значения внешней нагрузки R_n варьировались в пределах от 1 Ом до 10 кОм. В процессе эксперимента контролировалась температура на поверхностях ТЭГ и измерялось выходное напряжение на нагрузке. Величины тока и выходная мощность рассчитывались по формулам (1) и (2) соответственно. На рис.3, 4 точками представлены экспериментальные зависимости выходной мощности ТЭГ от тока. Приведены данные по усреднению результатов трех измерений.

В табл.3 представлены значения максимальной выходной мощности и удельной мощности при различных температурах, рассчитанные по результатам эксперимента, при выполнении условия передачи максимума мощности в нагрузку.

Таблица 2. Режимы температурных испытаний

ТЕС 1-7105			ТГМ-287-1.0-2.5		
$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
100	42	58	175	15	160
85	42	43	150	14	136
70	37	33	125	12	113
55	30	25	100	11	89
40	27	13	75	9	66

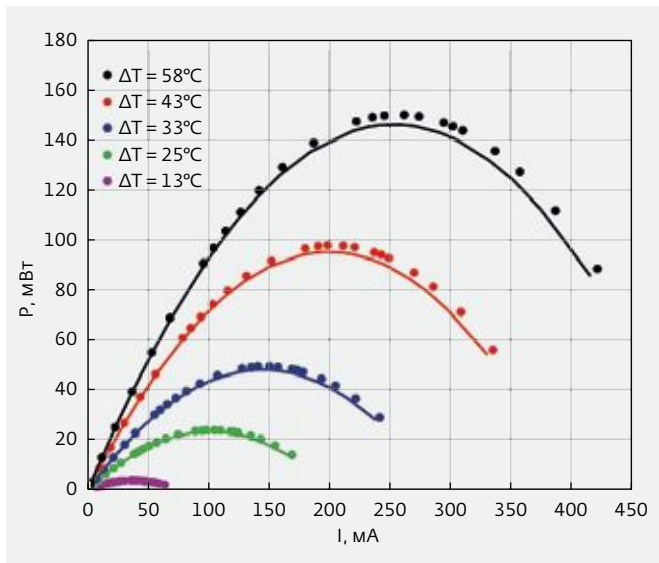


Рис.3. Зависимости выходной мощности термоэлектрического генератора TEC 1-7105 от тока в нагрузке при различных температурных режимах

- задание физических свойств материалов, из которых состоит моделируемый объект (Engineering data);
 - создание твердотельной модели объекта с использованием модуля ANSYS Mechanical, позволяющего определять поля температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением;
 - генерация сетки конечных элементов с использованием модуля ANSYS Meshing.
- Этап решения состоит из следующих шагов:
- выбор вида анализа (Steady-State Analysis) и его опций;
 - выбор вида граничных условий – тепловые и электрические;
 - выбор параметров расчета.

На последнем этапе осуществляется вывод результатов расчета в графической и табличной формах.

Описанная методология использована при моделировании термоэлектрических генераторов в работах [3–7]. Отметим, что описанный программный продукт закреплен соответствующим свидетельством о государственной регистрации [8].

Построение геометрической 3D-модели проведено на основе измерений линейных размеров составных частей ТЭГ. Физические параметры материалов ТЭ определялись из решения задачи экстракции параметров по результатам эксперимента и по справочным данным. При этом предполагалось, что $|\alpha_T^n| = |\alpha_T^p| = \alpha_T$, $\rho_n = \rho_p = \rho$, $\lambda_n = \lambda_p = \lambda$. Параметры материалов контактных площадок и керамических пластин задавались из библиотеки ANSYS. Тепловые граничные условия определяются температурами T_h и T_c на поверхностях керамических пластин и соответствовали температурным режимам в эксперименте. Результаты моделирования показаны

2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В ANSYS

Для моделирования термоэлектрических генераторов используются две программные платформы на основе метода конечных элементов: ANSYS Workbench, COMSOL Multiphysics. Платформа ANSYS Workbench позволяет эффективно использовать встроенные модули для решения физических задач и более широко применяется на практике, в том числе и в данной работе. Процесс моделирования представляется следующими этапами:

- препроцессорная подготовка (Preprocessing),
- получение решения (Solving),
- постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing).

Этап препроцессорной подготовки состоит из пяти шагов:

- построение геометрической 3D-модели объекта с использованием модуля ANSYS Design Modeler, предназначенного для построения, редактирования геометрии и присвоения атрибутов модели;
- выбор типа анализа, в приложении к моделированию ТЭГ – это термоэлектрический анализ (Thermal-electric);

Таблица 3. Максимальные параметры ТЭГ

ТЕС 1-7105			ТГМ-287-1.0-2.5		
ΔT, °C	P _{max} , МВт	$\frac{P_{max}}{S}, \frac{МВт}{см^2}$	ΔT, °C	P _{max} , МВт	$\frac{P_{max}}{S}, \frac{МВт}{см^2}$
58	145	16.1	160	3650	228
43	90	10	136	2745	172
33	47	5.2	113	1958	122
25	23	2.6	89	1265	79
13	4	0.4	66	708	44

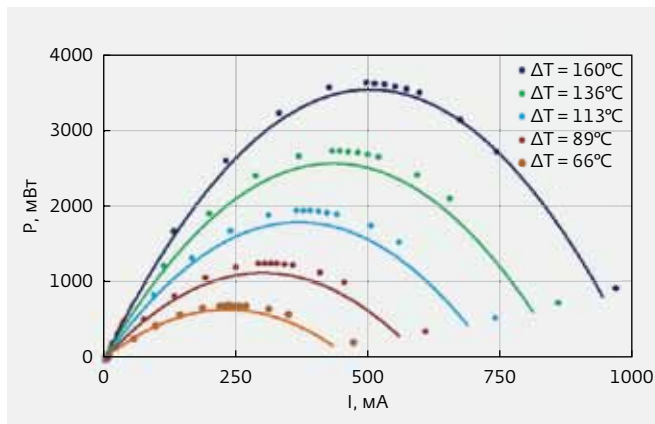


Рис.4. Зависимость выходной мощности термоэлектрического генератора ТГМ-287-1.0-2.5 от тока в нагрузке при различных температурных режимах

на рис.3, 4 сплошными линиями. Отличие результатов моделирования и эксперимента не превышает 3% для ТЭГ ТЕС 1-7105 и 7% для ТГМ-287-1.0-2.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты моделирования и эксперимента позволяют сделать вывод о правильности предложенного подхода к моделированию термоэлектрических генераторов. Предложенная в работе методика моделирования дает возможность с высокой точностью экстраполировать справочные данные промышленно выпускаемых генераторов и, следовательно, осуществлять подбор генератора под заданные условия эксплуатации по мощности и рабочим температурам при известных сопротивлениях внешней нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Июффе А.Ф.** Полупроводниковые термоэлементы. – М.; Л.: Издательство АН СССР, 1960. 188 с.
2. **Snyder G.J., Toberer E.S.** Complex thermoelectric materials // *Nature materials*. Vol.7. February 2008. P. 105-114.
3. **Antonova E.E., Looman D.C.** Finite element for thermoelectric devices in ANSYS // *Proc. ICT'05. 24th International Conference on Thermoelectronics*. Clemson, USA. 2005. P. 215-218.
4. **Hogblom O., Andersson R.** Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments // *Journal of Electronic Materials*. Vol. 43. № 6. 2014. P. 2247-2254.
5. **Kossyvakis D.N., Vossou C.G., Provatidis C.G., Hristoforou E.V.** Computational and experimental analysis of a commercially available Seebeck module // *Renewable Energy*. Vol. 74. 2015. P. 1-10.
6. **Wenguang Li, Manosh C. Paul, et al.** Multiphysics simulations of a thermoelectric generator // *Energy Procedia*. Vol. 75. August 2015. P. 633-638.
7. **Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A.** Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2 (1). 2015. P. 94-105.
8. **Лобода В.В., Коротков А.С.** Программа для моделирования модулей многоэлементных термоэлектрических генераторов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661985 от 13.11.2015.

ТРЕБОВАНИЯ К ЧИСТОТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В ПРОИЗВОДСТВЕ КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

► В.Л.Евдокимов, С.О.Ранчин
ОАО "НИИМЭ и Микрон"

Сделан анализ требований к технологическим средам, используемым в производстве кристаллов интегральной нанoeлектроники. С учетом особенностей технологии с минимальными размерами элементов нанометрового диапазона, на основе опыта действующего собственного производства и по материалам актуальных публикаций сформулированы основные требования к чистоте технологических сред и линиям их доставки к технологическому оборудованию.

REQUIREMENTS FOR PURITY PROCESS FACILITIES IN THE CHIPS PRODUCTION OF NANOELECTRONIC ICs

V.L.Evdokimov, S.O.Ranchin
JSC "Mikron"

Have made the analysis of the technological requirements of the facilities used in the production of nanoelectronics IC-s. Given the characteristics of chip technology, based on our own experience of the manufacturing and the actual publications, the main requirements to clean facilities and their delivery lines to production equipment.

В отечественном производстве микросхем ближайших двух десятилетий, проектные нормы кристаллов уменьшились до глубоко субмикронного уровня 180–65 нм [1], а в мировом производстве и до 14 нм [2]. Степень интеграции микросхем поколений нанoeлектроники, таких как микропроцессоры и схемы памяти, возросла до миллиона транзисторов (например, на кристаллах "90 нм") и до нескольких миллиардов (для кристаллов последующих поколений). С увеличением количества технологических и контрольных операций изготовления, достигающего тысячи и более, при уменьшающемся критическом размере и плотности поражающих дефектов качественно возрастают требования к инфраструктуре обеспечения производства. Ее основу составляют чистые производственные помещения и системы подготовки и подачи технологических сред. Номенклатура систем обеспечения технологическими средами,

такими как особо чистые газы и жидкости, составляет десятки наименований, а количество линий подключения к комплексу технологического оборудования – сотни единиц. По нашему опыту и актуальным материалам ITRS (International Technology Roadmap Semiconductors 2013 и 1999 г.) [2, 3], допустимый уровень молекулярных загрязнений на позициях обработки пластин, а также вредных примесей в технологических газах и жидкостях не должен превышать миллиардных, а по некоторым примесям и триллионных долей.

При создании систем обеспечения производства кристаллов интегральной нанoeлектроники необходимо рассмотрение требований к используемым средам с точки зрения особенностей технологии кристаллов, необходимых условий эксплуатации оборудования и чистоты линий подключения.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Технология кристаллов поколений нанoeлектроники характеризуется следующими основными особенностями.

- Параметры и надежность интегральных схем в существенной мере ограничивается эффектами, возникающими в чрезвычайно малых и тонких структурах вследствие высоких напряженностей полей и плотностей токов. К таким эффектам относятся туннелирование электронов в подзатворном диэлектрике, подпороговые токи в канале, заброс "горячих" носителей в области канала, включение паразитных тиристорных структур, электромиграция атомов металла в проводниках и др. [4, 5, 6, 7].
- Ключевые процессы изготовления структур носят предельный характер и управляются на атомно-молекулярном уровне. Так, фотолитографический рисунок выполняется с применением приемов сверхразрешения с точностью единиц нанометров, когда размер рисунка существенно меньше длины волны ультрафиолетового излучения при оптической литографии. Характерная толщина подзатворного диэлектрика составляет лишь несколько молекулярных слоев, а шероховатость поверхности кремния перед оксидированием требуется на уровне размера атомов. Транзисторные структуры изготавливаются с применением многомерного легирования в широком диапазоне глубин, углов, доз и энергий с активацией легирующих элементов коротко-импульсным отжигом, исключающим их перераспределение в тонких p-n-переходах. Прецизионные структуры изготавливаются с применением

физико-химических приемов автозаполнения, и глобальной планаризации рельефа [8], а также приемов автоусиления селективности и высокой анизотропности при плазменном травлении многослойных структур с глубоким рельефом.

- С увеличением плотности размещения элементов и уменьшением их размеров при возросшем количестве технологических операций и требованиях к чистоте обработки структур, качественно возрастает вероятность поражения структур вредными микропримесями и микрочастицами, вносимыми технологическими средами, оборудованием и линиями подачи газов и жидкостей.

В табл.1 даны характерные примеры отрицательного влияния отклонений качества воды и некоторых газов на характеристики изготавливаемых структур.

Рассмотрим подробнее роль качества технологических сред на основных этапах изготовления кристаллов интегральной нанoeлектроники.

Структура с эпитаксиальным слоем и боковой изоляцией

Эпитаксиальный слой, выращиваемый на исходной кремниевой подложке (рис.1), призван создавать более совершенную кристаллическую структуру, чем у кремния исходной подложки.

Эпитаксиальный слой практически не наследует побочных примесей металлов, углерода, кислорода и кристаллографических дефектов, присущих исходной подложке. Наряду с тем, что подложка является основным телом и носителем активной структуры кристалла, она служит стоком нежелательных примесей подвижных металлов из активной структуры на геттеризирующие центры в ее объеме. Концентрация легирующей примеси в подложках "P" или "N" типа проводимости обычно составляет 10^{15} - 10^{16} см⁻³, что соответствует поверхностной концентрации порядка 10^{10} - 10^{11} см⁻². С точки зрения допустимой концентрации вносимых поверхностных загрязнений металлами, эти значения могут быть приняты как граничные, при которых электрофизические характеристики уже существенно деградируют. Загрязнения атомами щелочных металлов, прежде всего Na и K, приводят к электрической нестабильности характеристик p-n-переходов, а атомы тяжелых элементов, такие как Cu, Fe, Ni, образуют ловушечные энергетические уровни в запрещенной энергетической зоне полупроводника, приводя к существенному падению времени жизни неосновных носителей

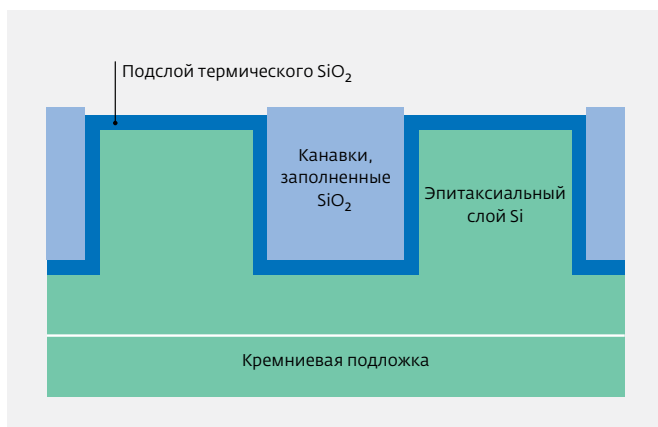


Рис.1. Боковая изоляция

Таблица 1. Влияние загрязнений газов и деионизованной воды на качество структур

№	Критичные операции	Влияние на структуры
1	Химобработка, отмывка	
	Перед подзатворным окислением	Снижение электрической прочности оксида вследствие микрошероховатости Si из-за загрязнений железом и другими металлами
	После ионной имплантации, после осаждения и травления слоев, после химико-механической планаризации	а) б) Деградация электрических характеристик транзисторной структуры и многоуровневой металлизации из-за недостаточной чистоты отмывки поверхности по металлам и микрочастицам
2	Оксидирование кремния	
	Боковая изоляция	Утечки p-n-переходов под областями изоляции
	Подзатворный оксид	Нестабильность порогового напряжения транзисторов из-за металлических примесей
3	Осаждение металлов и диэлектриков	
	Нитрид кремния	Ухудшение свойств из-за примесей SiO вследствие окислителей в газовой среде; для нитрида спейсера-дефекты из-за фазы TiOSiN
	Поликремний затвора	Высокое сопротивление вследствие оксидной фазы из-за примесей влаги или кислорода в азоте при осаждении Si
	Вольфрамовые вертикальные проводники	Нарушение роста W из-за влаги в водороде
	Контакты и проводники Ti, TiN, TaN, Cu, Al	Высокое сопротивление проводников и контактов из-за оксидов вследствие влаги или кислорода в аргоне или азоте
4	Фотолитография	
	Фоторезистовая маска	Искажение рисунка из-за аминовых примесей в воздушной среде или азоте
	Оптика установки	Полимеризация органических примесей на оптике вследствие загрязнения воздушной среды или азота

Примечание. В магистральных газах – примеси H_2O , O_2 , CH_4 , $NH_3 > 5-10$ ppbv, в деионизованной воде примеси Fe, Cu, Ni, Al, B, Na, K, $NH_4^+ > 50$ pptm, в воздушной среде – примеси высоко-молекулярной органики >100 ppbv.

тока. Помимо металлов, примеси атомов углерода в эпитаксиальном слое, вносимые органикой, например, от некачественной деионизованной воды, а также примеси кислорода или влаги в технологических газах, приводят к образованию приповерхностных дефектов упаковки, а примеси железа – и к микрошероховатости поверхности кремния [9]. В эпитаксиальном слое формируются элементы боковой (канавочной) изоляции. Они выполняются в виде узких (порядка 100–200 нм) щелей, заполненных осажденной и планаризованной двуокисью кремния с подслоем термического оксида. Боковая

изоляция предназначена для электрического разделения ячеек и комплементарных пар транзисторов с целью предупреждения включения паразитных тиристорных структур в условиях эксплуатации. Для исключения утечек под областями изоляции и предупреждения включения тиристорной структуры термический оксид, работающий у поверхности раздела в условиях высокой напряженности поля p-n-переходов, должен быть беспримесным по металлам на уровне не более $5 \cdot 10^9$ ат/см² и иметь плотность поверхностных состояний не более 10^{10} ед. заряда/эВ · см² [5].

Транзисторная структура

Наиболее критичным элементом транзисторной структуры (рис.2) является подзатворный диэлектрик. При типичных толщинах диэлектрика около 2,0 нм, работающего в условиях большой напряженности поля, его электрическая прочность должна быть не менее 10^7 В/см, плотность поверхностных состояний не более $5 \cdot 10^{10}$ ед. заряда/эВ·см², подвижный заряд не более 10^9 ед. заряда/см², а ток туннелирования не должен превышать 0,1 А/см² [4, 5].

Указанные характеристики в существенной мере определяются качеством химической обработки и отмывки структур от примесей металлов, галогенов и органики. При типичной поверхностной концентрации активной примеси в области канала транзистора, составляющей от 10^{11} до 10^{12} ат/см², поверхностная концентрация посторонних атомов металлов и углерода органики перед оксидированием не должна превышать $5 \cdot 10^9$ ат/см² [3]. Другими ответственными элементами транзисторной структуры являются поликремниевые затворы, исток-стоковые области и контакты. Они обычно имеют минимальные проектные размеры и, вместе с областями, легированными ионной имплантацией, определяют длину каналов и характеристики транзисторов. Затворы длиной 180–65 нм (и менее) и исток-стоковые контакты столь же малых размеров разделены диэлектрическим спейсером толщиной 150–100 нм. При таких размерах полицидные затворы и контакты формируются приемом самосовмещения. Для этого на затворы со спейсерами и на контактные окна наносится слой титана или кобальта с последующим формированием

локального силицида металла на открытых областях кремния и поликремния. В этом процессе важно обеспечить высокую чистоту наносимого металла по отсутствию оксидной фазы, так как плохо стравливаемая нестехиометрическая оксидная фаза металла на спейсерах способна приводить к дефектности и утечкам. Загрязнение титана или кобальта оксидами может происходить из-за повышенного содержания кислорода или влаги в аргоне, используемом при магнетронном нанесении металла. Опыт показывает, что содержание кислорода и влаги в особо чистых газах не должно превышать значений 1 ppbv (объемная часть на миллиард объема газа).

Многоуровневая система металлизации

Многоуровневая система металлизации (рис.3) включает в себя контактные, металлургические барьерные, и проводниковые металлические слои, а также диэлектрические изолирующие, диффузионно-барьерные и защитные слои. Для кристаллов с проектными нормами 90 нм и менее металлизация изготавливается по технологии "встраивания" проводников в канавки в изолирующем диэлектрике (т.н., технология Damascen) [5].

Металлизация включает в себя до 10 уровней проводников. Для металлических контактных и барьерных слоев используются, соответственно, слои силицида титана, нитрида титана или нитрида тантала, а для проводников – слои меди; для нижнего уровня проводников используется

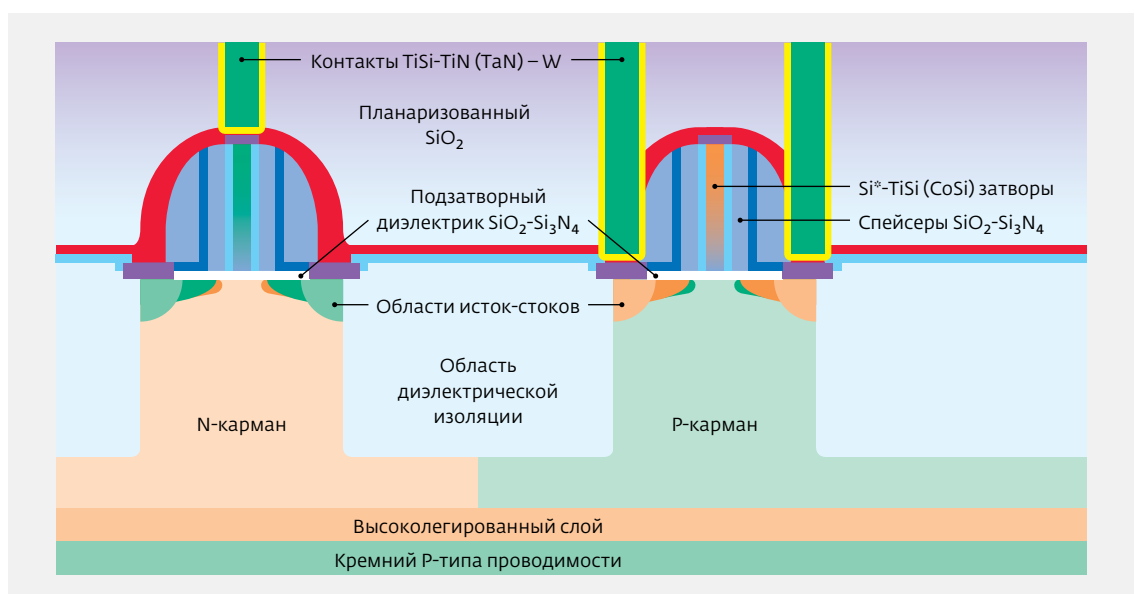


Рис.2.
Транзисторная структура

вольфрам, а для верхнего – алюминий. Контактные и барьерные слои наносятся магнетронным распылением соответствующих мишеней в среде высокочистого аргона или аргона с азотом. Вольфрам наносится газофазным восстановлением его фторида в моносилане и водороде. Медь осаждается химическим методом на медный затравочный слой, нанесенный физическим распылением в едином вакуумном цикле со слоями TaN-Ta. Диэлектрические слои на основе оксида или нитрида кремния и их модификаций наносятся газофазным термическим или плазмохимическим осаждением посредством окисления или нитрирования кремнийсодержащих реагентов, таких как моносилан, тетраэтоксисилан, дихлорсилан и др. Для межуровневой изоляции применяются сложные фторированные или нанопористые диэлектрики с низкой диэлектрической постоянной, которые, наряду с применением медных проводников, призваны уменьшать задержки электрических сигналов и увеличивать быстродействие микросхем. Общей особенностью процессов многоуровневой металлизации является высокая чувствительность процессов нанесения к загрязнениям вносимыми инертными и реакционными газами. Это обусловлено большой реакционной способностью распыляемых металлов и выращиваемых диэлектриков по отношению к примесям воды, органики и кислорода в газах, особенно в условиях плазмы. По требованиям современной технологии [2, 3], удельное контактное сопротивление силицида титана не должно превышать значений $3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, объемное сопротивление проводников $-3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а изоляция должна иметь диэлектрическую проницаемость менее 3,5 (и до 2,0 ед.) при электрической прочности не хуже $5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Для этого химически активные наносимые слои контактов и проводников, особенно W, Ti, Co, TiN, Ta, TaN, Cu, Al, не должны включать в себя оксидной фазы, а диэлектрик должен быть свободен от примесей подвижных щелочных металлов и водорода, а также не иметь загрязнений легко поляризующихся примесей, таких как гидроксилы, силанолы и амины на уровне менее 10^{10} см^{-2} .

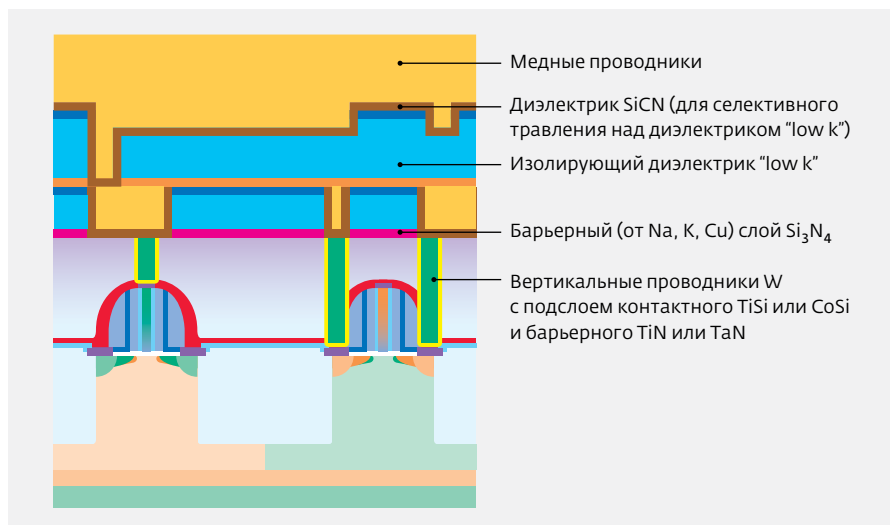


Рис.3. Многоуровневые проводники

КРИТИЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СРЕДАМ

Требования к ряду критичных технологических процессов и к технологическим средам в производстве микросхем микронного и ближнего субмикронного уровня рассмотрены в работе [10]. Требования для глубоко субмикронных проектных норм даны в [2, 3], и основные из них приведены в табл.2-3. Наиболее интенсивно используемым процессом, определяющим чистоту пластин, является жидкостная химическая обработка. В типичном технологическом маршруте глубоко субмикронных кристаллов, содержащем сотни операций, доля жидкостных обработок составляет 15-20%. Жидкостная обработка предназначена главным образом для снижения и предупреждения химических и механических загрязнений, вносимых процессами технологического маршрута. Для этого удаление органических остатков фоторезиста после операции фотолитографии применяется смесь серной кислоты с перекисью водорода с последующей обработкой в изопропиловом спирте и воде, подготовка поверхности кремния перед окислением осуществляется двухстадийной аммиачно-перекисной обработкой (стандартная обработка SC1) с соляно-перекисной обработкой (стандартная обработка SC2).

На стадии SC1 удаляются примеси металлов Cu, Au, Ag, Zn, Cd, Ni, Co, Zn и др. за счет образования растворимых аминовых комплексов. При этом, за счет подтравливания естественного оксида на кремнии, легко удаляются и микрочастицы.

Таблица 2. Требования к качеству обработки на основных операциях

№	Технологические среды	Примеси, не более
1	Воздушные молекулярные загрязнения в зоне пластины, pptv <ul style="list-style-type: none"> • амины, амиды или аммиак (на литографии) • органика (молекулярный вес до 200 ед.) • легкая органика (CH₂ и др.) • примеси Cl, NH₃ (при силицировании Ti, Ta) • легирующие примеси (P, B, As, Sb и их гидриды) 	1 000–750 200–70 3 600–1200 40–10 10
2	Ультрочистая вода <ul style="list-style-type: none"> • общий окисляемый углерод, ppbm • кремний, ppbm • кислород, ppbm • катионы, анионы, металлы Na, K, Ca, Cu, Fe, каждого, pptm • бактерии, колоний/литр • частицы критического размера, шт/мл 	2–1 0,1–0,05 10–3 20 1 0,1
3	Магистральные газы (N ₂ , O ₂ , Ar, He, H ₂) <ul style="list-style-type: none"> • содержание H₂O, CO₂, CH₄, ppbv, каждого • содержание O₂ в инертных газах, ppbv • количество частиц критического размера, част/л 	1 1 0,1
4	Коррозионные и специальные газы (F ₂ , Cl ₂ , HCl, BBr ₃ , NF ₃ , SiH ₂ Cl ₂ , NH ₃ , WF ₆) <ul style="list-style-type: none"> • кислород, ppbv • вода, ppbv • частицы критического размера, част/л 	500 500 2
5	Химические жидкости (HF, H ₂ O ₂ , NH ₄ OH) <ul style="list-style-type: none"> • Fe, Cu, pptm, • катионы, анионы, металлы, ppta, каждого • окисляемая органика в HF, ppbm • комплекс примесей в HCl, H₂SO₄, pptm • K, Li, Na в растворителях и проявителях, ppta, каждого • частицы критического размера, част/мл 	10–1 10–1 30–10 1 000 1 000 0,5

На стадии SC2 эффективно удаляются следы элементов Au, Ag, а также гидроокислы элементов Fe, Mg, Zn. Для минимизации шероховатости поверхности кремния перед формированием подзатворного оксида, помимо очистки от загрязнений железа и других металлов, выполняется обработка в разбавленных растворах [11]. Применяется также кондиционирование поверхности кремния (фторирование в разбавленном растворе HF), что снижает адсорбцию частиц из раствора.

Качество жидкостной обработки в решающей мере определяется чистотой химических реагентов и воды. По данным компании RCA [9], при использовании HF или деионизованной воды, имеющих загрязнения медью на уровне 10¹³ см⁻³, степень загрязнения обработанной поверхности кремния достигает величины 10¹¹ см⁻². Таким образом, для

случая реального производства, когда требуемый уровень поверхностного загрязнения медью перед подзатворным оксидированием не должен превышать 10⁹ ат/см², чистота химии или воды должна соответствовать уровню не хуже 10¹¹ ат/см³. В пересчете на доли к основному веществу это составляет порядка 0,1–0,5 ppbv. Такому уровню по большому перечню металлов должна соответствовать используемая химия. Как пример, в табл.4 показан уровень чистоты соляной кислоты, применяемой нами в производстве кристаллов с проектными нормами 180–65 нм.

С учетом того, что чистота отмывки поверхности от загрязняющих примесей определяется также деионизованной водой, уровень ее чистоты по ряду критичных примесей должен соответствовать единицам на триллион. В табл.5 дан уровень чистоты

Таблица 3. Основные требования к технологическим средам для производства кристаллов поколений 180–28 нм

№	Основные характеристики	180–90 нм	65–45 нм	32–28 нм
1	Химическая подготовка поверхности <ul style="list-style-type: none"> • критический размер частиц, нм • количество частиц, см⁻² • тяжелые металлы (Fe, Ni, Cu), 10⁹ ат/см² • подвижные ионы (Na, K, Ca), 10¹⁰ ат/см² • углерод органики, 10¹² ат/см² • шероховатость поверхности Si, нм 	90–50 0,06–0,05 9,0–3,0 4,3–4,7 7,3–4,1 0,15–0,10	35–25 0,03 2,0–1,8 4,3 2,8–2,0 0,08	18–15 0,02 ≤1,7 ≤4,3 ≤1,7 0,08
2	Фотолитография <ul style="list-style-type: none"> • рассовмещение, нм • точность рисунка, нм • поле экспонирования, мм² • толщина фоторезиста, мкм • длина волны экспонирования, нм • дефектность по частицам крит. размера, см⁻² 	65–35 18–10 450–620 0,72–0,30 248–193 0,05–0,01	25–20 7–5 820 0,28–0,15 193 0,004	15–10 ≤4 ≥820 0,15–0,10 193* ≤0,002
3	Процессы транзисторной структуры <ul style="list-style-type: none"> • толщина подзатворного диэлектрика, нм • материал подзатворного диэлектрика • утечки диэлектрика, 10⁻⁹ А/мкм² • удельное сопротивление затвора, 10⁻⁶ Ом·см • сопротивление контактов TiSi, 10⁻⁶ Ом·см² • глубина р-п-переходов стока и истока, нм • дефектность, част/см² (размер частиц ≥ ½ проектной нормы) 	2,5–1,0 SiON 5–20 70–33 0,3–0,1 150–35 0,12–0,04	1,2–0,6 SiON 40–80 23–16 0,05–0,03 55–20 0,012–0,005	≤0,6–0,5 SiONTaO 160 ≤11 <0,02 35–15 0,002
4	Процессы многоуровневых проводников <ul style="list-style-type: none"> • число уровней, шт • материалы структуры проводников • сопротивление проводника, 10⁻⁶ Ом·см • материал изолирующих диэлектриков • диэлектрическая проницаемость • дефектность, частиц/см² (размер частиц ≥ ½ проектной нормы) 	6–9 W, TiN, Al 3,3–2,2 SiOF 3,8–3,5 0,14–0,05	9–10 W, TaN, Cu 3,3–2,2 SiOC-нанопор, 2,8–2,5 0,013–0,005	10 W, TaN, Cu 2,2 SiOC-нанопор, 2,5–2,2 0,003
	Эффективная общая дефектность по электрическим измерениям, деф/см ²	0,12–0,10	0,08–0,07	0,06

деионизованной воды по ряду примесей в производстве указанных кристаллов.

Пластины с кристаллами проходят обработку по большому комплексу физико-термических процессов, таких как оксидирование кремния, ионная имплантация легирующих примесей, нанесение и плазменное травление слоев диэлектриков и металлов, термообработка, и по другим процессам, чувствительным к чистоте технологических сред. При этом чистота потребляемых магистральных газов по содержанию влаги и кислорода на этих операциях должна соответствовать уровню не хуже

1 ppbv. Специальные газы (галогениды, гидриды, фреоны и др.) сертифицируются поставщиками по допустимым примесям (например, Cl в газе HCl или в SiH₂Cl₂) на уровне 10–100 ppbv. Физико-термические процессы, в силу таких особенностей, как перенос атомов в плазме, накопление осадка в рабочих камерах, наличие переходных процессов откачки и напуска газов и др., способны вносить и собственную дефектность. Так, загрязнение металлами на плазменных операциях может достигать 10¹³ см⁻², а отклонения по привнесенной дефектности по микрочастицам до 0,1–1,0 см⁻². Требуемый

Таблица 4. Концентрация примесей в соляной кислоте по сертификату поставщика

№	Примеси	Значение, max, ppbm
1	Серебро	0,1
2	Алюминий	0,5
3	Мышьяк	0,1
4	Золото	0,1
5	Бор	0,5
6	Барий	0,1
7	Бериллий	0,1
8	Висмут	0,1
9	Кальций	1,0
10	Кадмий	0,1
11	Кобальт	0,1
12	Хром	0,1
13	Медь	0,1
14	Железо	0,75
15	Галлий	0,1
16	Калий	0,2
17	Литий	0,1
18	Магний	0,3
19	Натрий	0,2
20	Никель	0,1
21	Марганец	0,1
22	Молибден	0,1
23	Свинец	0,1
24	Платина	0,1
25	Сурьма	0,1
26	Олово	0,1
27	Стронций	0,1
28	Титан	0,1
29	Таллий	0,1
30	Ванадий	0,1
31	Цинк	0,2
32	Цирконий	0,1
33	Галогены	500
34	Фосфаты	30
35	Сульфаты	200
36	Сульфиты	500

Таблица 5. Содержание характерных примесей в деионизованной воде

№	Ионные и атомные примеси	Концентрация, не более, ppt
1	SiO ₂	200
2	NH ₃ ⁺	5
3	Br ⁻	20
4	Cl ⁻	20
5	F ⁻	20
6	NO ₃ ⁻	20
7	NO ₂ ⁻	20
8	PO ₄ ⁵⁻	20
9	SO ₄ ³⁻	20
10	Al	5
11	Ba	5
12	Be	5
13	Bi	5
14	Pb	5
15	B	20
16	Cd	5
17	Ca ²⁺	5

уровень чистоты по примесям металлов $\leq 5 \cdot 10^9$ ат/см² на транзисторной структуре и $< 10^{10}$ ат/см² на операциях металлизации достигается главным образом отмывкой пластин в ультрачистой воде.

ТРЕБОВАНИЯ К УСЛОВИЯМ ПРОИЗВОДСТВА И ЛИНИЯМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Помимо требований к технологическим средам, качество которых обеспечивается системами подготовки, уровень и стабильность технологических процессов зависит от условий для надлежащего функционирования оборудования и от чистоты создаваемых линий подключения к системам подачи газов и жидкостей.

Общая характеристика технологического оборудования

Технологическое оборудование предусматривает ряд мер, направленных на обеспечение низкой дефектности. Установки индивидуальной обработки пластин имеют кластерную конфигурацию с несколькими смежными камерами, объединенными

перегрузочным роботом. Это позволяет снизить приносимую дефектность смежных интегрированных процессов за счет сокращения числа перегрузочных манипуляций. Для снижения дефектности на установках газофазного осаждения и травления слоев предусматривается также периодическое травление камер от накапливающегося осадка в плазме фторида азота. На установках групповой термической обработки, загрузка пластин в кассеты и в реактор осуществляется в ультрачистом азоте. На всех типах установок предусматривается роботизированная загрузка – выгрузка пластин из транспортного контейнера и обратно через SMIF-порты (стандартный механический интерфейс) в потоке дополнительно обеспыленного воздуха в зоне манипуляции.

К условиям эксплуатации наиболее чувствительно фотолитографическое оборудование, требующее поддержания уровня воздушной среды по классу не хуже ИСО 5 (10^5 частиц/м³, размер частиц $\geq 0,1$ мкм) с точностью поддержания температуры $21 \pm 0,5^\circ\text{C}$, влажности 433% и уровнем вибрации на частотах до 100 Гц не более 6–7 мм/с. Чистота воздушной среды на позиции непосредственной обработки должна соответствовать классу "ИСО 2" (10^2 частиц/м³, размер частиц $\geq 0,1$ мкм). Это обеспечивается условиями чистой комнаты, фильтрами на оборудовании, а также применяемой в производстве технологией межоперационного перемещения и хранения пластин в SMIF-контейнерах. При этом пластины загружаются в оборудование через шлюзы SMIF-портов, которые имеют собственную дополнительно фильтруемую воздушную среду. Для формирования качественной фоторезистивной маски, чистота воздушной среды по аминам, амидам и аммиаку, кислотам и щелочам в зоне непосредственной обработки пластин должна соответствовать уровню не хуже 2–5 ppbм. Так как оптика установки экспонирования чувствительна к высокомолекулярной конденсирующейся органике, особенно, содержащей серу, фосфор и кремний, уровень загрязнения воздушной среды по этим примесям не должен превышать 100–300 pptm. Высокие требования к чистоте воздушной среды предъявляются также на операциях формирования подзатворного диэлектрика, затворов и контактов, где скорость захвата легирующих элементов III–V групп и органики не должна превышать 10^{10} ед/см² за неделю [2]. Это примерно соответствует уровню порядка 10^9 ат/см² на одну операцию при коэффициенте захвата близкому к единице. При условии применения SMIF-логистики, качество чистоты воздушной среды на участках, кроме

участка фотолитографии, допускается на уровне "ИСО 6".

При проектировании производственных помещений должны учитываться также технологические особенности процессов, способных вносить перекрестные загрязнения. Так, участок ионной имплантации, использующий летучие газы легирующих элементов, отделяется от термического участка, оборудование цикла медной металлизации, способное вносить загрязнения металлом, отделяется от цикла транзисторной структуры, участок химико-механической планаризации, генерирующий повышенную дефектность, отделяется от фотолитографии и других участков.

К системам энергетического обеспечения участков относятся электропитание, сжатый воздух, сервисный азот и кислород, магистральный вакуум, охлаждающая вода, вытяжная вентиляция, стоки. Характеризуя системы по основным требованиям, силовое электроснабжение должно быть бесперебойным и стабилизированным по напряжению не хуже $\pm 5\%$, сжатый воздух, питающий клапаны, должен быть осушенным до точки росы 75°C и очищенным от частиц и органики, охлаждающая вода должна быть деминерализована и иметь проводимость не более 100 мкСименс/см. Сервисный азот, применяемый для исключения возгорания и коксования в вакуумных насосах, а также сервисный кислород, используемый для горелок скрубберов, допускаются по степени очистки от влаги на уровне 30–70 pptm (частей на миллион). Магистральный вакуум, контактирующий с обрабатываемыми пластинами, должен быть свободен от паров масла, вентиляция и стоки должны быть разделены по видам выбросов и нейтрализоваться специальными скрубберами.

Отмечая необходимость надежности и чистоты систем подачи технологических газов, жидкостей и энергоносителей, и с учетом опыта создания производства уровня "180–65 нм", рассмотрим основные требования к линиям подключения оборудования.

Основные материалы и узлы линий подключения

Трубопроводы подключения особо чистых магистральных газов (N_2 , O_2 , Ar , He , H_2), коррозионных, пирофорных и токсичных специальных газов (Cl_2 , F_2 , NH_3 , WF_6 , NF_3 , O_3 , гидриды и галогениды кремния, бора, фосфора, фреоны и др.) выполняются из нержавеющей стали с внутренней электрохимической полировкой класса $R_a=0,13$ мкм. Для предупреждения загрязнения газов рекомендуется

использование хромо-никелевой низкоуглеродистой аустенитной стали типа SS 316L, обеспечивающей высокую устойчивость к коррозионным газам и эффективную автопассивацию поверхности оксидами хрома и железа при нагреве в процессе орбитальной сварки. Для внешних коаксиальных труб линий специальных газов (внешние трубы предусматриваются для безопасной эксплуатации линий по утечкам агрессивных газов) используется менее дорогая нержавеющая сталь типа SS 304. На линиях сверхчистых инертных газов предусматриваются оконечные фильтры тонкой очистки типа WC2F или аналогичные, с размером улавливаемых частиц 0,02-0,05 мкм с эффективностью фильтрации не хуже 30 частиц/м³. Для разъемных соединений линий применяются прокладки из нержавеющей стали, либо – более пластичные – из никеля. Однако использование никелевых прокладок не допускается для линий подачи гидридов, двуокиси и моноокси углерода, так как никель оказывает каталитическое воздействие на газы с образованием частиц окисленных гидридов и карбониллов в трубопроводе.

Для деионизованной воды используются трубопроводы из высокочистого фтор-полимерного материала типа PVDF HP с внутренней шероховатостью не более 2 мкм. Для трубопроводов кислот и щелочей применяется материал PFA HP с тем же показателем микрошероховатости. Внешние коаксиальные трубы линий химических жидкостей выполняются из поливинилхлорида. На линиях подключения химии и деионизованной воды предусматриваются оконечные фильтры типа Dugarol с размером фильтруемых частиц более 0,02-0,05 мкм.

Вытяжная вентиляция коррозионных сред выполняется из нержавеющей стали SS 304 или из черной стали, футерованной полимерным покрытием PFA, для общеобменной вентиляции и органики применяется оцинкованная сталь. Для линий стоков кислот используется материал PVDF, для стоков щелочи и суспензии – материал типа PPH.

Для надежного подключения силовой электроэнергии используются гибкие, удобные для подключения в электрических шкафах, пятижильные медные кабели типов Olflex classic и КГВВ. На линиях монтируются устройства защиты типа Legrand, либо их аналоги. Сигнальные линии запроса подачи химии и линии IT-связи выполняются экранированными кабелями типа FTP. Для предупреждения электрических наводок, кабели управления укладываются отдельно от силовых линий.

Для исключения нестабильности и дефектности обработки из-за возможного накопления

в трубопроводах жидкости конденсирующихся газов (BCl₃, C₄F₆, WF₆, SiCl₂H₂ и др.), а также конденсирующихся продуктов в выхлопных магистралях насосов, предусматриваются нагреватели трубопроводов. Для питания нагревателей могут применяться многоканальные контроллеры типа Horst или SAF Warmetechnik, обеспечивающие температуру от 25 до 150°C с точностью поддержания ± 1°C. Системы подачи опасных газов оснащаются датчиками утечек типа Vionix с точками отбора в газовых боксах оборудования. Для контроля утечек жидкостей применяются датчики типа IFM-E, монтируемые в нижних точках линий химических жидкостей и в боксах, где расположены фильтры. Перечень основных типов линий подключения и требования к их составу и качеству приводятся в табл.6.

Испытания и квалификация линий

Отдельными согласованными процедурами и методиками определяются условия испытаний, измерительные приборы, схемы подключения к линиям, критерии приемки. Газовые и вакуумные трубопроводы испытываются на прочность и плотность с выдержкой под давлением. Вакуумная герметичность проверяется по методике натекания гелия. После монтажа и необходимой десорбции от посторонних газов посредством достаточно длительной (12-48 ч) продувки линий ультрачистым азотом, они квалифицируются по содержанию следов влаги, кислорода и по наличию микрочастиц в выдуваемом азоте. Следы влаги и кислорода в негерметичных или плохо продутых трубопроводах наиболее опасны для линий гидридов и галогенидов из-за возможного образования продуктов окисления и накопления в них микрочастиц при эксплуатации.

Испытания газовых линий на прочность и плотность выполняется, соответственно, при давлении 10 бар (длительность 2 ч) и 8 бар (длительность 24 ч) с допуском на падение давления не более 1% от номинального. При расчете изменения давления учитывается изменение температуры за период испытаний. Герметичность по натеканию гелия должна быть не хуже 10⁻⁹ мбар·л/с при разряжении тестирования в трубопроводе не хуже 10⁻⁵ Торр. Для контроля содержания влаги в газовых линиях используется продувочный азот из заранее квалифицированной системы подачи с содержанием влаги или кислорода не более 1 ppbv. Содержание влаги и кислорода в тестируемом трубопроводе, допустимое для начала наладочных работ на оборудовании, не должно превышать 5 ppbv, а количество микрочастиц, размером более 0,1 мкм, – не выше

Таблица 6. Перечень основных типов линий подключения, и требования к их составу и качеству

№	Линии	Материалы	Требования к линиям
1	Ультрачистые газы N ₂ , Ar, He, O ₂	Сталь SS316L, электрохимическая полировка, Ra 0,13 мкм, орбитальная сварка, уплотнения из нерж. стали	Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Герметичность 0,1 бар при 1,2 P _{раб} , 24 ч Натекание He ≤ 1 · 10 ⁻⁹ мбар*л/с Частицы ≥ 0,1 мкм, ≤ 30 част/м.куб H ₂ O, O ₂ , ≤ 10 ppb в N ₂
2	Сервисные линии а) N ₂ , O ₂ сервисный, сжатый воздух, б) вакуум магистральный в) линии вакуумных насосов г) выхлоп насосов	Сталь SS 316L, механическая полировка, Ra 0,4 мкм, орбитальная сварка, уплотнения: а), б) SS304, для в) и г) витон	а) Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Герметичность 0,1 бар при 1,2 P _{раб} , 24 ч Частицы ≥ 0,2 мкм, ≤ 30/част м.куб б) Герметичность ±1% при 1 бар, 24 ч в) Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Натекание He ≤ 1 · 10 ⁻⁹ мбар · л/с
3	Специальные газы	SS 316L, внутренняя труба электрохимическая полировка, Ra 0,13 мкм, внешняя труба – механическая полировка, Ra 0,4 мкм	Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Герметичность 0,1 бар при 1,2 P _{раб} , 24 ч Натекание He ≤ 1 · 10 ⁻⁹ мбар · л/с Частицы ≥ 0,02 мкм, ≤ 30 шт/м куб, H ₂ O, O ₂ ≤ 10 ppb в N ₂
4	а) Проявители б) Органические растворители	а) Внутренняя труба – PFA, внешняя коаксиальная – PVC б) Внутренняя труба – PFA, внешняя – SS304	Испытания в N ₂ Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Герметичность 0,1 бар при 1,2 P _{раб} , 24 ч
5	Деионизованная вода	PVDF-HP, шероховатость внутренней поверхности ≤ 2 мкм	Испытания в деионизованной H ₂ O Прочность 0,1 бар при 10 бар, 24 ч Сопротивление ≥ 18 МОм · см Углерод органики, ТОС ≤ 0,6 ppb Частицы (≥ 0,1 мкм) ≤ 1 част/мл
6	Жидкости для химобработки а) Кислоты б) Щелочи в) Перекись водорода	Внутренняя труба PFA, внешняя коаксиальная труба PVC	Испытания в N ₂ Прочность 0,1 бар при 1,5 P _{раб} , 2 ч Герметичность 0,1 бар при 1,2, P _{раб} , 24 ч Частицы (≥ 0,1 мкм) ≤ 1,0 част /мл

60 частиц/м³. Для контроля микрочастиц, влажности и примесей кислорода могут использоваться приборы, соответственно, типов LASAIR II-110, Michel PURA и Delta F-550E или их аналоги. Для гелиевого контроля герметичности может быть использован течеискатель типа Pfeiffer HLT 570.

Испытания пластиковых линий подачи деионизованной воды и химии на плотность рекомендуется проводить при давлении азота 5 бар (24 ч), с допустимым падением давления – не более 0,1 бар. Линии подключения деионизованной воды и химии испытываются на отсутствие загрязнений потоке заранее квалифицированной воды с сопротивлением не менее 18,2 МОм · см, и величиной показателя

наличия окисляемой органики (ТОС) не более 0,5 ед. Основные параметры квалификации линий подключения деионизованной воды могут быть измерены прибором типа АТОС – 200S.

Линии вытяжной вентиляции (тепловая, кислотная, щелочная, органическая) настраиваются после наладки на проектные значения по расходу и разрежению в точках подключения каждой установки к центральным воздуховодам. Затем каждый тип вентиляции настраивается в разветвленных точках потребления (на входе в оборудование). Разрежение, в соответствии с документацией на конкретную установку обычно должно составлять не менее 300–500 Па. В отдельных случаях,

например, для установки быстрой термической обработки, где технологический процесс сильно зависит от разрежения в реакторе, подключенном к вентиляции, оно должно составлять 800–1000 Па со стабильностью не хуже ± 50 Па. Стабильность поддерживается настраиваемыми автоматическими клапанами на воздуховоде. Для настройки вентиляции могут применяться дифманометр ДМЦ 01М, расходомер ультразвуковой Portaflow и электроанемометр типа Testo-425.

Электрические силовые линии подключения оборудования испытываются в соответствии с ГОСТ 30331.3–95, ПУЭ и МВИ 539–2011 по сопротивлению изоляции не менее 0,5 МОм, сопротивлению заземления не более 1 Ом и времени срабатывания автоматического защитного устройства не более 5 с, а также по коэффициенту кратковременного превышения тока короткого замыкания от номинала защитного устройства, который не должен превышать 100 крат.

Порядок подачи энергоносителей, технологических газов и жидкостей

Ввод линий подключения в эксплуатацию (включение подачи, заполнение, контроль хода и номиналов подачи) выполняется в два основных этапа. На первом этапе подаются энергоносители и инертные газы. После проверки номиналов подаваемых энергоносителей (напряжение, давление, расход) технологическое оборудование включается для его наладки и испытаний на холостом ходу (без обработки пластин). На втором этапе подаются специальные газы и химические жидкости. К этому этапу системы утилизации спецгазов и химических жидкостей, а также системы сигнализации утечек должны функционировать и быть аттестованными. Линии конденсирующихся газов и паров, таких как BCl_3 , WF_6 , C_4F_6 , SiH_2Cl_2 , $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ выводятся на режим штатного прогрева – до температуры 35–40°C. Вакуумные и выхлопные линии от камер установок с конденсирующимися выхлопами прогреваются на участке от насосов до скрубберов до температуры 90–110°C. В процессе подачи специальных газов делается многократное (3–5 циклов) заполнение и откачка линий подключения и газовых систем технологического оборудования. Внутренние поверхности линий активных фторсодержащих газов, таких как WF_6 , F_2+Ar , F_2+Kr , предварительно пассивируют посредством выдержки в рабочем газе в течение не менее четырех часов. Образующаяся пленка фторида железа предупреждает возможное загрязнение газа от материала

трубы. После указанных процедур выполняется аттестация технологических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструктивные и технологические особенности интегральной нанoeлектроники выдвигают особые требования к чистоте применяемых технологических сред и материалов. Эти требования обусловлены как возросшей поражаемостью прецизионных структур с ростом уровня их интеграции, так и предельными электрофизическими условиями функционирования.

В соответствии с практическим опытом производства кристаллов с размерами 180–65 нм и актуальными требованиями по материалам международных экспертов (ITRS 2013 и др.), допустимый уровень поверхностных загрязнений щелочными и щелочноземельными металлами, атомами III и V групп и атомами тяжелых металлов не должен превышать значений 10^9 ат/см² на этапе формирования транзисторной структуры, и 10^{11} ат/см² – на этапе изготовления металлизации. Степень загрязнения поверхности микрочастицами критического размера не должна превышать 0,02 част/см², а для меньших проектных норм – и до 0,002 част/см². Чистота поверхности по металлам и частицам в существенной мере определяется межоперационной гидромеханической обработкой структур в ультрачистой деионизованной воде, снижающей дефектность, вносимую на других операциях. Концентрация критичных загрязнений деионизованной воды, как наиболее чистой технологической среды, определяющей бездефектность обработки, должна соответствовать уровню нескольких единиц на триллион основного вещества.

Неотъемлемыми элементами нанoeлектронного производства являются системы подготовки и доставки ультрачистых технологических газов и жидкостей. Главным требованием к комплексу линий подключения технологического оборудования к системам обеспечения является незагрязненность подаваемых чистых сред. Это достигается как выбором чистых материалов и узлов монтируемых линий, так и высокими требованиями к условиям их испытаний и квалификации. Для исключения возможного накопления загрязняющих продуктов герметичность линий технологических газов по гелию должна быть не хуже 10^{-9} мбар·л/с, содержание десорбирующихся молекул кислорода и влаги не более 1 ppbv, а подготовленные и промытые линии химических жидкостей и деионизованной воды должны соответствовать уровню исходной

деионизованной воды с сопротивлением не менее 18 МОм·см.

Успех производства кристаллов интегральной нанoeлектроники в решающей степени определяется комплексностью учета требований к технологии, оборудованию и системам обеспечения высокочистыми средами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я., Орлов О.М.** Отличительные особенности и проблемы КМОП технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. Т. 3. № 7. С. 124-128.
2. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2013 г.
3. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 1999 г.
4. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. С. 112-119.
5. **Yeо K.-S., Rofail S.S., Goh W.L.** CMOS/BiCMOS ULSI Low Voltage, Low Power. Prentice Hall Modern Semiconductor Design Series. Prentice Hall PTR. New Jersey. 2001. 624 p.
6. **Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Матюшкин И.В.** Структурно-примесные комплексы в системе кремний-диоксид кремния // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2000. № 3. С. 39-47.
7. **Красников Г.Я.** Взаимосвязь структурнопримесных и электрофизических свойств системы Si-SiO₂ // Электронная техника. Серия 3: Микро- и нанoeлектроника. 1996. № 1. С. 67-68.
8. **Красников Г.Я., Дягилев В.Н., Сулимин А.Д., Шишко В.А., Волк Ч.П.** Решение проблемы планаризации рельефа СБИС при переходе к топологическим нормам менее 1 мкм // Электронная промышленность. 1995. № 6. С. 5-7.
9. **Kern W.** The evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology // J. of Electrochemical Society. 1990. Vol. 137. N 6. P. 3-9.
10. **Красников Г.Я., Зайцев Н.А.** Физико-химические основы обеспечения качества СБИС. – М.: Микрон-принт, 1999. Ч. I. С. 26-72.
11. **Кирюшина И.В., Красавина Л.З., Просий А.Д., Селиванова И.Н., Яснов В.С.** Процессы очистки кремниевых пластин в модифицированных аммиачно- и соляно-перекисных растворах // Известия вузов. Электроника. 2004. № 1. С. 6-8.

ИНФОРМАЦИЯ О БЛИЖАЙШИХ КОНФЕРЕНЦИЯХ

РКЭМ-2016

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов" Российской академии наук (ИПТМ РАН) сообщает, что с **30 мая по 3 июня 2016 года** в рамках Международного форума "Техноюнити – РКЭМ 2016" будет проведена XXVI Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ-2016). Место проведения – **г. Москва, Зеленоград.**

На площадках Форума будут представлены крупнейшие производители оборудования для микроэлектроники, проведены научно-практические школы для студентов и молодых ученых, организованы бизнес-форумы и круглые столы по различным тематикам. Предполагается организация

экскурсий на профильные предприятия г. Зеленограда. "

Организаторы:

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН) – Организатор;
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН (ИК РАН) – соорганизатор;
- "ТЕХНО ЮНИТИ" Зеленоградский инновационный кластер – соорганизатор;
- КАЗЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ г. Москвы "Корпорация развития Зеленограда" – соорганизатор.

КРЕМНИЙ 2016

XI Конференция и X Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе "Кремний-2016". **12–15 сентября 2016 году**, Новосибирск.

Эта конференция является продолжением серии научных конференций, посвященных кремнию. Свою историю она ведет с общероссийского совещания по кремнию, проведенного в МИСиС в 1999 году. С 2000 года параллельно с конференцией проводится Школа для молодых ученых и специалистов.

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 полу-

чение 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.

Организаторы:

- Федеральное государственное учреждение науки "Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова" Сибирского отделения Российской академии наук. Веб-сайт: www.isp.nsc.ru.
- Федеральное государственное учреждение науки "Институт неорганической химии им. А.В.Николаева" Сибирского отделения Российской академии наук. Веб-сайт: www.niic.nsc.ru.

МЭС-2016

VII Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем" посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования микроэлектронных систем, систем на кристалле, IP-блоков и новой элементной базы микро- и наноэлектроники. Эти вопросы были и остаются актуальными для науки и техники, о чем свидетельствует тема-

тика соответствующих крупнейших ежегодных международных конференций по САПР и разработке микро- и наноэлектронной аппаратуры.

Место проведения Зеленоград 3–7 октября 2016 г.

Организатор: Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППИМ РАН).

ICMNE-2016

Международная конференция "Микро- и нано-электроника – 2016" (ICMNE-2016), включающая расширенную сессию "Квантовая информатика" (QI-2016), будет проводиться **3–7 октября 2016 года в д/о "Ершово", Звенигород, Московская область, Россия.**

Конференция ICMNE проводится один раз в два года и охватывает большинство областей физики микро- и наноразмерных приборов, а также микро- и нанoeлектронных технологий. ICMNE-2016 будет сконцентрирована на освещении последних достижений в этой сфере. На конференции будет работать выставка, посвященная технологическому и диагностическому оборудованию для микро- и нанoeлектронных применений.

Организаторы и спонсоры:

- Физико-технологический институт, Москва, Россия;
- ОАО "НИИМЭ и Микрон", Зеленоград, Россия;

- Российский фонд фундаментальных исследований, Москва, Россия;
- Российская академия наук, Отделение нанотехнологий и информационных технологий;
- Научный совет РАН по физическим и химическим основам полупроводникового материаловедения;
- SPIE – The International Society for Optical Engineering, USA – the publisher of the Conference proceedings;
- Институт физики полупроводников, Новосибирск, Россия;
- Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия;
- Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова, Ярославль, Россия;
- TechnoInfo Ltd., Wembley, UK;
- Компания НИКС, Москва, Россия;
- ЗАО "НТО" (SemiTEq), Санкт-Петербург, Россия.

ОПЕЧАТКИ, ОБНАРУЖЕННЫЕ В №4(160), 2015 Г.

Статья: Анализ устойчивости ПС СВЧ диапазона к воздействию внешних факторов. с.74, абзац 5, столбец 1, строка 7:

Следует читать: Поглощенная доза ионизирующего излучения (ИИ) образцов составила $D \approx 56$ кРад.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СМАРТ-КАРТ НА РОССИЙСКОМ И МЕЖДУНАРОДНОМ РЫНКАХ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЙ АО "НИИМЭ"

Работа посвящена системам радиочастотной идентификации (RFID), в том числе, разработанным в АО "НИИМЭ", актуальность которых непрерывно возрастает в области систем социального и промышленного назначения. В статье рассматривается история развития продуктовой линейки RFID изделий на базе кристаллов собственной разработки АО "НИИМЭ" для карт памяти и микропроцессорных карт, суммарный объем поставок которых на сегодняшний день превышает миллиард штук. Отдельно для смарт-карт рассматриваются возникающие в процессе работы вопросы требований по сертификации в зависимости от области применения, а также необходимость унификации применяемых решений для совместимости инфраструктуры при использовании различных продуктов.

Ключевые слова: RFID, смарт-карты, микропроцессорные карты, карты памяти.

Сведения об авторах:

Нуйкин Андрей Валерьевич, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: anuykin@mikron.ru, тел.+79263380022

Кравцов Александр Сергеевич, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; e-mail: akravtsov@mikron.ru;

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО КОММУТАТОРА ДЛЯ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований прототипа OpenFlow коммутатора, использующего отечественные компоненты. Приведено описание стэнда, входящих в его состав компонент, потоков данных и потоков управления. Приведены оценки результатов исследования, сделаны выводы о перспективах развития построенного решения.

Ключевые слова: импортзамещение, программно-конфигурируемые сети (SDN), протокол OpenFlow, коммутационное оборудование, телекоммуникации, компьютерные сети.

Сведения об авторах:

Смелянский Руслан Леонидович, д. ф. – м. н., проф. МГУ им. М.В. Ломоносова, Некоммерческое партнерство "Центр прикладных исследований компьютерных сетей" Россия, 142784, г. Москва, поселение Московский, дер. Румянцево, стр.1, офис 407Б; e-mail: rsmeliansky@arccn.ru

Васин Вячеслав Викторович, vvasin@arccn.ru

Беззубцев Станислав Олегович; Некоммерческое партнерство "Центр прикладных исследований компьютерных сетей" Россия, 142784, г. Москва, поселение Московский, дер. Румянцево, стр.1, офис 407Б; sbezbtsev@arccn.ru

ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С УПРАВЛЯЕМЫМ ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА ОСНОВЕ БИСТАБИЛЬНОГО МУЛЬТИВИБРАТОРА И ПОЛЕВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Разработан датчик магнитного поля с частотным выходом (ДЧВ) на основе бистабильного мультивибратора, использующий оригинальный чувствительный элемент – полевой датчик Холла (ПДХ). Конструкция ПДХ совмещает полевой МДПДМ-транзистор и традиционный кремниевый элемент Холла, что позволяет ему, наряду с регистрацией магнитного поля, ощущать динамическую подстройку исходной частоты ДЧВ. В работе обсуждаются пути оптимизации разработанного ДЧВ. Экспериментальная магнитная чувствительность ДЧВ составляет 2 кГц/мТл при частоте около 400 кГц.

Ключевые слова: датчик магнитного поля, частотный выход, бистабильный мультивибратор, полевой датчик Холла

Сведения об авторах:

Малых Антон Александрович; Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119991, Москва, ул. Профсоюзная, д. 83–3, 1009; e-mail: malykhanton21@gmail.com
Мурашев Виктор Николаевич, д. т. н.; Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119991, Москва, ул. Профсоюзная, д. 83–3, 1009; e-mail: vnmurashev@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ БМК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящей статье рассматривается метод проектирования цифровых микросхем с использованием стандартных элементов в приложении к базовым матричным кристаллам. Описаны основные преимущества и недостатки данного подхода. Также представлен маршрут разработки библиотеки стандартных элементов.

Ключевые слова: стандартные элементы, логические вентили, БМК

Сведения об авторах:

Индеккер Леонид Георгиевич; АО "НИИ молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; e-mail: lndekker@mikron.ru

Шмигельский Владимир Николаевич; АО "НИИ молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; e-mail: vshmigelskiy@mikron.ru

Эннс Виктор Иванович, к. т. н.; АО "НИИ молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; e-mail: venns@mikron.ru

RFID FOR DOMESTIC AND INTERNATIONAL MARKETS BASED ON JSC MERI CHIPS.

This paper presents RFID systems designed by JSC MERI. The relevance of RFID systems for social and industrial needs is steadily growing. The paper examines in particular a history of the RFID solutions development produced on the base of JSC MERI chips for smart cards. The total amount of cards production currently accounts for 1 billion pieces. The issues of smart-cards certification for different appliances and unification of solutions aimed at infrastructure compatibility are also disclosed in the present paper.

Keywords: RFID, smart card, microprocessor card, memory card.

Date of authors:

Andrey Nuykin, JSC Molecular Electronic Research Institute 124460, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, anuykin@mikron.ru +79263380022)

Alexander Kravtsov; JSC Molecular Electronic Research Institute 124460, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, akravtsov@mikron.ru.

DEVELOPMENT OF THE FIRST RUSSIAN SDN-SWITCH

This paper presents the results of experimental researches of an OpenFlow-switch prototype that uses Russian electronic components. Testbed and its components, data and control flows are described, obtained research results are estimated and conclusions on the prospects of the solution development are made.

Keywords: Software-Defined Networks, SDN, OF-switch, OpenFlow protocol, telecommunications, networking, import substitution.

Date of authors:

Ruslan Smeliansky, Dr.Sci., professor; Applied Research Center of Computer Networks, 142784, Moscow reg., Leninsky District, Rumyantsevo Village Business Park "Rumyantsevo", building 1, suite 407B; e-mail: rsmeliansky@arccn.ru

Vyachslav Vasin; Applied Research Center of Computer Networks, 142784 Moscow reg., Leninsky District, Rumyantsevo Village Business Park "Rumyantsevo", building 1, suite 407B, e-mail: vvasin@arccn.ru

Stanislav Bezbtsev; Applied Research Center of Computer Networks, 142784 Moscow reg., Leninsky District, Rumyantsevo Village Business Park "Rumyantsevo", building 1, suite 407B; sbezbtsev@arccn.ru

THE MAGNETIC FIELD SENSOR WITH CONTROLLABLE FREQUENCY-OUTPUT ON THE BASE OF THE BISTABLE MULTIVIBRATOR AND THE FIELD-EFFECT HALL SENSOR AS THE SENSING ELEMENT

The magnetic frequency-output sensor (FOS) based on the bistable multivibrator construction that uses an original sensing element – the field-effect Hall sensor (FEHS) is developed. FEHS combines the field-effect double-gate MOS transistor and the conventional Hall sensor in the same construction. This allows to measure the magnetic field as well as to implement dynamic adjustment of the initial frequency of the FOS. The paper discusses ways to optimize the developed magnetic field FOS. The experimental value of magnetic sensitivity is 2kHz/mT at the frequency of about 400kHz.

Keywords: magnetic field sensor, frequency-output, bistable multivibrator, field-effect Hall sensor

Date of authors:

Malykh Anton Aleksandrovich; National University of Science and Technology "MISIS", 119991, Moscow, Profsoyuznaya st., b. 83–3, 1009; e-mail: malykhanton21@gmail.com

Murashev Victor Nikolaevich, ph. D.; National University of Science and Technology "MISIS", 119991, Moscow, Profsoyuznaya st., b. 83–3, 1009; e-mail: vnmurashev@mail.ru

DEVELOPMENT OF DIGITAL IC BASED ON GA USING STANDARD CELLS

In this article the method of development of digital IC based on GA using standard cell library is considered. Some advantages and disadvantages of this method are described. Also, this paper consist overview of standard cell library development flow.

Keywords: standard cell, library, gate array, digital IC

Date of authors:

Leonid G. Indekker; Molecular Electronic Research Institute, JSC, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1; e-mail: lndekker@mikron.ru

Vladimir N. Shmigelskiy; Molecular Electronic Research Institute, JSC, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1; e-mail: vshmigelskiy@mikron.ru

Viktor I. Enns, Ph. D.; Molecular Electronic Research Institute, JSC, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1; e-mail: venns@mikron.ru

ТРИММИНГ ФОТОРЕЗИСТА КАК ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

В работе исследован процесс усиления разрешения оптической литографии (ArF) с помощью тримминга фоторезиста с использованием плазмы, генерируемой в источнике трансформаторно связанной высокочастотной плазмы. Изучены основные технологические параметры, определяющие результаты тримминга. Сформированная по результатам тримминга фоторезистивная маска, включающая подслои BARC, далее переносилась в слой жесткой маски и поликремний. В результате была сформирована структура поликремниевого затвора с размерами до 50 нм и вертикальными стенками.

Ключевые слова: тримминг фоторезиста, плазменное травление, поликремниевый затвор, усиление разрешения.

Сведения об авторах:

Бурякова Татьяна Леонтьевна Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 103460 Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: tatiana.buryakova@gmail.com

Гущин Олег Павлович Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 103460 Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: ogushin@mikron.ru

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 103460 Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: egornev@mikron.ru

Данила Андрей Владимирович, Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт точного машиностроения", 124460 Россия, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail – adanila@niitm.ru.

Поляков Александр Николаевич открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и Микрон", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1

ПРОБЛЕМА ПЕРЕОСАЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СПЕЙСЕРА

Переосаждение кобальта во время удаления непрореагировавших остатков кобальта при формировании спейсера можно предупредить, если используется специально подобранное соотношение компонентов в перекисно-аммиачном растворе (ПАР) или применяются дополнительные обработки, такие, как серно-перекисный раствор.

Ключевые слова: удаление непрореагировавшего кобальта, переосаждение кобальта, дефекты типа СоxOy, аммиачно-перекисный раствор, серно-перекисный раствор

Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, академик Российской академии наук, д.т.н.; Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод Микрон", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1; e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

Кирюшина Ирина Васильевна; Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод Микрон", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1; e-mail: ikiryushina@mikron.ru

Езоров Александр Александрович; Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод Микрон", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, 5/1; e-mail: aegorov@mikron.ru

Ранчин Сергей Олегович; Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники и завод Микрон", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1; e-mail: sranchin@mikron.ru

Горнев Евгений Сергеевич, д.т.н.; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1; e-mail: egornev@mikron.ru)

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ДЛЯ ЯЧЕЙКИ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.

На основе анализа диполь-дипольного взаимодействия в работе рассмотрена взаимосвязь стехиометрии, структуры и фазового состава сегнетоэлектрической пленки с ее электрофизическими свойствами и электрическими параметрами приборов на ее основе. Показано, что для качественной оценки электрических параметров приборов, изготовленных на основе твердых растворов цирконата – титаната свинца (ЦТС), состав которых смещен в правую или левую сторону от морфотропной области, возможно использование аналитических зависимостей, определенных в данной работе.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, запоминающая ячейка, поляризация, диполь-дипольное взаимодействие.

Сведения об авторах

Красников Геннадий Яковлевич; доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, 2. Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: krasnikov@mikron.ru

Зайцев Николай Алексеевич, доктор технических наук, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, 2. Зеленоград,, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: nzaytzev@mikron.ru

Бокарев Валерий Павлович, кандидат химических наук, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, 2. Зеленоград,, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: vbokarev@mikron.ru

Плотников Юрий Иванович кандидат технических наук, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, 2. Зеленоград,, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: yplotnikov@mikron.ru.

PHOTORESIST TRIMMING FOR OPTICAL LITHOGRAPHY RESOLUTION ENHANCEMENT

Abstract: In this work the process of optical lithography ArF (193 nm) resolution enhancement using photoresist trimming was investigated. The photoresist patterns were etched in transformer coupled plasma etch system. It was investigated the basic technological parameters, which determine the results of photoresist trimming. Photoresist mask with underlying BARC, formed after trimming, was transferred to hard mask layer and polysilicon. As a result, the polysilicon gate stack with critical dimensions 50 nm and smooth vertical profile was formed.

Keywords: photoresist trimming, plasma etching, polysilicon gate, resolution enhancement)

Date of authors:

Buryakova Tatyana Leontyevna, Molecular Electronic Research Institute, JSC 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: tatiana.buryakova@gmail.com

Gushin Oleg Pavlovic, Molecular Electronics Research Institute JSC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: ogushin@mikron.ru.

Gornev Evgeni Sergeevich, Dr.Sci., Molecular Electronics Research Institute JSC; 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: egornev@mikron.ru

Danila Andrey Vladimirovich, JSC "Research institute of precision machine manufacturing", 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Panfilovsky prospekt, 10, e-mail: adanila@niitm.ru. Polyakov Alexandr Nikolaevich, JSC Micron, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: apolyakov@micron.ru.

COBALT REDEPOSITION ISSUE DURING SPACER FORMATION

Cobalt redeposition during un-reacted cobalt removing for spacer formation process is prevented if SCl special mixture ratio or using additional treatments, for example, sulphuric/peroxide mixture (SPM).

Keywords: un-reacted cobalt removal, cobalt redeposition, CoxOy-type defects, SCl, sulphuric/peroxide mixture

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Dr. Sci. RAS academician; JSC "Molecular Electronic Research Institute", JSC "Mikron" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

Kiryushina Irina Vasiljevna; JSC "Mikron", 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; e-mail: ikiryushina@mikron.ru

Egorov Alexander Alexandrovich; JSC "Mikron" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; e-mail: aegorov@mikron.ru

Ranchin Sergey Olegovich, JSC "Mikron" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; e-mail: sranchin@mikron.ru

Gornev Evgeny Sergeevich, Dr.Sci.; JSC "Molecular Electronic Research Institute", 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1; e-mail: egornev@mikron.ru

PHYSICAL-TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF FERROELECTRIC FILMS FOR CELL STORAGE DEVICES.

Based on the analysis of the dipole-dipole interaction in the article the relationship between stoichiometry, structure and phase composition of ferroelectric films on its electrical properties and the electrical parameters of the devices based on it is considered. It is shown that for quality estimation of the electrical parameters of the devices made on the basis of PZT, the composition of which is shifted to the right or left side from the morphotropic region, use of the analytical dependences defined in this article is possible.

Keywords: ferroelectric, PZT, memory cell, polarization, dipole-dipole interaction.

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Dr.Sci., RAS academician, JSC "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

Zaytsev Nikolay Alexeevich, Dr.Sci., JSC "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: nzaytzev@mikron.ru

Bokarev Valery Pavlovich, Ph.d., JSC "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: vbokarev@mikron.ru

Plotnikov Yury Ivanovich, Ph.d., JSC "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, yplotnikov@mikron.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Приведены результаты исследований, направленных на разработку высокотемпературных КНИ МОП-транзисторов. Исследована возможность устойчивой работы радиационно-стойкой активной элементной базы при температурах свыше 125°C. Проведено моделирование состояний полного и частичного обеднения в карманах МОП-транзисторов в среде TCAD. На основе моделирования проведено изменение параметров МОП-транзисторов с целью повышения их устойчивости к высоким температурам. Испытаны различные варианты системы металлизации интегральных схем на надежность при высоких температурах. По результатам испытаний определена наиболее оптимальная конфигурация металлических шин и соединений.

Ключевые слова: Кремний на изоляторе, высокотемпературная электроника, токи утечки, МОП-транзистор, пороговое напряжение, ток насыщения

Сведения об авторах:

Бенедиктов Александр Сергеевич, магистрант, младший научный сотрудник, тел.: +79169794084; e-mail: abenediktov@mikron.ru,

Московский физико-технический институт (государственный университет), Московская область, г. Долгопрудный

Изнатов Павел Викторович, главный конструктор элементной базы Акционерное общество "Научно исследовательский институт молекулярной электроники", 103460 Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) используются как первичные (автономные) источники питания во многих практических приложениях при требуемых мощностях от единиц милливатт до единиц ватт. В статье представлен сопоставительный анализ результатов моделирования и эксперимента двух типов промышленно выпускаемых ТЭГ. Моделирование ТЭГ проводилось с использованием метода конечных элементов на основе программной платформы ANSYS Workbench. Применение предлагаемой методики моделирования позволяет определить режимы включения термоэлектрических генераторов, рабочий диапазон температур, сопротивления нагрузок, выходную мощность. Показано, что результаты моделирования с высокой точностью соответствуют эксперименту.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, метод конечных элементов, моделирование, выходная мощность

Сведения об авторах:

Александр Станиславович Коротков, д.т.н.; Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: korotkov@spbstu.ru

Вера Владимировна Лобода, к.ф. – м.н.; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра

Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: vera_loboda@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ЧИСТОТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В ПРОИЗВОДСТВЕ КРИСТАЛЛОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Сделан анализ требований к технологическим средам, используемым в производстве кристаллов интегральной наноэлектроники. С учетом особенностей технологии с минимальными размерами элементов нанометрового диапазона, на основе опыта действующего собственного производства и по материалам актуальных публикаций, сформулированы основные требования к чистоте технологических сред и к линиям их доставки к технологическому оборудованию.

Ключевые слова: Интегральная наноэлектроника, технологические среды, микро загрязнение, линии подключения оборудования.

Сведения об авторах:

Евдокимов Владимир Лукьянович Открытое Акционерное Общество "Научно исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1,

e-mail: vevdokimov@mikron.ru

Ранчин Сергей Олегович –

Открытое Акционерное Общество "Научно исследовательский институт молекулярной электроники и завод "Микрон", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1,

e-mail: sranchin@mikron.ru

THE COMPUTER MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SOI MOSFET'S AT THE HIGH TEMPERATURES

The results of creating of high-temperature SOI MOSFETs are shown in this paper. The possibility of steady work of radiation-resistant active element base at temperatures above 125°C are studied. The TCAD-modelling of fully and partially depleted MOSFET's states are completed and MOSFET's parameters are changed for increasing its resistance to high temperatures. The different variants of integration circuits metallization are tested at high temperatures.

Keywords: High-temperature electronics, silicon on insulator, leakage current, the MOS transistor, threshold voltage, saturation current

Date of authors:

Benediktov A.S. student (master), Junior Researcher, e-mail: abenediktov@mikron.ru, tel.: +79169794084; Molecular Electronic Research Institute, JSC 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, Ignatov P. V. VLSI element base Chief designer Molecular Electronic Research Institute, JSC 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1

SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS

Thermoelectrical generators are widely used in many practical applications as autonomous energy sources with the range of power from a few mW to several W. The paper presents a comparative analysis of simulation and experimental results of two types of commercially available thermoelectrical generators. Thermoelectrical generator simulations were performed using the finite element method based on software ANSYS Workbench platform. Application of the proposed simulation techniques allows the user to determine modes, working temperature range, load resistance, and output power of thermoelectric generators. It is shown that the simulation results are in a good agreement with experiments.

Keywords: Thermoelectric Generators, Finite Element Method, Simulation, Output Power

Date of authors:

Alexander Stanislavovich Korotkov, Dr.Sc.; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29; e-mail: korotkov@spbstu.ru

Vera Vladimirovna Loboda, PhD; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29; e-mail: vera_loboda@mail.ru

REQUIREMENTS FOR PURITY PROCESS FACILITIES IN THE CHIPS PRODUCTION OF NANO-ELECTRONIC ICs

Abstract: Have made the analysis of the technological requirements of the facilities used in the production of nanoelectronics ICs. Given the characteristics of chip technology, based on our own experience of the manufacturing and the actual publications, the main requirements to clean facilities and their delivery lines to production equipment.

Keywords: Integrated nanoelectronics, technological environment, micro-pollutions, delivery lines to tools.

Date of authors:

Evdokimov Vladimir Lukjanovich

JSC Mikron, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1,

e-mail: vevdokimov@mikron.ru

Ranchin Sergey Olegovich,

JSC Molecular Electronic Research Institute, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1,

e-mail: sranchin@mikron.ru