

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

«Для служебного пользования»

Инв. № 33 / 6 ДСП

Экз. № 50

УДК 621.382.049.77:621.282.002

**Рубцевич  
Иван Иванович**

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
ВЫСОКОИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ  
ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Минск 2005

Работа выполнена в УП «Завод Транзистор» Научно-производственного объединения «Интеграл» и в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

доктор технических наук, доцент

*Бордусов Сергей Валентинович*

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра электронной техники и технологии)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

*Прибыльский Александр Владимирович*

(Унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт техники управления»)

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

*Баранов Игорь Ливерьевич*

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», НИЛ «Электрохимические процессы СБИС» НИЧ)

Опонирующая организация: Государственное научное учреждение «Институт электроники НАН Беларуси»

Защита состоится « 5 » июля 2005 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013 г.Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд.232, тел. 239-89-89.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Современные технологии не обходятся без применения технических устройств по преобразованию электрической энергии, потребляемой от сети, передачи ее к действующим на ее основе приборам и аппаратуре, управления ими и т.д. Поэтому снижение потерь электроэнергии в процессе ее преобразования и передачи является одной из важнейших задач научно-технического прогресса.

Определяющим фактором прогресса в области преобразования электроэнергии явилась разработка в середине 1980-х годов нового класса мощных полупроводниковых приборов, работающих на полевом эффекте управления током – вертикальных транзисторов с индуцированным *n*-каналом. В зависимости от типа применяемой подложки они представляют собой либо полевые транзисторы, работающие на основных носителях заряда, например, МОП-транзисторы с вертикальным направлением тока в структуре, формируемой методом двойной диффузии (ДМОП-транзисторы), либо приборы, работающие как на основных, так и на неосновных носителях заряда – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Особенности работы и технические характеристики мощных полевых транзисторов позволяют разработчикам создавать новые высокоэффективные средства связи, электро-, радио- и вычислительной техники и на их основе – современные энерго-сберегающие технологии. Потребность в таких изделиях подтверждается динамикой рыночного спроса, объем которого увеличивается ежегодно на 20-30% и опережает рост продаж интегральных микросхем.

Мощные полевые транзисторы и быстродействующие диоды в Беларуси не изготавливались. Поэтому производители электронной аппаратуры вынуждены были импортировать такие изделия, в том числе из стран дальнего зарубежья. В то же время, на предприятиях НПО “Интеграл” к середине 90-х годов были освоены технологии кристалльного производства и микромонтажа интегральных микросхем класса ДМОП 64К, 256К, 1М, которые принципиально соответствуют уровню требований для производства мощных ДМОП- транзисторов.

В связи с этим решение комплекса вопросов по созданию конкурентоспособных мощных ДМОП-транзисторов на основе оптимизации вертикальной и горизонтальной твердотельной структуры кристаллов и адаптации к созданию этих структур технологических методов, используемых при изготовлении маломощных изделий полупроводниковой электроники, таких как цифровые БИС и СБИС, а также освоение серийного производства таких приборов силовой электроники является актуальной научной и технической задачей.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Диссертация выполнялась в рамках заданий республиканских научно-технических программ: ГНТП “Белэлектроника” (1998-2004 г.г.), ПНТП “Белорусский телевизор” в 1998 г. и в 2001 – 2004 г.г., Государственной программы “Импортозамещение” в 1998-2000 г.г. и 10 опытно-конструкторских работ по созданию изделий специального назначения для Министерств обороны Республики Беларусь и Российской Федерации в 1993 – 2004 г.г.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка методов проектирования  $n$ - и  $p$ -канальных мощных полевых транзисторов с вертикальной структурой – ДМОП-транзисторов с рабочими напряжениями до 1000 В, токами до 75 А и рассеиваемой мощностью до 200 Вт и адаптация к ним серийных процессов планарной технологии изготовления маломощных интегральных микросхем, обеспечивающих в совокупности воспроизводимые электрические параметры, требуемые эксплуатационные характеристики и высокую конкурентоспособность таких изделий на мировом рынке.

В этой связи основными задачами исследования определены следующие:

1. Разработка на основе теоретических и экспериментальных результатов алгоритма оптимизационного расчета физико-топологических параметров твердотельных структур мощных ДМОП-транзисторов, обеспечивающих заданные электрические параметры и улучшенные частотные и эксплуатационные характеристики приборов.
2. Разработка технологических маршрутов и режимов технологических операций, определяющих основные электрические параметры и динамические характеристики ДМОП-транзисторов и обеспечивающих достижение их требуемого уровня.
3. Разработка на базе результатов экспериментальных исследований новых конструктивно-технологических решений по защите мощных ДМОП-транзисторов от воздействия статического электричества и импульсных электрических перегрузок на выводах приборов.
4. Внедрение результатов комплексных исследований и разработок в серийном производстве мощных ДМОП-транзисторов с рабочими напряжениями в диапазоне 12 – 1000 В, токами 0,1 – 75 А и рассеиваемой мощностью до 200 Вт.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются твердотельные структуры мощных вертикальных ДМОП-транзисторов и технологические процессы их формирования.

Предметом исследования являются корреляционные зависимости электрических параметров мощных ДМОП-транзисторов от физико-топологических характеристик кристалла, алгоритмы расчета и оптимизации рабочих характеристик при синтезе структуры ДМОП-транзисторов, взаимосвязи их электрических параметров и эксплуатационных характеристик с технологическими режимами в процессе серийного производства.

**Гипотеза.** Научной гипотезой является предположение о возможности улучшения эксплуатационных характеристик мощных ДМОП-транзисторов за счет оптимизации физико-топологических параметров кристаллов приборов и эффективного применения в производстве таких изделий методов планарно-эпитаксиальной технологии изготовления цифровых БИС и СБИС, что позволит обеспечить требуемые эксплуатационно-технические характеристики и высокую конкурентоспособность на мировом рынке.

**Методология и методы проведенного исследования.** При выполнении диссертационной работы использовались теоретические результаты и экспериментальные методы физического анализа твердотельных структур мощных ДМОП-транзисторов, включающие в себя: физико-математические модели твердотельной структуры полупроводниковых приборов и технологических процессов их формирования, современ-

ные аналитические методы и средства анализа с использованием электронной микроскопии (Stereoscan-360), электронно-зондового микроанализа (AN-10000 Link System), Оже-электронной спектроскопии (PHI-660 Perkin Elmer), оптической и ИК-микроскопии, статистические методы анализа и обработки многочисленных экспериментальных данных. Разработка твердотельной структуры вертикальных ДМОП-транзисторов осуществлялась на базе теории диффузии примесей и дрейфа носителей заряда в двухмерном неоднородном поле. Программные продукты разработаны на языках Borland Pascal и C++. Достоверность теоретических положений и полученных в диссертации практических результатов оценивалась методами сравнения итогов математических расчетов статических и динамических параметров транзисторов с экспериментальными данными, полученными при измерениях электрических параметров полупроводниковых структур и испытаниях приборов на устойчивость к электрическим, тепловым, радиационным, механическим воздействиям, надежность, сохранность и долговечность по стандартизированным методикам, аттестованным по ISO 9001 и реализованным на программно-управляемом оборудовании.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. С учетом конструктивно-технологических особенностей и модельных представлений о физических принципах работы, движении носителей заряда и возникающих при этом областях пространственного заряда в рабочей зоне элементарной ячейки кристалла мощного ДМОП-транзистора получены аналитические выражения для расчета электрического сопротивления области управляемого полем *n*-ДМОП-транзистора, ограниченной с боковых сторон *p-n*-переходами соседних элементарных транзисторных ячеек, а также объемных сопротивлений областей трапецидальной и прямоугольной формы в *n*-эпитаксиальной пленке, позволяющие определять суммарное электрическое сопротивление элементарной ячейки и всего высокоинтегрированного вертикального ДМОП-транзистора в открытом состоянии применительно к реальным электрическим режимам его функционирования.

2. Установлено, что для транзисторов с низким уровнем электрического сопротивления в открытом состоянии (порядка сотых долей Ома) значительный вклад в сопротивление элементарной ячейки высокоинтегрированного мощного ДМОП-транзистора вносит объемное сопротивление исходной кремниевой подложки кристалла (порядка 24% от общей величины), что указывает на существенную роль типа и качества материала подложки при создании качественных приборов.

3. Обнаружен эффект влияния режимов формирования и толщины пленки оксида кремния перед проведением процесса осаждения межслойного диэлектрика на выход из строя структуры мощного ДМОП-транзистора по причине электрического пробоя подзатворного оксида кремния в цепи "затвор-исток" транзистора, рациональный выбор которых (температура  $T=850$  °С, среда – влажный кислород, время  $t=15-30$  мин, толщина пленки порядка 0,22 мкм) позволил снизить до двух раз долю брака транзисторов по этой причине.

4. Выявлены закономерности влияния облучения высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами  $Co^{60}$  мощных вертикальных *n*-канальных ДМОП-транзисторов после выполнения операции формирования подзатворного диэлектрика и металлизированных контактных площадок на величину порогового напряжения, что

позволяет в совокупности с последующим стабилизирующим отжигом готовых транзисторных структур обеспечить управляемое регулирование порогового напряжения транзисторов в диапазоне от +1,8 В до -1,2 В.

5. Установлено, что катастрофические отказы в работе мощных вертикальных ДМОП-транзисторов при воздействии статического электричества в условиях экстремальных температур (-60 °С – +150 °С) происходят преимущественно из-за наличия дефектов в подзатворном диэлектрике элементарной ячейки кристалла, что указывает на возможность повышения надежности работы прибора за счет улучшения электрофизических характеристик этого элемента структуры ячейки.

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Разработаны алгоритмы и методики инженерно-физического расчета элементов конструкции и проектирования технологии изготовления мощных вертикальных ДМОП-транзисторов с рабочими напряжениями до 1000 В и токами до 75 А, оптимизированных относительно требуемых электрических параметров таких как электрическое сопротивление транзистора в открытом состоянии, входные, проходные и выходные внутренние емкости кристалла ДМОП-транзистора.

2. Разработан и внедрен в производство технологический процесс формирования кристалла ДМОП-транзистора, в котором в качестве маски при формировании истоковых областей используется слой нитрида кремния, закрывающий центральную зону ячейки кристалла, где затем создается контакт к  $n^+$ -истoku и  $p$ - области, а межслойный диэлектрик толщиной 0,4 – 1,2 мкм выращивается путем термического окисления истоковых областей и поликремниевого затвора, что обеспечивает высокую электрическую прочность межслойной изоляции, снижает вероятность образования дефектов и позволяет формировать ячейки кристалла с площадью примерно на 20% меньше в сравнении с получаемой по используемой ранее технологии.

3. Разработан и внедрен в серийное производство технологический маршрут изготовления мощных ДМОП-транзисторов, позволяющий благодаря введению дополнительных операций термообработки и окисления с экспериментально установленными режимами процесса улучшить электрические характеристики областей истоков, подзатворного оксида кремния, межслойного диэлектрика, обеспечившие значение пробивного напряжения области “затвор- исток” на уровне 75 В, повысить процент выхода годных кристаллов и улучшить эксплуатационные показатели приборов.

4. Разработан метод снижения электрического сопротивления мощного вертикального ДМОП-транзистора в открытом состоянии путем создания на поверхности эпитаксиальной пленки слоя с повышенной концентрацией носителей за счет дополнительного ионного легирования активной области структуры.

5. Разработан и используется в серийном производстве технологический маршрут изготовления мощного вертикального ДМОП-транзистора, в котором с целью контролируемого управления длиной канала при фиксированной заданной глубине  $p^-$ -области формирование поликремниевого затвора выполняется с контролируемым боковым подтравом под край фоторезистивной маски на величину 0,1-0,5 мкм, а удаление фоторезистивной маски с затвора производится после ионной имплантации бора, осуществляемой для создания  $p^-$ -канальных областей, что обеспечило без изменения

конструктивных характеристик кристалла снижение на 10-15% входной емкости транзисторов и повышение выхода годных изделий примерно на 7,5%.

Основные результаты диссертационной работы обеспечили разработку, освоение в производстве и устойчивый выпуск на УП “Завод транзистор” НПО “Интеграл” серии мощных ДМОП-транзисторов с электрическими и эксплуатационными параметрами, соответствующими аналогам ведущих зарубежных фирм. С использованием результатов диссертационной работы за период 1999–2004 гг. выпущено более 18,5 млн. шт. изделий на сумму 1839,3 тыс. дол. США, в том числе более 6 млн. штук изделий – на экспорт. Разработанные полупроводниковые приборы представляют перспективный вид товарной продукции на экспорт и обеспечивают создание на ее основе энерго-, ресурсосберегающих и экологически чистых промышленных технологий для различных отраслей народного хозяйства Республики Беларусь.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Установленные корреляционные взаимосвязи между конструктивными параметрами кристаллов мощных ДМОП-транзисторов с вертикальной структурой и их статическими и динамическими характеристиками – пороговым и пробивным напряжением, сопротивлением транзистора в открытом состоянии, крутизной, паразитными емкостями и др., что позволило программно реализовать алгоритм синтеза оптимальной структуры приборов по заданным электрическим параметрам.

2. Разработанные адаптированные к твердотельной структуре мощных ДМОП-транзисторов технологические процессы самосовмещенного формирования активных ячеек с увеличенной плотностью упаковки, дополнительного окисления перед осаждением межслойного диэлектрика и уменьшения перекрытия канала затвором, позволяющие улучшить характеристики и эксплуатационные показатели приборов, повысить процент выхода годных.

3. Установленные закономерности изменения пороговых характеристик и конструктивно-технологические методы управления пороговым напряжением мощных ДМОП-транзисторов при воздействии радиационного облучения гамма-квантами и высокоэнергетическими электронами.

4. Установленные закономерности отказов высокоинтегрированных вертикальных ДМОП-транзисторов при воздействии статического электричества в комбинации с температурными и ударно-механическими дестабилизирующими факторами.

**Личный вклад соискателя.** В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных научных работах автору принадлежат: определение цели и постановка задач исследований, разработка алгоритмов и методов оптимизации твердотельных структур, обоснование методик экспериментальных исследований, данные, полученные при непосредственном участии в проведении исследований, результаты анализа и авторская интерпретация экспериментальных данных, формулировки выводов, определение перспектив и планирование использования результатов проведенных в диссертации исследований при освоении производства новых типов полупроводниковых приборов.

Автором предложены лично: алгоритмы расчета и методы оптимизации твердотельных структур мощных ДМОП-транзисторов с целью достижения заданных элек-

трических параметров; идея адаптации применяемых в технологии цифровых БИС и СБИС процессов к особенностям конструкции кристаллов мощных ДМОП-транзисторов; новые подходы при построении маршрутов изготовления приборов, в частности, введение дополнительных операций термообработки и окисления для повышения качества области перекрытия «затвор-исток»; программа исследований для выявления закономерностей изменения пороговых характеристик мощных ДМОП-транзисторов при воздействии радиационного облучения гамма-квантами и высокоэнергетическими электронами.

Автором также осуществлялось непосредственное участие в освоении серийного производства разработанных конструкций и технологических процессов изготовления мощных ДМОП-транзисторов на УП “Завод Транзистор” НПО “Интеграл”.

Основными соавторами опубликованных работ являются: д.т.н. Ануфриев Л.П., к.ф.-м.н. Голубев Н.Ф., Алиев А.М., Кречко М.М., принимавшие участие в планировании и проведении отдельных технологических и физических экспериментов, обсуждении результатов исследований и выработке рекомендаций, разработке программных средств, построении отдельных физических моделей, подготовке материалов к публикации.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях, семинарах, симпозиумах и совещаниях в Беларуси, России, Украине и Польше: III Международной научно-технической конференции “Современные средства связи”, (Нарочь, Беларусь, 1998 г.); Десятом международном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Севастополь, Украина, 2000 г.); Седьмой Международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы твердотельной электроники” (Таганрог, Россия, 2000 г.); Десятом международном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Минск, Беларусь, 2000 г.); Одиннадцатом международном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Минск, Беларусь, 2001 г.); Одиннадцатой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (Одесса, Украина, 2001 г.); Шестой Международной научно-технической конференции “Современные средства связи” (Нарочь, Беларусь, 2001 г.); Четвертой Международной конференции “Взаимодействие излучений с твердым телом” (Минск, Беларусь, 2001 г.); II International Symposium “New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation” (Kazimierz Dolny, Poland, 2001 г.); 4-th International Symposium on ion implantation and other application of ions and electrons (Kazimierz Dolny, Poland, 2002 г.); Второй Международной научно-технической конференции “Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств” (Новополоцк, Беларусь, 2002 г.); Тринадцатом Международном совещании “Радиационная физика твердого тела” (Севастополь, Украина, 2003 г.); Четвертой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (Одесса, Украина, 2003 г.); Пятой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” (Одесса, Украина, 2004 г.).

**Опубликованность результатов.** По материалам диссертации опубликованы 43 печатные работы, в том числе 12 статей в научных журналах, 15 статей в сборниках



материалов научных конференций, 4 тезиса докладов. Новизна технических решений подтверждена 4 авторскими свидетельствами, 5 патентами Республики Беларусь, 3 свидетельствами об официальной регистрации топологии интегральных микросхем в Российской Федерации. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 119 страниц. Без соавторства опубликовано 2 работы (8 стр.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем – 145 страниц основного текста. Работа включает 59 иллюстраций на 27 страницах, 19 таблиц на 10 страницах, список использованных источников из 114 наименований на 8 страницах и 2 страницы приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы изложены результаты анализа состояния научных проблем по теме диссертации, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются на основе анализа литературных данных конструктивные особенности структуры мощных вертикальных ДМОП-транзисторов (рис. 1).

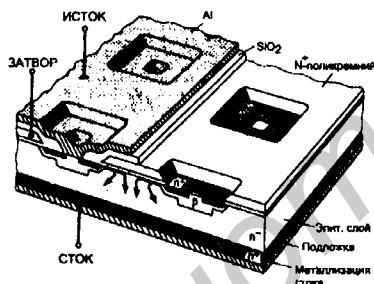


Рис. 1. Фрагмент структуры кристалла ДМОП-транзистора

обеспечения высоких рабочих напряжений и самосовмещенной планарно-эпитаксиальной технологии СБИС  $n$ -МОП ДОЗУ уровня 64 КБит и выше.

Обеспечение противоречивых требований обеих технологий и является специфическими особенностями конструкции и технологии ДМОП-транзисторов.

Современные ДМОП-транзисторы должны работать в широком диапазоне рабочих напряжений (10-1000 В) и токов (0,1 – 100 А), что вызывает необходимость создавать оптимизированные конструкции под разные диапазоны напряжений с различными конструктивными особенностями.

Внутренние паразитные связи в кристалле между выводами затвора, стока и истока носят ярко выраженный емкостной характер и определяют особенности работы прибора в динамическом режиме.

Технологию изготовления современного ДМОП-транзистора можно рассматривать как синтез классической диффузионной технологии изготовления мощных диодов и биполярных транзисторов 60-х годов с их особенностями по получению надежных низкоомных омических контактов токопроводящих металлических шин к полупроводниковой структуре, специальными технологическими мерами по отводу тепловой энергии, специальными конструктивными элементами по периметру кристалла для

Сильная зависимость главного параметра ДМОП-транзистора – сопротивления транзистора в открытом состоянии от топологического рисунка (плотность упаковки, расстояние между элементами) требует решения задачи оптимизации конструкции ДМОП-транзистора в процессе разработки и изготовления.

Во второй главе описана последовательность процесса проектирования и оптимизации конструкции и топологии кристаллов мощных ДМОП-транзисторов. Процедура проектирования состоит из трех этапов:

*На первом этапе*, исходя из требуемых уровней порогового напряжения, пробивного напряжения сток-исток, пробивного напряжения затвор-исток, сопротивления в открытом состоянии и входной емкости, проводится расчет параметров диффузионных профилей областей канала, истоков (концентрация носителей в начале канала, длина канала транзистора). При этом концентрация носителей в начале канала при заданной толщине подзатворного оксида кремния определяется уровнем порогового напряжения транзистора; длина канала – минимальным сопротивлением в открытом состоянии при достаточной гарантии от короткоканального эффекта.

*На втором этапе* проводится поиск оптимального технологического маршрута, обеспечивающего найденные оптимальные параметры профилей распределения примесей в областях канала, истоков и толщину подзатворного оксида кремния. При этом с помощью программы "TIDE" проводится одномерное моделирование профилей распределения примесей в кристалле для типового базового маршрута, включающего следующие операции: окисление кремния, имплантация бора, разгонка бора, окисление кремния ( $d_x=0,6$  мкм), травливание оксида кремния, окисление кремния под затвор, имплантация бора (канал), разгонка бора (канал), имплантация фосфора, разгонка фосфора.

В результате оптимизируются такие режимы технологических операций, как температура, газовый состав, длительность высокотемпературных операций, дозы и энергии легирования при имплантации примесей. Критерием оптимизации при этом является получение требуемых конструктивных параметров при максимальном коэффициенте технологичности (степени унификации технологии изготовления с существующими базовыми технологическими маршрутами).

*На третьем этапе*, исходя из требуемых уровней пробивного напряжения сток-исток, пробивного напряжения затвор-исток, максимального тока стока, сопротивления в открытом состоянии и входной емкости, проводится выбор следующих входных параметров для расчета: тип элементарной ячейки, толщина межслойного диэлектрика, концентрация носителей в эпитаксиальной пленке, толщина эпитаксиальной пленки, кристаллографическая ориентация кремния, геометрические размеры затворной площадки, ширина скрайберной дорожки, ширина пассивной части кристалла.

Далее с помощью разработанной программы "DMOP" проводится поиск параметров оптимальной конструкции кристалла. При этом используются входные параметры, выбранные на этапах 1 – 3, наборы параметров режимов электрических измерений и физических констант, критерии оптимизации (минимальная активная площадь кристалла, максимальная активная площадь кристалла, максимальное сопротивление в открытом состоянии, максимальная входная емкость), параметры оптимизации



Базовые выражения для расчета резистивного  $R_{яч}$  и емкостного  $C_{11яч}$  параметров элементарной ячейки ДМОП-транзистора, используемые в программе "DMOP", получены исходя из эквивалентных резистивной и емкостной электрических схем элементарной ячейки, составленных в соответствии с представленной на рис.2 и рис.3 информацией:

$$R_{яч} = R_{1яч} + R_{2яч} + R_{3яч} + R_{4яч} + R_{5яч} + R_{6яч} + R_{7яч}, \quad (1)$$

где  $R_{1яч}$  - сопротивление  $n$ -ДМОП транзистора с обогащенным каналом элементарной ячейки;  $R_{2яч}$  - сопротивление  $p$ -ДМОП транзистора с обедненным каналом элементарной ячейки;  $R_{3яч}$  - сопротивление управляемого полем  $n$ -ДМОП транзистора элементарной ячейки;  $R_{4яч}$  - объемное сопротивление трапециевидальной области  $n'$  - эпитаксиальной пленки элементарной ячейки;  $R_{5яч}$  - объемное сопротивление прямоугольной области  $n'$  - эпитаксиальной пленки элементарной ячейки;  $R_{6яч}$  - объемное сопротивление исходной кремниевой  $n^+$  - подложки элементарной ячейки;  $R_{7яч}$  - контактное сопротивление металлизации обратной стороны элементарной ячейки;

$$C_{11яч} = C_{1яч} + \frac{C_{2яч} \cdot C_{4яч}}{C_{2яч} + C_{4яч}} + \frac{C_{3яч} \cdot C_{5яч}}{C_{3яч} + C_{5яч}}, \quad (2)$$

где  $C_{1яч} = C_{1м/с яч} + C_{1п/з яч}$ , при этом  $C_{1м/с яч}$  - емкость плоского конденсатора «затвор-исток» элементарной ячейки (диэлектрик – межслойный оксид кремния);  $C_{1п/з яч}$  - емкость плоского конденсатора «затвор-исток» элементарной ячейки (диэлектрик – подзатворный оксид кремния);  $C_{2яч}$  - емкость плоского конденсатора «затвор –  $p'$  - канал» элементарной ячейки с подзатворным оксидом кремния в качестве диэлектрика;  $C_{4яч}$  - емкость обедненной области на поверхности  $p'$  - канала элементарной ячейки, возникающая при появлении на затворе соответствующего потенциала;  $C_{3яч}$  - емкость плоского конденсатора «затвор - эпитаксиальная пленка» с подзатворным оксидом кремния в качестве диэлектрика;  $C_{5яч}$  - емкость обедненной области на поверхности эпитаксиальной пленки, возникающая при появлении на затворе соответствующего потенциала.

В третьей главе приведены результаты оптимизации физико-топологических параметров мощных высоковольтного (КП750Г) и низковольтного (КП742А) ДМОП-транзисторов по разработанному алгоритму проектирования.

С использованием проведенных расчетов получены зависимости резистивных и емкостных параметров ДМОП-транзисторов от геометрических размеров элементарной ячейки. Одной из особенностей зависимостей резистивных параметров от геометрических размеров элементарной ячейки является наличие минимумов (рис.4). Зависимости от геометрических параметров ячейки емкостных характеристик и крутизны не имеют выраженных экстремумов (рис.5).

Анализ расчетных зависимостей электропараметров вертикального ДМОП-транзистора от его конструктивно-топологических параметров показал, что для каждого уровня пробивного напряжения и, соответственно, концентрации носителей в эпитаксиальной пленке существует своя оптимальная геометрия элементарной ячейки

(размер ячейки, зазор между ячейками), обеспечивающая минимальный уровень сопротивления в открытом состоянии.

Показано, что выбор оптимальной конструкции кристалла вертикального ДМОП-транзистора должен осуществляться с учетом размеров элементов структуры элементарной ячейки, обеспечивающей минимум  $R_{си}$ , но с учетом обеспечения требуемых уровней таких параметров, как емкостные характеристики, тепловое сопротивление «переход-корпус», размер кристалла и других.

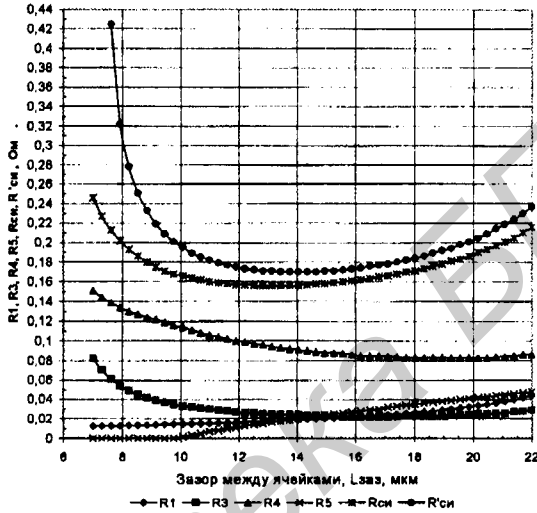


Рис.4. Зависимость величин электрического сопротивления и его составляющих для вертикального ДМОП-транзистора КП750Г от величины зазора между ячейками ( $\Pi = \text{const}$ ,  $S_{\text{пр.акт}} = \text{const}$ )

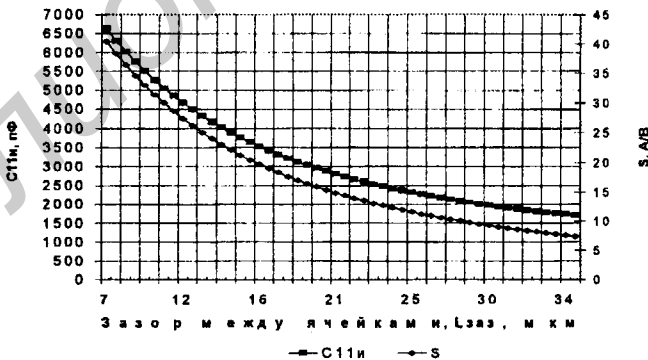


Рис.5. Зависимость величин входной емкости и крутизны характеристики вертикального ДМОП-транзистора КП750Г от величины зазора между ячейками ( $L_{\text{пр}} = \text{const}$ ,  $S_{\text{пр.акт}} = \text{const}$ )

Использование разработанных методик расчета параметров вертикального ДМОП-транзистора применительно к условиям создания на поверхности эпитаксиальной пленки слоя с повышенной концентрацией носителей с целью снижения величины электрического сопротивления транзистора в открытом состоянии позволяет выбрать уровень повышенной концентрации носителей в верхнем слое эпитаксиальной пленки и оптимальные топологические параметры кристалла с учетом уровня емкостных параметров прибора, определяющих его динамические характеристики, и величины пробивного напряжения  $p-n$ -перехода «исток-сток». Кроме того, для снижения отрицательного воздействия увеличения концентрации носителей в верхнем слое эпитаксиальной пленки операцию общего ионного подлегирования поверхности кристалла предложено проводить по специальной фотолитографической маске с целью исключения подлегирования периферийных охранных областей транзистора.

Использование предложенных алгоритмических параметров и методик оптимизационного расчета конструктивных параметров позволило для транзисторов КП750Г и КП742А по сравнению с прототипами IRL640 и STN75N06 улучшить параметры на 8-15 % при аналогичных размерах кристаллов за счет найденных оптимальных топологических параметров (размер ячейки, шаг ячейки, зазор ячейки).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния технологических факторов на показатели качества ДМОП-транзисторов и разработку методов обеспечения их требуемого уровня.

Проведено исследование влияния толщины подзатворного оксида на воспроизводимость технологии. Установлено, что наличие участка подзатворного оксида с радиационными дефектами и имплантированным фосфором может приводить к электрическому пробую подзатворного оксида кремния по краям затвора в областях перекрытия « $n^+$ -исток – затвор» (рис. 6). Пробой может происходить как в процессе выполнения операции ионного легирования истоков за счет накопления положительного

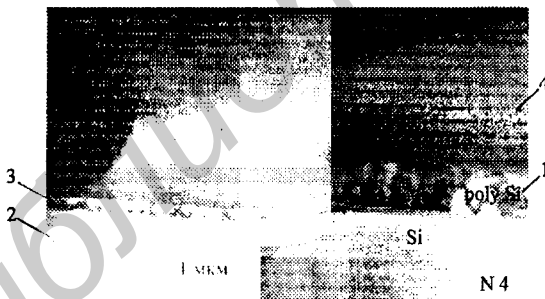


Рис. 6. Микрофотография поперечного сечения ячейки  $n$ -ДМОП-транзистора после операции «травление контактов». Увеличение  $20000\times$ : 1 – слой поликристаллического кремния (затвор); 2 – приповерхностная область  $n^+$ -истока, легированная большой дозой фосфора (ненарушенная монокристаллическая структура кремния); 3 – дефектная область  $n^+$ -истока; 4 – межслойная изоляция

заряда в изолированном от подложки слое поликремния, так и при последующих технологических операциях контроля функционирования и в процессе эксплуатации прибора.

Для снижения брака мощных ДМОП-транзисторов по причине пробоя подзатворного оксида кремния в цепи «затвор – исток», обусловленного радиационным повреждением пленки оксида кремния под краем затвора и структурными дефектами сильнолегированного при-

поверхностного слоя  $n^+$ -источков, проникающего под край затвора, предложено перед проведением процесса осаждения межслойного диэлектрика проводить операцию окисления в среде влажного кислорода для получения толщины оксида кремния порядка 0,22 мкм, что позволило снизить до двух раз долю брака по этой причине.

С целью контролируемого управления длиной канала при фиксированной заданной глубине  $p$ -области разработан и используется в производстве технологический маршрут изготовления мощного вертикального ДМОП-транзистора, в котором формирование поликремниевого затвора выполняется с контролируемым боковым подтрапом под край фоторезистивной маски на величину 0,1-0,5 мкм, а удаление фоторезистивной маски с затвора производится после ионной имплантации бора, осуществляемой для создания  $p^-$ -канальных областей, что обеспечило без изменения конструктивных характеристик кристалла снижение на 10-15% входной емкости транзисторов и повышение выхода годных изделий примерно на 7,5%.

Разработан и внедрен в производство самосовмещенный технологический процесс формирования кристалла ДМОП-транзистора, в котором в качестве маски при формировании истоковых областей используется слой нитрида кремния, закрывающий центральную зону ячейки кристалла, где затем создается контакт к  $n^+$ -истоку и  $p$ -области, а межслойный диэлектрик толщиной 0,4 – 1,2 мкм выращивается путем термического окисления истоковых областей и поликремниевого затвора. Это обеспечивает высокую электрическую прочность межслойной изоляции, снижает вероятность образования дефектов и позволяет формировать ячейки кристалла с площадью примерно на 20% меньше в сравнении с получаемой по используемой ранее технологии.

Приведены результаты отработки технологических режимов управления величинами пороговых напряжений полевых вертикальных  $n$ -канальных транзисторов ( $n$ -ДМОП), сочетающего применение ионно-лучевых процессов легирования рабочей структуры полупроводникового кристалла с радиационным воздействием высокоэнергетического гамма-излучения и высокоэнергетическими электронами. Показано, что совмещение операций ионного легирования фосфором и облучение гамма-

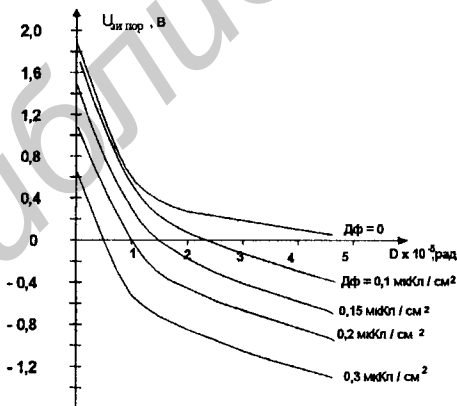


Рис. 7. Зависимости  $U_{зи\text{ пор}}$  от дозы  $\gamma$   $\text{Co}^{60}$  и дозы P

квантами позволяет регулировать пороговые напряжения в диапазоне от +1,8 В до -1,2 В (рис. 7). При этом проведенные электрические измерения показали, что значения обратных токов и пробивных напряжений на кристаллах соответствовали норме ( $U_{пр} > 240$  В,  $I_{обр} \leq 100$  мкА). Определена дозовая зависимость ухода пороговых напряжений  $n$ -ДМОП-транзисторов. В одном базовом технологическом процессе получены годные кристаллы с

широким набором пороговых напряжений, от нормально открытых до нормально закрытых, без снижения пробивных напряжений.

Исследования изменения параметров кристаллов ДМОП-транзисторов КП502А после радиационных обработок воздействием высокоэнергетическими электронами, следствием которых является изменение концентрации основных носителей заряда в области канала, показали, что подбором температуры и длительности отжига на облученных электронами пластинах можно получить любые значения параметра  $U_{зи\text{ пор}}$ , заданные в нормативной документации.

Установлено, что последующие термообработки при температурах, не превышающих температуру предыдущей обработки, не приводят к изменению достигнутых значений параметров.

В пятой главе на примере данных для транзисторов КП728Е1 представлены результаты исследования устойчивости высоковольтных ДМОП-транзисторов к воздействию разрядов статического электричества в совокупности с температурными и ударно-механическими дестабилизирующими факторами. По результатам испытаний установлено, что наиболее критичными к воздействию внешнего электростатического потенциала является пара выводов ДМОП-транзистора «затвор-сток», так как при одинаковом воздействии на все комбинации пар выводов в первую очередь катастрофические отказы наблюдаются между этими выводами.

Экспериментами по исследованию влияния полярности напряжения на закономерности отказов транзисторов при воздействии статического электричества установлено, что при отрицательной полярности напряжения на затворе отказы приборов обнаруживаются при напряжениях выше 700 В, тогда как при положительной полярности – при 300-350 В (рис. 8), что, как показал анализ, обусловлено эффектами обеднения и обогащения приповерхностного слоя  $n$ -области стока, примыкающей к затвору.

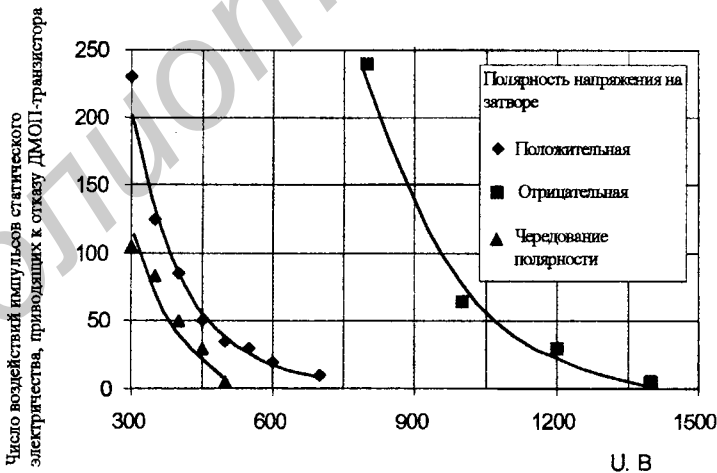


Рис. 8. Зависимость количества разрядов статического электричества, приводящих к отказу транзисторов, от величины и полярности напряжения при  $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$



Характер зависимости числа разрядов, приводящих к отказу транзистора, от величины испытательного напряжения показывает, что факторы приводящие к отказам, зависят от энергетических характеристик воздействий: при малых напряжениях для повреждения требуется произвести большее количество воздействий, чем при высоких напряжениях.

Испытания на устойчивость к воздействию на структуры кристаллов ДМОП-транзисторов статического электричества в условиях термоциклических испытаний в диапазоне температур  $-60\text{ }^{\circ}\text{C} - +150\text{ }^{\circ}\text{C}$  показали, что катастрофические отказы в работе транзистора в этом случае происходят преимущественно из-за наличия дефектов в подзатворном диэлектрике элементарной ячейки кристалла.

По результатам испытаний на стойкость структур ДМОП-транзисторов к действию статического электричества после многократных периодически повторяющихся ударных механических нагрузок с ускорением  $150\text{ g}$  установлено, что катастрофические отказы в условиях внешних воздействий такого характера происходят за счет образования дополнительных дефектов в подзатворном диэлектрике.

В приложении приводятся материалы о внедрении результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм и методика оптимизационного расчета конструктивных топологических размеров и технологических параметров (концентрация и профиль примесей в области канала, истоков, уровень легирования поверхностной части стока) интегрированных в структуру кристалла идентичных дискретных ДМОП-транзисторов, предусматривающие их поэтапный вариационный расчет по заданным уровням порогового напряжения, пробивных напряжений “сток-исток” и “затвор-исток”, максимального тока стока, сопротивления в открытом состоянии и входной емкости транзистора, обеспечивающие проектирование и изготовление большого класса полупроводниковых приборов с площадью кристаллов до  $40\text{ мм}^2$  для коммутации токов в диапазоне до  $75\text{ A}$  и блокирования напряжений до  $1000\text{ В}$  [ 8, 10, 36, 38, 41, 42].

2. Расчетным путем оценено влияние отдельных областей структуры на электрическое сопротивление элементарной ячейки ДМОП-транзистора в открытом состоянии при разных значениях пробивного напряжения и установлено, что для высоковольтных приборов ( $U_{\text{рвб}} > 200\text{ В}$ ) определяющее значение имеют сопротивление управляемого полем  $n$ -ДМОП транзистора и объемное сопротивление трапециевидной области  $n$ -эпитаксиальной пленки в области растекания тока а также объемное сопротивление прямоугольной области  $n$ -эпитаксиальной пленки в нижнем слое эпитаксиальной пленки стоковой области. Для низковольтных приборов ( $U_{\text{рвб}} < 100\text{ В}$ ) определяющее значение приобретают сопротивление  $n$ -ДМОП транзистора с обогащенным каналом и объемное электрическое сопротивление исходной кремниевой  $n^+$ -подложки кристалла, а по мере снижения величины рабочего напряжения транзистора и увеличении его мощности возрастает также роль омического контакта стоковой металлизации к поверхности кремниевой структуры [ 7, 15, 21, 25, 28, 37, 43].

3. Разработан и внедрен в серийное производство технологический процесс самосовмещенного формирования элементарных однотипных ячеек структуры мощных высокоинтегрированных ДМОП-транзисторов, что позволяет повысить электрическую прочность межслойной изоляции и уменьшить сопротивление приборов в открытом состоянии за счет повышения плотности упаковки при сохранении общей площади кристалла [ 1, 2, 34, 35, 39, 40].

4. Разработан и внедрен в производство технологический маршрут изготовления мощных ДМОП-транзисторов, позволяющий благодаря введению дополнительных операций термообработки и окисления улучшить характеристики затворного оксида (добиться значений пробивного напряжения области “затвор- исток” на уровне 75 В), повысить процент выхода годных кристаллов с пластины и эксплуатационные показатели приборов [ 3, 5, 9, 32, 33].

5. Впервые установлены закономерности изменения пороговых характеристик мощных ДМОП-транзисторов при воздействии радиационного облучения  $\gamma$ - квантами и высокоэнергетическими потоками электронов, что позволило разработать конструктивно-технологические методы управляемого регулирования порогового напряжения транзисторов в диапазоне от +1,8 В до -1,2 В [ 6, 13, 14, 16 –18, 20, 22 – 24, 27].

6. Установлены закономерности отказов высокоинтегрированных вертикальных ДМОП-транзисторов при воздействии статического электричества в комбинации с температурным (-60 °С – +150 °С) и ударно-механическим (до 150 г) дестабилизирующими факторами, позволившие разработать конструкторско-технологические рекомендации меры по повышению надежности работы приборов [4,11,12,19,26,29 –31].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи в научных журналах

1. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Мощные комплиментарные биполярные составные транзисторы КТ8115, КТ8116. Особенности конструкции и технологии // Изв. Белорус. инж. акад. –1997. – №(3)/3. – С. 3–5.
2. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Мощный вертикальный *n*-канальный МОП-транзистор V поколения для импульсных устройств. Особенности изготовления и применения // Изв. Белорус. инж. акад – 1998. – №2 (6)/2.– С. 74–77.
3. Ануфриев Л.П., Дударчик А.И., Рубцевич И.И. Разработка конструкции мощного *n*-канального вертикального МОП-транзистора с улучшенными динамическими характеристиками // Изв. Белорус. инж. акад. –1998. – №2 (6)/2.– С. 78–81.
4. Ануфриев Л.П., Дударчик А.И., Рубцевич И.И. Эффективный способ защиты мощного полевого транзистора от перенапряжения, повышающий надежность прибора в эксплуатации // Изв. Белорус. инж. акад.– 1998. – №2 (6)/2. – С. 82-85.
5. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Технологическая корректировка ионно-лучевых воздействий на поликремниевый затвор мощного МОП-транзистора // Электронная обработка материалов. – 1999. – №5 (199) . – С. 70–74.
6. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Дударчик А.И., Пеньков А.П., Рубцевич И.И., Голубев Н.Ф., Кульгачев В.И., Ластовский С.Б. Применение электронного облу-

- чения для повышения быстродействия мощных биполярных транзисторов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2000. – №2. – С. 80 – 84.
7. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Математическое моделирование силовых ДМОП-транзисторов // Изв. Белорус. инж. акад. – 2000. – №1 (9)/2. – С. 122–124.
  8. Рубцевич И.И. Конструкторско-технологическая оптимизация силовых ДМОП-транзисторов // Изв. Белорус. инж. акад. – 2002. – №2 (14)/2. – С. 149–154.
  9. Korshunov F., Bogatyrev Yu., Lastovsky S., Kulgachev V., Anufriev L., Rubtsevich I., Golubev N. Investigation of radiation-induced defects in the electron irradiated power transistor structures // VACUUM. – 2003. – Vol.70, № 2-3. – P.197–200.
  10. Ануфриев Л.П., Глухманчук В.В., Турцевич А.С., Рубцевич И.И. Силовая микроэлектроника – ключ к новым энергосберегающим технологиям // ТЭО. – 2002. – № 6. – С. 26–29.
  11. Bersirova O., Kublanovsky V., Anufriev L., Rubtsevich I. Corrosion Behavior of Electroplated Silver Coatings // MATERIALS SCIENCE. – 2004. – Vol.10, №1. – P.11–14.
  12. Рубцевич И.И., Горлов М.И., Емельянов В.А., Смирнов Д.Ю. Методы диагностики полупроводниковых изделий с использованием электростатических разрядов // Микроэлектроника. – 2005. – Т.34, № 1. – С. 27–36.

#### Материалы научных конференций

13. Коршунов Ф., Богатырев Ю., Ластовский С., Кульгачев В., Ануфриев Л., Рубцевич И., Голубев Н. Влияние электронного облучения на параметры мощных биполярных транзисторных структур // Радиационная физика твердого тела: Труды 10-го Межнац. совещ., Севастополь, 3–8 июля 2000 г., Министерство образования Российской Федерации. – Севастополь, 2000. – С. 470 – 474.
14. Ануфриев Л.П., Коршунов Ф.П., Рубцевич И. И., Голубев Н.Ф. Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И. Использование гамма-излучения для повышения быстродействия мощных высоковольтных биполярных транзисторов // Актуальные проблемы твердотельной электроники: Материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. – Таганрог, 2000. – Ч.1. – С. 107–109.
15. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Мощные полупроводниковые приборы для энергосберегающих технологий. Особенности производства и перспективы применения // Современные проблемы проектирования и производства РЭС: Материалы семинара. – Новополоцк, 2000. – С. 85–89.
16. Коршунов Ф., Богатырев Ю., Ластовский С., Кульгачев В., Ануфриев Л., Рубцевич И., Голубев Н. Влияние радиационных дефектов на параметры мощных биполярных транзисторных структур // Взаимодействие излучений с твердым телом: Труды IV Междунар. конф., Минск, 3–5 октября 2001г. – Минск, 2001. – С.164–166.
17. Коршунов Ф.П., Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И., Голубев Н.Ф. Радиационно-технологические методы изготовления мощных биполярных транзисторов // Symposium Proceedings II Intern. Symp. “New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation”. – Kazimierz Dolny, Poland. – 2001. – P. 118–121.

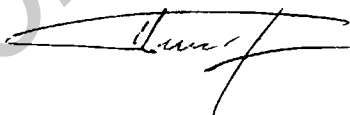
18. Ануфриев Л.П., Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И., Рубцевич И.И., Голубев Н.Ф. Использование быстрых электронов для регулирования параметров высоковольтных биполярных транзисторов // Радиационная физика твердого тела: Материалы XI Межн. совещ. – Минск, 2001. – С. 372–376.
19. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Повышение надежности мощных полевых транзисторов в режимах вторичного пробоя // Современные информационные и электронные технологии: Материалы 11-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Одесса, 2001. – С. 326–327.
20. Рубцевич И.И. Регулирование порогового напряжения  $n$ -канального МОП-транзистора методом радиационного воздействия гамма-квантами // Современные информационные и электронные технологии: Материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф. – Одесса, 2001. – С. 316–317.
21. Ануфриев Л.П., Голубев Н.Ф., Рубцевич И.И. Разработка высоковольтного биполярного транзистора с изолированным затвором для энергосберегающих технологий // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы Второй Междунар. науч.-техн. конф. – Новополюцк, 2002. – Т. 2. – С.151–154.
22. Korshunov F., Bogatyrev Yu., Lastovsky S., Kulgachev V., Anufriev L., Rubtsevich I., Golubev N. Investigation of radiation defects in electron irradiated power transistor structures // 4-th International Symposium on ion implantation and other application of ions and electrons: – Kazimier Dolny, Poland, June 10-13, 2002. – P. 101.
23. Korshunov F., Bogatyrev Yu., Lastovsky S., Kulgachev V., Anufriev L., Rubtsevich I., Golubev N.. Electron irradiation influence on parameters of diodes manufactured on  $p$ -type silicon // 4-th International Symposium on ion implantation and other application of ions and electrons: – Kazimier Dolny, Poland, June 10-13, 2002. – P. 100.
24. Ануфриев Л.П., Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И., Рубцевич И.И., Голубев Н.Ф., Глухманчук В.В., Гуринович В.А. Использование термостабильных радиационных дефектов для повышения быстродействия мощных диодов на кремнии  $p$ -типа // Радиационная физика твердого тела: Труды 13-го Междунар. совещ. – Севастополь, 2003. – С. 374–377.
25. Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И. Конструктивно-технологические особенности изготовления мощных МОП-транзисторов V поколения // Современные информационные и электронные технологии: Материалы Четвертой Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, Украина, 19-23 мая 2003 г. – Одесса, 2003.– С. 249.
26. Рубцевич И.И., Ануфриев Л.П., Керенцев А.Ф. Сборка MOSFET-транзисторов в герметичном корпусе для поверхностного монтажа // Современные информационные и электронные технологии: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Одесса., 2004.– С.183.
27. Рубцевич И.И., Ануфриев Л.П., Голубев Н.Ф. Радиационные технологии в промышленном производстве силовых полупроводниковых приборов // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество: науч.тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13 – 15 октября 2004 г. – Мн.:БГУ, 2004.– С.128 – 131.

28. Дударчик А.И., Рубцевич И.И. Мощный  $n$ -канальный МОП-транзистор КП723. Конструкция и особенности применения / Микроэлектроника в медицине, автомобиле- и тракторостроении: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Минск, 1994. – С.16 –17.
29. Дударчик А.И., Рубцевич И.И. Серия фиксированных положительных стабилизаторов напряжения / Направления и перспективы развития микроэлектронной элементной базы, электронных блоков и узлов систем связи и информатики: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Минск, 1994. – С.7–8.
30. Горлов М. И., Рубцевич И. И., Шишкин И. А. Общие закономерности по влиянию электростатических разрядов на полупроводниковые изделия с МОП-структурой / Современные средства связи: Тез. докл. междунар.науч.-техн. конф. Нарочь, 27 сентября –1 октября 2004 г. – Минск, 2004. – С.89 –91.
31. Школьник С.Б., Рубцевич И.И., Барбарчук Д.В., Вашкевич Л.И. Пайка кристаллов мощных транзисторов на автомате присоединения кристаллов ЭМ-4685-14М в среде форминг-газа // Пайка в приборостроении и машиностроении. Технология и материалы: Материалы науч.-практ.семинара, – Санкт-Петербург, 2003. – С. 27–33.

#### Авторские свидетельства и патенты

32. А.с. 1289308 СССР, МКИ<sup>4</sup> С 25 D 5/01 3/49. Способ ионно-химического травления пластин из немагнитных материалов / С.А.Готлиб, Л.И.Гурский, А.И. Дударчик, В.А.Зеленин, М.И.Паничев, И.И.Рубцевич (СССР). – №3912302; Заявл. 16.06.1985; Зарегистр. 8.10.1986. ДСП.
33. А.с. 1297664 СССР, МКИ<sup>4</sup> С25 D 5/21 3/4. Способ ионно-химического травления пластин из немагнитных материалов / С.А.Готлиб, А.И.Дударчик, М.И.Паничев, И.И.Рубцевич (СССР). – №3755548; Заявл. 26.06.1984; Зарегистр. 15.11.1986. ДСП.
34. А.с. 1771346 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 01 L 21/72. Способ изготовления накопительного конденсатора элемента памяти интегральных схем / И.И.Рубцевич, А.С.Турцевич, Г.А.Корешков, А.Е.Кусенок, О.Ю.Наливайко, Л.В.Кастрицкий (СССР). – №4904086; Заявл. 22.01.1991; Зарегистр. 22.06.1992. ДСП.
35. А.с. 1783935 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 01 L 21/72. Способ изготовления накопительного конденсатора элемента памяти интегральных схем / И.И. Рубцевич, А.С.Турцевич, В.Я.Красницкий, А.И.Дударчик, О.Ю.Наливайко, А.Л.Козлов, В.А.Сосновский (СССР). – №4904602; Заявл. 22.01.1991; Зарегистр. 22.08.1992. ДСП.
36. Свидетельство об официальной регистрации топологии интегральной микросхемы. РФ. № 2001630003. Мощный  $n$ -канальный полевой транзистор, управляемый логическим уровнем напряжения (КП775 А-В) / Л.П.Ануфриев, А.М.Алиев, М.М.Кречко, И.П.Прыткова, И.И.Рубцевич. – № 2001630003; Заявл. 19.04.2001; Зарегистр. 08.08.2001.
37. Пат. а 4014 ВУ, МКИ С1 Н 01L 29/72. Мощный биполярный транзистор, устойчивый к обратному вторичному пробую / Л.П.Ануфриев, Н.Ф.Голубев,

- А.И.Дударчик, А.П.Маткошевский, И.И.Рубцевич. – №а19980208; Заявл. 04.03.1998; Зарегистр. 16.03.2001.
38. Пат. 4025 ВУ, МКИ Н 01 L 29/78, Н 01 L 21/331. Способ изготовления мощного высоковольтного ДМОП-транзистора / А.М.Алиев, Л.П.Ануфриев, А.И.Дударчик, И.И.Рубцевич. - № а 19980232; Заявл.10.03.1998; Зарегистр. 16.03.2001.
39. Пат. 4024 ВУ, МКИ Н 01 L 29/78, Н 01L 21/425. Способ изготовления мощного высоковольтного ДМОП-транзистора / А.М.Алиев, Л.П.Ануфриев, А.И.Дударчик, М.М.Кречко, И.И.Рубцевич. – № а 19980233; Заявл. 10.03.1998; Зарегистр. 16.03.2001.
40. Пат. 4476. ВУ, МКИ Н 01 L 30/76, Н 01 L 23/347. Способ изготовления мощного высоковольтного ДМОП-транзистора / А.М.Алиев, Л.П.Ануфриев, А.И.Дударчик, М.М.Кречко, И.И.Рубцевич. № а 19990584; Заявл. 10.06.1999; Зарегистр. 18.02.2002.
41. Пат. 6250. ВУ, МКИ Н 01 L 29/73. Мощный биполярный транзистор / Н.Ф.Голубев, Л.П.Ануфриев, И.И.Рубцевич. № а 20010137; Заявл. 21.02.2001; Зарегистр. 13.02.2004.
42. Свидетельство об официальной регистрации интегральной микросхемы. РФ. №2004630023. (КП504А). Маломощный n-канальный полевой транзистор / А.М.Алиев, Л.П.Ануфриев, И.П.Воробьева, М.М.Кречко, И.И.Рубцевич. №2004630022; Заявл. 22.04.2004; Зарегистр. 22.06.2004.
43. Свидетельство об официальной регистрации топологии интегральной микросхемы. РФ. №2004630024 (КП523А). Маломощный n-канальный полевой транзистор / А.М.Алиев, Л.П.Ануфриев, И.П.Воробьева, М.М.Кречко, И.И.Рубцевич. №2004630028; Заявл. 8.06.2004; Зарегистр. 30.07.2004..



Рубцэвіч Іван Іванавіч

Распрацоўка працэсаў фарміравання высокаінтэгрыраваных  
структур палявых транзістараў для сілавой электронікі

**Ключавыя словы:** палявы транзістар, ДМВП-транзістар, сілавая электроніка, ячэйка крышталія, структура, тапалогія, разлік, электрычныя параметры, тэхналагічны працэс, электростатычнае ўздзеянне.

А'б'ектам даследавання з'яўляюцца цвёрдацельныя структуры магутных ДМВП-транзістараў і тэхналагічныя працэсы іх фарміравання. Прадметам даследавання з'яўляюцца карэляцыйныя залежнасці электрычных параметраў магутных ДМВП-транзістараў ад фізіка-тапалагічных характарыстык крышталія, алгарытмы разлікаў і аптымізацыі рабочых характарыстык пры сінтэзе структуры ДМВП-транзістараў, узаемасувязі іх электрычных параметраў і эксплуатацыйных характарыстык з тэхналагічнымі рэжымамі ў працэсе серыйнай вытворчасці. Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка метадаў праектавання  $n$ - і  $p$ -канальных магутных палявых транзістараў з вертыкальнай структурай – ДМВП-транзістараў з рабочымі напружаннямі да 1000 В, токамі да 75 А і рассяйвалнай магутнасцю да 200 Вт і адаптацыя да іх серыйных працэсаў планарнай тэхналогіі выраба маламагутных інтэгральных мікрасхем.

Вызначаны карэляцыйныя залежнасці паміж фізіка-тапалагічнымі параметрамі высокавольтных і моцнатокавых ДМВП-транзістараў з вертыкальнай структурай і іх статычнымі і дынамічнымі характарыстыкамі, такімі як парогавае і прабіўное напружанне, супраціўлення прыбора ў адкрытым стане, крутасць, паразітныя ёмістасці. На аснове гэтых залежнасцей распрацаваны і праграма рэалізаваны аптымізацыйныя алгарытмы разліку структуры элементарнай ячэйкі высокаінтэгрыраванага ДМВП-транзістара і тэхналагічныя рэжымы яе фарміравання, якія забяспечваюць зададзеныя электрычныя параметры прыбораў.

Выяўлены заканамернасці ўплыва рэжымаў асобных аперацый тэхналагічных працэсаў на электрычныя характарыстыкі ДМВП-транзістараў, на аснове якіх распрацаваны рад тэхналагічных маршрутаў выраба прыбораў, якія ўключаюць у прыватнасці самасумяшчоннае фарміраванне актыўных ячэек магутных ДМВП-транзістараў, увядзенне дадатковых тэрмічных аперацый.

Устаноўлены новыя заканамернасці радыяцыйнага ўздзеяння на структуры ДМВП-транзістараў, якія прыводзяць да змянення парогавых характарыстык прыбораў, на аснове якіх прапанаваны і навукова абгрунтаваны тэхналагічныя працэсы, якія забяспечваюць магчымасць кіравання велічынёй парогавага напружання прыбораў пад уздзеяннем радыяцыйных гама-квантаў і высокаэнергетычных электронаў.

Устаноўлены заканамернасці адказаў высокаінтэгрыраваных вертыкальных ДМВП-транзістараў, пад уздзеяннем статычнай электрычнасці ў камбінацыі з тэмпературным ( $-60^{\circ}\text{C}$  -  $+150^{\circ}\text{C}$ ) і ўдарна-механічным (да 150 г) дэстабілізуючымі фактарамі, якія дазволілі распрацаваць канструктарска-тэхналагічныя рэкамендацыі і меры па павышэнню надзейнасці работы прыбораў.

Распрацаваны і выкарыстоўваюцца ў серыйнай вытворчасці на УП "Завод Транзістар" НВА "Інтэграл" тэхналагічныя маршруты вырабу магутных ДМВП-транзістараў, якія створаны на базе тэхналагічных працэсаў КМВП БІС і сілавых біналярных транзістараў, што забяспечвае нізкі ўзровень дэфектнасці, памяншэнне геаметрычных размераў дыскрэтных элементаў высокаінтэгрыраванай структуры транзістара і плошчы крышталія, паляпшэнне ёмкасных і дынамічных характарыстык прыбораў, павышэнне якасці і надзейнасці вырабаў.

Рубцевич Иван Иванович

Разработка процессов формирования высокоинтегрированных структур полевых транзисторов для силовой электроники

**Ключевые слова:** полевой транзистор, ДМОП-транзистор, силовая электроника, ячейка кристалла, структура, топология, расчет, электрические параметры, технологический процесс, электростатическое воздействие.

Объектом исследования являются твердотельные структуры мощных ДМОП-транзисторов и технологические процессы их формирования. Предметом исследования являются корреляционные зависимости электрических параметров мощных ДМОП-транзисторов от физико-топологических характеристик кристалла, алгоритмы расчета и оптимизации рабочих характеристик при синтезе структуры ДМОП-транзисторов, взаимосвязи их электрических параметров и эксплуатационных характеристик с технологическими режимами в процессе серийного производства. Целью работы является разработка методов проектирования *n*- и *p*-канальных мощных полевых транзисторов с вертикальной структурой – ДМОП-транзисторов с рабочими напряжениями до 1000 В, токами до 75А и рассеиваемой мощностью до 200 Вт и адаптация к ним серийных процессов планарной технологии изготовления маломощных интегральных микросхем.

Установлены корреляционные зависимости между физико-топологическими параметрами высоковольтных и сильноточковых ДМОП-транзисторов вертикальной структуры и их статическими и динамическими характеристиками, такими как пороговое и пробивное напряжение, сопротивление прибора в открытом состоянии, крутизна, паразитные емкости. На основании этих зависимостей разработан и программно реализован оптимизационный алгоритм расчета структуры элементарной ячейки высокоинтегрированного ДМОП-транзистора и технологические режимы ее формирования, обеспечивающие задаваемые электрические параметры приборов.

Выявлены закономерности влияния режимов отдельных операций технологических процессов на электрические характеристики ДМОП-транзисторов, на основании которых разработан ряд технологических маршрутов изготовления приборов, включающие в частности самосовмещенное формирование активных ячеек мощных ДМОП-транзисторов, введение дополнительных термических операций.

Установлены новые закономерности радиационного воздействия на структуры ДМОП- транзисторов, приводящие к изменению пороговых характеристик приборов, на основании которых предложены и научно обоснованы технологические процессы, обеспечивающие возможность управления величиной порогового напряжения приборов при воздействии радиационного облучения гамма-квантами и высокоэнергетическими электронами.

Установлены закономерности отказов высокоинтегрированных вертикальных ДМОП-транзисторов при воздействии статического электричества в комбинации с температурным (-60 °С – +150 °С) и ударно-механическим (до 150 г) дестабилизирующими факторами, позволившие разработать конструкторско-технологические рекомендации и меры по повышению надежности работы приборов.

Разработаны и используются в серийном производстве на УП “Завод Транзистор” НПО “Интеграл” технологические маршруты изготовления мощных ДМОП-транзисторов, созданных на базе технологических процессов КМОП БИС и силовых биполярных транзисторов, что обеспечивает низкий уровень дефектности, уменьшение геометрических размеров дискретных элементов высокоинтегрированной структуры транзистора и площади кристалла, улучшение емкостных и динамических характеристик приборов, повышение качества и надежности изделий.



Development of the Processes for Formation of Highly-Integrated  
FET Structures for Power Management

Ivan I. Rubtsevitch

**Key words:** FET, DMOS transistor, power management, chip cell, structure, topology, computation, electrical parameters, process, ESD impact.

**Object of investigation** is solid-state structures of power DMOS transistors and the processes of their formation.

**Subject of investigation** is correlation dependencies of electrical parameters of power DMOS transistors versus physical and topological characteristics of chips, algorithms for computation and optimization of the performance characteristics during synthesis of DMOS transistor structures, interrelations between their electrical parameters and field-performance data and the process conditions in full-scale production.

**Objective of research** is development of the methods for designing power n- and p-channel vertical FETs – DMOS transistors with operating voltages to 1,000V, currents to 75A and power dissipation to 200W, and tailoring to those of the serial planar processes for fabrication of low-power integrated circuits.

The correlation dependencies of physical and topological parameters of high-voltage and high-current vertical DMOS transistors versus their static and dynamic characteristics such as threshold and breakdown voltages, on-resistance of the device, forward transconductance, parasitic capacitances have been defined. Based on those dependencies, an optimization algorithm for computation of the structure of the elementary cell for high-integrated DMOS transistors and the process conditions of its formation, which provides the required electrical parameters of devices, have been developed and software-implemented.

There have been found the regularities of influence of separate process steps to the electrical characteristics of DMOS transistors, based on which a row of process flows for fabrication of devices has been developed, particularly including self-aligned formation of active cells of power DMOS transistors, introduction of additional thermal operations.

There have been defined the new regularities of radiation impact to DMOS transistor structures, which drives to the changes in the threshold characteristics of devices, on which basis there have been proposed and scientifically grounded the processes that provide the possibility to control threshold voltages of devices when exposed to gamma- and high-energy electron irradiation.

There have been defined the regularities of failures of highly-integrated vertical DMOS transistors when exposed to ESD impacts coupled with temperature (-60°C - +150°C) and shock-and-mechanical (up to 150g) destabilizing factors, which has allowed to develop engineering and technological recommendations and measures on the enhancement of reliability of devices.

There have been developed and used in full-scale production at UE Transistor Plant of SPA Integral the process flows for fabrication of the power DMOS transistors implemented on the basis of CMOS LSI processes and power bipolar transistors, which provides low failure percentage, reduction in geometric sizes of discrete elements of highly-integrated transistor structures and of the chip area, enhancement of quality and reliability of the devices.

РУБЦЕВИЧ ИВАН ИВАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
ВЫСОКОИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ  
ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать	02.06.2005.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.		Заказ 3.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.  
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.