

На правах рукописи



ШОБОЛОВА Тамара Александровна

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
СОЗДАНИЯ КНИ МОП- И БИПОЛЯРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИС С
УЛУЧШЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Научный руководитель: **Оболенский Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой квантовой радиофизики и
электроники ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И.
Лобачевского»

Официальные оппоненты: **Каргин Николай Иванович**
доктор технических наук, профессор, советник
при ректорате ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский ядерный университет
«МИФИ», директор центра радиофоники и
СВЧ технологий НИЯУ МИФИ, заслуженный
деятель науки РФ

Павлов Александр Александрович
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
ФГБУН «Институт нанотехнологий
микрoeлектроники Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт автоматизации им. Н.Л.
Духова» (г. Москва).

Защита состоится 17 июня 2025 г. в 14⁰⁰ часов в конференц-зале на
заседании диссертационного совета 24.2.286.01 ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж,
Московский проспект, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на
сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан 7 апреля 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Стогней О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке новых типов конструкции радиационно-стойких элементов интегральных схем (ИС) с улучшенными параметрами:

- металл-оксид-полупроводник транзистор (МОПТ) с двухслойным поликремниевым затвором;
- биполярный транзистор с боковым контактом к базе;
- стабилитрон с управляющим контактом.

В работе представлены результаты исследования их характеристик и возможности создания в едином технологическом процессе, объединяющем биполярные и комплементарные металл-оксид-полупроводник транзисторы (БиКМОП-технология).

Предложенные конструкции элементов обладают улучшенными электрофизическими характеристиками, повышенной радиационной стойкостью, быстродействием по сравнению с известными аналогами, и предназначены для изготовления на их основе высоконадежных компактных ИС с возможностью управления параметрами элементов в процессе функционирования ИС.

Дополнительно в работе исследованы характеристики МОПТ с проектными нормами 90 нм и предложен способ уменьшения тока утечки через подзатворный диэлектрик.

Актуальность темы исследований

Интегральные схемы, обладающие повышенной надежностью, быстродействием и стойкостью к различным видам ионизирующих излучений искусственного и естественного происхождения чрезвычайно востребованы для обеспечения необходимой функциональности и надежности перспективной специальной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), предназначенной для оснащения изделий военной техники и космических аппаратов.

Повышение радиационной стойкости ИС в целом сводится к повышению радиационной стойкости характеристик составляющих схему элементов. При этом улучшение одних характеристик элемента не должно отрицательно сказываться на других его характеристиках. При разработке элементов ИС разработчики стараются найти оптимальное решение, учитывая несколько направлений модификации, свойственное данному элементу и допустимое разрабатываемой технологией.

При этом следует максимально стремиться к разработке универсальных конструктивно-технологических решений у аналогичных элементов, что в целом положительно скажется на унификации маршрута изготовления ИС.

Существующая в настоящее время радиационнотойкая технология изготовления КМОП ИС на основе структур кремний-на-изоляторе (КНИ), применяемая отечественными и зарубежными фабриками и описанная в литературе, обладает рядом существенных недостатков: высокой зависимостью спецстойкости от качества захороненного оксида, «щелевой» изоляции (или изоляции мелкой канавкой – Shallow Trench Isolation – STI) и ограничением степени интеграции и быстродействия вследствие вынужденной необходимости применения транзисторов Н, R, O-типа, имеющих большие размеры, и, как следствие, накладывающих ограничение по степени быстродействия из-за высоких паразитных емкостей затвора. Это делает задачу поиска и создания новых подходов к обеспечению радиационной стойкости ИС при сохранении высокой степени интеграции и быстродействия крайне актуальной.

В данной работе представлены результаты разработки конструктивного, технологического и топологического базиса на основе инновационных, не имеющих аналогов так называемых «бескраевых» полосковых транзисторов малых размеров с повышенным быстродействием, степенью интеграции и радиационной стойкостью (к гамма-воздействию). Разработанные базовые элементы могут использоваться для проектирования и изготовления быстродействующих и многофункциональных цифровых, аналоговых и радиочастотных радиационнотойких ИС нового поколения.

Следует отметить, что основным фактором, ограничивающим стойкость КМОП-транзистора к гамма-импульсу (а также нейтронам и тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ)) является качество его подзатворного диэлектрика. При его технологически максимально возможном качестве дальнейшее повышение надежности и радиационной стойкости транзистора может быть связано с применением мер снижения напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике в рабочем режиме транзистора, что впервые было реализовано в представленной работе за счет применения особых конструктивных решений.

У разработчиков спецаппаратуры перспективных изделий востребованы современные унифицированные многофункциональные ИС, включающие в свой состав аналоговые блоки связи (интерфейс ИС с внешним миром) на основе биполярных транзисторов, и цифровые блоки управления на основе КМОП транзисторов, в т.ч. с возможностью их использования также в переходных ключах. Такие ИС изготавливаются с использованием так называемых БиКМОП технологических процессов. Главный недостаток БиКМОП технологии – сложность изготовления в едином технологическом процессе двух типов (биполярных и КМОП)

радиационнотойких транзисторов, отличающихся технологически и конструктивно. Данная проблема также исследована и решена в представленной работе за счет разработки и научного обоснования специальной конструкции биполярного транзистора и применения новых технологических решений.

При этом большой проблемой также является необходимость создания радиационнотойких высокотоковых транзисторов (например, для использования в ячейках ввода-вывода), требующих для изготовления технологические слои с параметрами, отличными от параметров в низковольтном ядре ИС. Задача создания данного типа транзисторов, технологически совместимого с базисным блоком транзисторов, также решена в представленной работе.

У разработчиков спецаппаратуры часто возникает необходимость регулировать параметры интегральных схем в процессе её работы для компенсации изменений, возникающих в результате воздействия внешних воздействующих факторов (ВВФ) (ионизирующих, термо-, баро-). Создание универсального элемента, характеристиками которого можно управлять посредством подачи напряжения в процессе работы ИС существенно облегчит задачу разработки интегральных схем, работающих в условиях ВВФ. Дополнительно, разработка элемента ИС с активно изменяемыми параметрами существенно упрощает как задачу технолога, так и разработчика ИС, позволяя вместо набора нескольких базовых элементов использовать лишь один вариант исполнения. В данной работе предложена, разработана и исследована конструкция и технология изготовления универсального радиационнотойкого стабилизатора на структуре КНИ, рабочим напряжением которого можно управлять.

В результате исследования описанных проблем и поиска путей их решения был разработан и научно обоснован базовый технологический процесс (БТП), объединяющий возможность создания всех приведенных типов элементов ИС новой предложенной конструкции в едином технологическом процессе на базе стандартного комплекта технологического оборудования, применяемого для реализации КМОП-маршрута.

Основная цель и задачи работы

В связи с вышеизложенным определилась основная цель работы: разработка и научное обоснование конструктивно-технологических решений создания элементов субмикронных ИС на структурах КНИ, обеспечивающих повышение их радиационной стойкости, надежности, быстродействия и степени интеграции элементов на кристалле.

Для достижения данной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработка и научное обоснование конструктивно-технологических решений, позволяющих достичь:

– увеличения степени интеграции ИС при сохранении проектной нормы;

– повышения быстродействия ИС за счет снижения паразитных емкостей и времен задержки в МОПТ;

– уменьшения влияния негативных эффектов, возникающих при воздействии ионизирующего излучения, на параметры элементов ИС на структурах КНИ.

2. Разработка и научное обоснование конструктивно-технологических решений, совместимых с базовым КМОП технологическим процессом, создания универсальных МОПТ с оригинальным двухслойным поликремниевым затвором, которые могут использоваться в качестве стандартных базовых элементов цифровой схемы (логических вентилях), а также в переходных ключах и ячейках ввода-вывода.

3. Разработка и научное обоснование конструкции и КМОП-совместимой технологии создания радиационностойкого биполярного КНИ-транзистора с высоким значением коэффициента усиления тока.

4. Разработка и научное обоснование конструктивно-технологических решений создания КНИ-стабилитрона с управляемым рабочим напряжением.

Научная новизна:

В данной работе впервые:

1. Получена зависимость напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике оригинального МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором от радиуса закругления нижних углов поликремниевого затвора и определено его оптимальное значение для максимального повышения надежности и радиационной стойкости ИС.

2. Определена зависимость времени задержки кольцевых генераторов от расстояния между карманом и поликремниевой шиной в предложенном оригинальном конструктивно-технологическом исполнении МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором, рассчитано оптимальное значение данного расстояния для достижения максимального быстродействия ИС.

3. Установлена зависимость крутизны проходной ВАХ от расстояния между контактами к карману у разработанного МОПТ

оригинальной конструкции с совмещенным с истоком контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором.

4. Получена зависимость коэффициента усиления по току от длины активной области базы и определено ее оптимальное значение для радиационнстойкого биполярного КНИ-транзистора оригинальной конструкции с боковым контактом к базе.

5. Определена зависимость напряжения пробоя обратной ветви р-п перехода стабилитрона оригинальной конструкции с управляемым рабочим напряжением от приложенного напряжения на управляющий контакт.

Практическая значимость

1. Предложены новые конструктивно-технологические решения создания МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором, обладающих следующими преимуществами по сравнению с МОПТ с однослойным поликремниевым затвором:

- повышенное быстродействие в два и более раза;
- повышенная надежность (за счет увеличения напряжения пробоя подзатворного диэлектрика в ~ 4 раза);
- меньшая (до двух раз) занимаемая площадь (возможность повышения степени интеграции в ~ 2 раза при сохранении проектной нормы);
- радиационной стойкостью к накопленной дозе гамма-излучения, необходимой для создания ИС специального, в т.ч. космического, применения.

– возможностью использования таких транзисторов в качестве проходных ключей за счет симметричности областей истока и стока.

2. Предложена конструкция широкого (до 100 квадратов) высокотокового МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором с зависимым контактом к карману, который можно использовать в элементах ввода-вывода с повышенной мощностью.

3. Разработана конструкция радиационнстойкого биполярного КНИ-транзистора с высоким статическим коэффициентом усиления β (до гамма-облучения $\beta \cong 54$, после облучения $\beta \cong 85$).

4. Разработана конструкция нового типа управляемого КНИ-стабилитрона, рабочее напряжение которого можно кратно ($1.8 \div 2.2$ раза) изменять напряжением, подаваемым на дополнительный контакт, обеспечивая возможность управления параметрами стабилитрона.

Методология и методы исследования

Для разработки и подтверждения конструктивно-технологических решений использовалось приборное и технологическое математическое моделирование и экспериментальное апробирование элементов интегральных схем оригинальных конструкций: МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором и независимым контактом к карману, МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором и совмещенным с истоком контактом к карману, биполярный транзистор с боковым контактом к базе и стабилитрон с управляющим контактом. Перед математическим моделированием по экспериментально полученным характеристикам изготовленных образцов проводилась калибровка моделей имплантации, диффузии примеси, осаждения слоев оксида кремния и поликремния, переноса носителей заряда. Экспериментальное исследование образцов в отличие от математического моделирования является дорогостоящим и времязатратным поэтому при разработке конструктивно-технологических решений изначально проводят моделирование конструкции и характеристик разрабатываемых элементов ИС.

Изготовленные тестовые структуры исследовались экспериментально: получены входные и выходные характеристики МОП-транзисторов, входная и выходные характеристики биполярного транзистора. Оригинальные элементы интегральных схем обладают следующими преимуществами над аналогами: МОПТ характеризуется меньшим напряжением пробоя подзатворного диэлектрика вследствие формирования поликремниевого затвора с определенным радиусом закругления его нижних углов, биполярный транзистор – повышенной стойкостью к гамма-облучению и повышенным значением коэффициента усиления, стабилитрон – возможностью изменения рабочего напряжения в процессе эксплуатации.

Актуальность разработанности темы

Увеличение области применения микросхемы приводит к необходимости разработки универсальных элементов интегральных схем. Универсальность элементов заключается в возможности изготовления на подложках разного типа и для разного рода схем.

В работе был разработан латеральный радиационностойкий биполярный транзистор с боковым контактом к базе, характеризующийся высокими значениями коэффициента усиления. Такой транзистор можно изготавливать как на подложка КНИ с приборным слоем кремния толщиной более 0,2 мкм, так и на подложках объемного кремния.

Также был разработан стабилитрон с управляющим контактом. Универсальность предложенной конструкции заключается в возможности

изменять рабочее напряжение элемента в процессе эксплуатации посредством приложения напряжения на управляющий контакт.

В работе предложены варианты конструкций МОП-транзисторов с двухслойным поликремниевым затвором. Такие транзисторы по сравнению с аналогами характеризуются повышенным значением быстродействия, повышенной надежностью (за счет увеличения напряжения пробоя подзатворного диэлектрика в ~ 4 раза), меньшей (до двух раз) занимаемой площадью, что позволяет повысить степень интеграции в ~ 2 раза при сохранении проектной нормы, радиационной стойкостью к накопленной дозе гамма-излучения, необходимой для создания ИС специального, в том числе космического, применения, возможностью использования таких транзисторов в качестве проходных ключей за счет симметричности областей истока и стока.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Конструкция симметричного МОП-транзистора с двухслойным поликремниевым затвором на структуре КНИ, отличающаяся от существующих аналогов наличием независимого контакта к карману.

2. Выявлена взаимосвязь радиуса закругления нижних углов затвора и напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике МОП-транзистора с двухслойным поликремниевым затвором.

3. Конструкция широкого МОП-транзистора с двухслойным поликремниевым затвором на структуре КНИ, отличающаяся от существующих аналогов возможностью формировать несколько зависимых контактов к карману.

4. Конструкция радиационностойкого биполярного транзистора на структуре КНИ, отличающаяся от существующих аналогов наличием бокового контакта к базе.

5. Конструкция стабилитрона на структуре КНИ, отличающаяся от существующих аналогов наличием управляющего контакта.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы отражены в 21 публикациях, в том числе 9 статей в рецензируемых журналах, 4 патентах, 9 тезисах и трудах научных конференций и семинаров.

Автор Шоболова Т.А. самостоятельно разработала конструкции и технологию изготовления описанных в работе элементов ИС, провела численный расчет параметров разработанных приборных композиций и их электрофизических характеристик в системе автоматизированного проектирования Sentaurus TCAD. Представленные в работе экспериментальные работы по исследованию полупроводниковых

структур (облучение структур в рентгеновском имитационном комплексе (РИК), измерение их электрофизических параметров (ЭФП) в диапазоне температур и при разных дозах облучения) и обработка полученных результатов также выполнены Т.А. Шоболовой лично.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на XXIV (2020 г.), XXV(2021 г.), XXVI (2022 г.) международных конференциях «Нанозлектроника», XIII межотраслевой конференции по радиационной стойкости (2021 г.), XXI координационном научно-техническом семинаре по СВЧ технике (2022 г.), XV научно-технической конференции молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (2021 г.), 19-й научно-технической конференции «Молодежь в науке» (2022 г.), 23-я Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» (2020 г.).

Внедрение научных результатов

Основные научные результаты использованы в Филиале Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (далее – НИИИС) при выполнении СЧ ОКР «Базука-Э-Интеллект», СЧ ОКР «Базилика-С-Технология-СМ», СЧ ОКР «Базука-Э-Питание-Т», СЧ ОКР «Базука-Э-Сила-СМ», а также при реализации комплексных проектов, выполняемых в рамках соглашения между госкорпорацией «Росатом» и Министерством промышленности и торговли Российской Федерации (ОКР «Комплекс-В», ОКР «БиКМОП», ОКР «Гидроакустика»).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 134 наименований. Работа изложена на 158 страницах, включая 59 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены цели исследований и дана общая характеристика работы, включая научную новизну и практическую ценность полученных результатов работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе I** представлен обзор литературы по теме диссертации.

В первой части обзора рассмотрены эффекты, связанные с уменьшением проектных норм в МОП-транзисторах.

Во второй части обзора описаны геометрия, основные характеристики биполярных транзисторов и принцип их работы. Отдельное внимание уделено радиационнстойким биполярным транзисторам на структурах КНИ.

В третьей части обзора описано устройство стабилитрона, его характеристики и принцип работы.

В **Главе II** описана методика эксперимента.

Элементы ИС изучались, в основном, посредством численного моделирования путем решения фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов. Для увеличения сходимости экспериментальных и рассчитанных результатов была проведена технологическая и конструктивная калибровка. Экспериментально исследовались МОП-транзисторы с проектной нормой 90 нм, биполярные транзисторы.

В работе экспериментально исследовались n- и p-канальные КНИ МОП-транзисторы с разным геометрическим соотношением ширина и длины канала W/L при значениях температуры: -60C , -20C , $+22\text{C}$, $+85\text{C}$, $+125\text{C}$.

Гамма-облучение транзисторов проводилось в пассивном режиме имитационным методом на рентгеновском испытательном комплексе с дозами: 0 ; $0,1 \cdot D_{\max}$; $0,5 \cdot D_{\max}$; D_{\max} (D_{\max} – максимальное значение дозы).

Гамма-облучение дозой D_{\max} при численном моделировании имитировалось введением положительных зарядов на границу Si/SiO₂ концентрацией 10^{12} см^{-2} .

В **Главе III** представлены результаты исследования характеристик, разработанных МОП-транзисторов с двухслойным поликремниевым затвором, обладающих повышенными скоростными характеристиками, надежностью и радиационной стойкостью (рисунок 1).

Посредством математического моделирования показано, что паразитная емкость транзистора с двухслойным поликремниевым затвором меньше в ~ 30 раз, чем у транзистора с однослойным поликремниевым затвором за счет соотношения толщин окисла $h_{\text{ox2}}/h_{\text{ox1}} \approx 30$ (рисунок 1) при меньшей в ~ 2 раза занимаемой площади.

Моделирование в САПР ф. Cadence (симулятор Spectre) на основе извлеченных SPICE-параметров (относительная ошибка $\leq 15\%$) кольцевых генераторов для расчета времени задержки на вентиль логических элементов «НЕ», «2И-НЕ», «2ИЛИ-НЕ» показало, что время задержки на вентиль у данных элементов на основе разработанных транзисторов с двухслойным

поликремниевым затвором **на 50-65 % меньше**, чем у элементов с классическими КМОП КНИ-транзисторами.

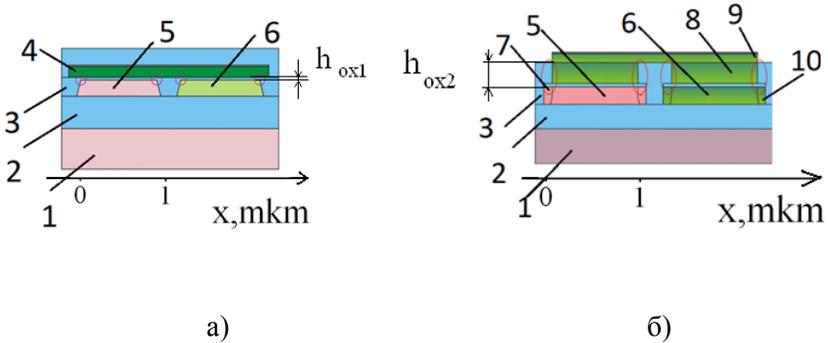


Рисунок 1 – Схематическое изображение поперечных сечений МОП-транзисторов: а) с однослойным поликремниевым затвором; б) с двухслойным поликремниевым затвором, где 1 – кремниевая подложка, 2 – слой захороненного оксида кремния, 3 – шелевая изоляция (оксид кремния), 4 – поликремниевая шина классического транзистора, 5 – p-карман n-МОП, 6 – n-карман p-МОП, 7 – p+охрана n-МОП, 8 – первый слой поликремниевого затвора неклассического транзистора, 9 – второй слой поликремниевого затвора или поликремниевая шина неклассического транзистора, 10 – n+охрана p-МОП. (Обведены проблемные области транзисторов)

На рисунке 2 приведено распределение напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике на расстоянии $4 \cdot 10^{-4}$ мкм от поверхности кремниевого островка ($0 < x < 1$ мкм) при напряжении на поликремниевой шине 1 В, а на кармане транзистора 0 В.

Из моделирования следует, что напряжение пробоя подзатворного диэлектрика классической структуры транзистора в 4 раза ниже напряжения пробоя подзатворного диэлектрика транзисторной структуры с двухслойным поликремниевым затвором.

Сравнивались транзисторы с двухслойным поликремниевым затвором, отличающиеся в 2 раза расстоянием между легированными областями кремния – контактами к подложке (рисунок 3а и 3б), а именно, $a = 3,5$ мкм (предложенный оригинальный транзистор), $b = 7$ мкм (прототип – транзистор Honeywell).

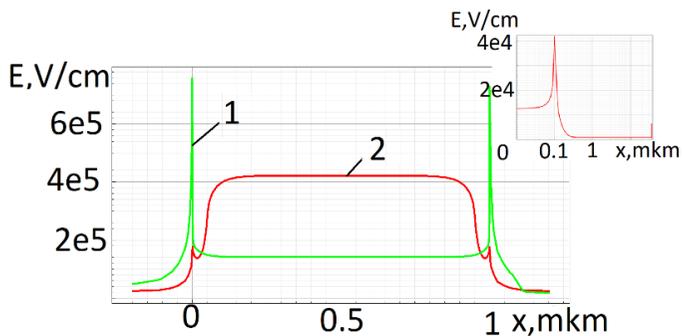


Рисунок 2 – Распределение напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике вблизи кремниевого островка, где 1 – для транзистора с однослойным поликремниевым затвором; 2 – для транзистора с двухслойным поликремниевым затвором. На врезке – распределение модуля напряженности электрического поля в слаболегированном кремниевом полупроводнике ($N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$) (ином) прямоугольной формы длиной x

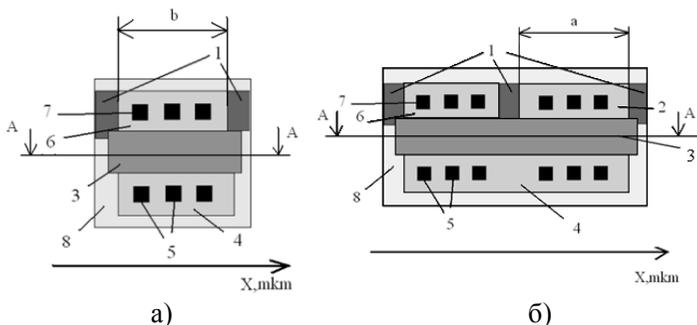


Рисунок 3 – Топология с расстоянием между легированными областями кремния: а) 3,5 мкм (Honeywell); б) 7 мкм, где 1 – контакт к карману; 2, 6 – исток транзистора; 3 – поликремниевый затвор; 4 – сток транзистора; 5 – силицидированный контакт к стоку; 7 – силицидированный контакт к истоку; 8 – охранная область транзистора

Полученные передаточные характеристики (рисунок 4) свидетельствует о лучшем управлении областью канала предложенного «широкого» транзистора по сравнению с прототипом.

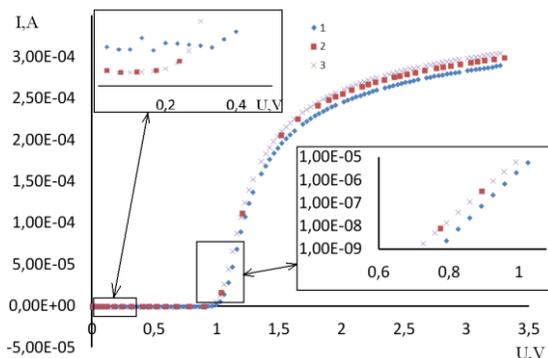


Рисунок 4 – Передаточные характеристики транзисторов оригинального и прототипа (Honeywell), где 1 – оригинального транзистора с напряжением на подложке $-0,5$ В; 2 – транзистора Honeywell, с напряжением на подложке $-0,5$ В; 3 – транзистора Honeywell с напряжением на подложке 0 В

Далее посредством численного моделирования рассмотрена конструкция транзистора с двухслойным поликремниевым затвором и с независимым контактом к карману (рисунок 6, аналоги транзисторов Т- и Н-типов). Топология такого транзистора может быть изготовлена по самосовмещенной технологии. Данные транзисторы можно использовать в качестве проходных ключей в ИС, что расширяет их область применения.

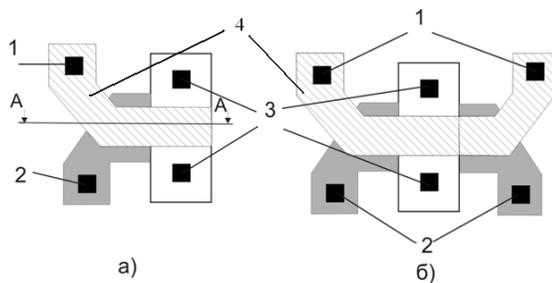


Рисунок 5 – Схематическое изображение оригинальных МОП-транзисторов: а) ПС-типа (аналог классическому транзистору Т-типа); б) ИС-типа (аналог классическому транзистору Н-типа), где 1 – контакт к затвору транзистора; 2 – контакт к карману транзистора; 3 – контакты к областям истока и стока транзистора, 4 – поликремниевые шины

В **Главе IV** описана конструкция и технология изготовления предложенного биполярного транзистора с боковым контактом к базе и повышенным коэффициентом усиления тока (рисунок 6). Характеристики

двух типов транзисторов до и после гамма-воздействия в зависимости от уровня наведенной плотности поверхностных состояний при напряжении на базе $U_b=0.7\text{ В}$ и напряжении коллектора $U_c=3.3\text{ В}$, были получены посредством математического моделирования и представлены в таблице 1.

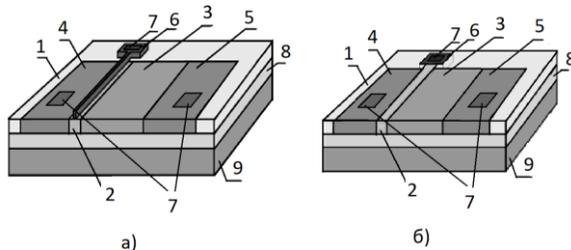


Рисунок 6 – Конструкции биполярных транзисторов с верхним (а) и периферийным (б) контактом к базе, где 1 – диэлектрическая изоляция, 2 – область активной базы, 3 – область n-коллектора, 4 – область p⁺-эмиттера, 5 – p⁺-коллектор, 6 – пассивная база, 7 – области контактов, 8 – «захороненный» диэлектрик, 9 – подложка

Таблица 1 – Параметры транзисторов с боковым и верхним контактом к базе

Тип базового контакта	Параметры транзисторов	До облучения	После гамма-облучения* (соответствующий уровень N_s)		
			$N_s = 10^{10}\text{ см}^{-2}$	$N_s = 10^{11}\text{ см}^{-2}$	$N_s = 10^{12}\text{ см}^{-2}$
С боковым контактом	$I_c, \text{ А}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$7.8 \cdot 10^{-4}$
	$I_b, \text{ А}$	$5.0 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$5.13 \cdot 10^{-8}$	$9.1 \cdot 10^{-6}$
	β	~ 54	~ 55	~ 56	~ 85
С верхним контактом	$I_c, \text{ А}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	отказ
	$I_b, \text{ А}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	отказ
	β	13.0	4.9	1.9	отказ

* – без учета влияния нейтронного излучения

Экспериментально показано, что транзисторы с классическим верхним контактом к области базы имеют значительно меньшую величину коэффициента передачи тока базы, после облучения наблюдается отказ их функционирования.

Посредством математического моделирования показано, что при гамма-воздействии на транзисторы с периферийным контактом к базе коллекторные и базовые токи возрастают, что обусловлено влиянием связанных положительных зарядов в диэлектриках. Однако катастрофических отказов работы транзисторов отмечено не было.

В **Главе V** описана конструкция и характеристики нового типа КНИ-стабилитрона, рабочим напряжением которого можно управлять подачей смещения на дополнительный контакт, приводя к изменению концентрации носителей заряда в слоях р-n перехода средней части стабилитрона (области 7 и 4 на рисунке 7).

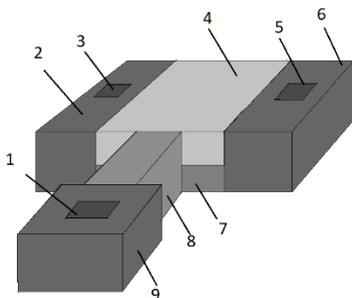


Рисунок 7 – Схематическое изображение управляемого стабилитрона, где 1 – силицированный контакт к управляющему контакту; 2 – сильнолегированный анод стабилитрона; 3 – силицированный контакт к аноду стабилитрона; 4 – слаболегированный анод (для стабилитрона ррп- типа) или катод (для npr- типа); 5 – силицированный контакт к катоду стабилитрона; 6 – сильнолегированный катод стабилитрона; 7 – нижний слой вертикального р-n перехода; 8 – легированный слой кремний, соединяющий управляющий контакт и нижний слой вертикального р-n перехода; 9 – сильнолегированная область управляющего контакта

Приведенные результаты были получены посредством математического моделирования.

Такой стабилитрон обладает следующими преимуществами:

- повышенная стойкость к нейтронному и импульсному гамма-воздействию;
- технология изготовления совместима с маршрутом КМОП-КНИ;
- меньшая занимаемая площадь, чем у известных аналогов;
- возможность управления рабочим напряжением стабилитрона.

На рисунке 8 приведены расчетные вольтамперные характеристики разработанного КНИ-стабилитрона npr-типа, построенные с использованием экспериментально полученных калиброванных моделей. При приложении на анод р-n перехода напряжения минус 0,5 В, напряжение пробоя стабилитрона уменьшается на 0,28 В (кривая *a* на рисунке 8).

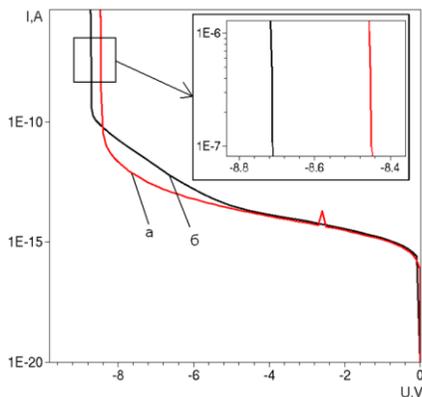


Рисунок 8 – Вольтамперные характеристики стабилитрона nnp-типа, при напряжении на управляющем контакте: а) -0,5 В; б) 0 В

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. В ходе работы были разработаны модели имплантации примеси и диффузии, позволяющие провести конструктивную и технологическую калибровку этих моделей по экспериментальным результатам со сходимостью более 95%. Это позволило с высокой точностью разработать конструкцию и технологию изготовления новых элементов ИС с улучшенными характеристиками.

2. Посредством численного моделирования была разработана конструкция МОПТ (патент №2739861), характеризующегося увеличенным радиусом закругления нижних углов затвора. Калибровка моделей окисления, осаждения, имплантации и диффузии, транспорта носителей заряда проводилась по экспериментально полученным результатам. Разработанные конструктивно-технологические решения, позволили увеличить степень интеграции ИС при сохранении проектной нормы (примерно в два раза), снизить паразитные емкости и времена задержки (примерно в два раза) в МОПТ, уменьшить влияние негативных эффектов, возникающих при воздействии ионизирующего излучения, на параметры элементов ИС на структурах КНИ, отличающихся тем что используется двуслойный поликремниевый затвор.

Посредством численного моделирования была оценена напряженность электрического поля в подзатворном диэлектрике МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором. Показано, что напряжение пробоя подзатворного диэлектрика МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором больше в ~ 4 раза напряжения пробоя МОПТ с

однослойным поликремниевым затвором, что позволяет изготавливать ИС с повышенной надежностью.

Посредством численного моделирования была разработана технология изготовления широкого МОПТ. Калибровка используемых моделей проводилась по экспериментально полученным результатам. Минимальное расстояние между контактами составляло 0,4 мкм. Таким образом, предложена конструкция МОПТ позволяющая изготавливать широкие транзисторы (до 100 квадратов) повышенной мощности. Такие МОПТ характеризуются двухслойным поликремниевым затвором. Они используются в качестве стандартных базовых элементов цифровой схемы (логических вентилях), а также в переходных ключах и ячейках ввода-вывода, отличающихся технологией изготовления.

По полученным результатам был оформлен патент №2758413. МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором были успешно внедрены и используются для изготовления ИС с улучшенной надежностью и увеличенными частотными характеристиками.

3. Посредством численного моделирования была разработана технология изготовления биполярного транзистора с боковым контактом к базе. При расчете структуры использовалось трехмерное моделирование. Калибровка моделей диффузии, осаждения, окисления, имплантации, транспорта носителей заряда проводилась по экспериментальным результатам. Для калибровки транспорта носителей заряда были изготовлены резисторы, диоды, стабилитроны, МОПТ. Предложена конструкция биполярного транзистора с боковым контактом к базе на КНИ, характеризующаяся стойкостью к гамма-воздействию и высоким коэффициентом усиления (до гамма-облучения $\beta \cong 54$, после облучения $\beta \cong 85$).

По полученным результатам был оформлен патент №2767597. Оригинальные биполярные транзисторы были изготовлены в СЧ НИР «Базука-Э-Питание», в комплексном проекте. Разработанная технология позволила изготавливать радиационностойкие аналоговые.

4. Посредством численного моделирования была разработана технология изготовления стабилитрона с управляющим контактом. Калибровка моделей окисления, осаждения, имплантации, диффузии и транспорта носителей заряда проводилась по экспериментальным результатам. Для калибровки моделей транспорта носителей заряда использовались резисторы, диоды и транзисторы. Шаг расчетной сетки структуры зависит от концентрации примеси в заданной области и уменьшается на р-п переходе. Проведенное моделирование позволило рассчитать оптимальную конструкцию стабилитрона с управляющим контактом. А именно – подобрать оптимальные концентрации областей

горизонтального р-п перехода в средней области стабилитрона. Таким образом, предложена конструкция стабилитрона на структуре КНИ с управляющим контактом, позволяющим изменять рабочее напряжение кратно ($1.8 \div 2.2$ раза), обеспечивая возможность управления параметрами стабилитрона. Полученные результаты позволили оформить патент №2783629.

Список работ по теме диссертации

- статьи, опубликованные в журналах Scopus:

1. Коротков А.В. Сравнение радиационной стойкости перспективных биполярных и гетеробиполярных транзисторов / А.В. Коротков, Е.В. Петрякова, Т.А. Шоболова, А.В. Липатников, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов // Физика и техника полупроводников, том 53, №10, 2019 г., с. 1391-1394.

2. Шоболова Т.А. Кремниевый метал-оксид-полупроводник транзистор с зависимым контактом к карману и двухслойным затвором / Т.А. Шоболова, С.Д. Рудаков, А.С. Мокеев, Е.Л. Шоболов, С.В. Оболенский // Физика и техника полупроводников. т.55, вып.10, 916-921, 2021.

3. Шоболова Т.А. Ток утечки через подзатворный диэлектрик в транзисторах с длиной канала до 100 нм / Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов // Физика и техника полупроводников, 2022. – Том 56. – №.7. – С.693-699.

- статьи, опубликованные в журналах ВАК:

4. Шоболова Т.А. Радиационно-стойкий биполярный транзистор на структурах «кремний на изоляторе» / Т.А. Шоболова, С.В. Оболенский, Ю.А. Кабальнов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, Выпуск 3 (258), 2020, с. 30.

5. Шоболова Т.А. Широкий кремниевый субмикронный металл-оксид-полупроводник транзистор с зависимым контактом к карману / Т.А. Шоболова, С.Д. Рудаков, А.С. Мокеев, С.В. Оболенский // Вестник Поволжье, выпуск №12, 2020 г., с. 239-241.

6. Шоболова Т.А. Скоростные малогабаритные транзисторы с независимым контактом к карману / Т.А. Шоболова, С.Д. Рудаков, А.С. Мокеев, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып.2 (262), 2021 г., с. 10-18.

7. Шоболова Т.А. Исследование короткоканальных эффектов полевых транзисторов с длиной канала 100 нм / Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып.1 (264), 2022 г., с.31-38.

8. Шоболова Т.А. Исследование методов определения порогового напряжения металл-оксид-полупроводник транзисторов разной геометрии / Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов, С.Д. Кузнецов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып.4 (263), 2021 г., с. 31-38.

9. Шоболова Т.А. Исследование методов определения порогового напряжения металл-оксид-полупроводник транзисторов разной геометрии / Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов, А.В. Боряков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Вып.4 (263), 2021 г., с. 31-38.

- патенты:

10. Патент RU 2739861 С1 Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке / Т.А. Шоболова, А.С. Мокеев, патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», заявка 16.03.2020, опубликовано 29.12.2020.

11. Патент RU 2758413 С1 Способ изготовления транзистора с зависимым контактом к подложке / Шоболова Т.А. и др., патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», заявка 08.02.2021, опубликовано 28.10.2021.

12. Патент RU 2767597 С1 Латеральный биполярный транзистор на структурах «кремний на изоляторе» и способ его изготовления / Шоболова Т.А. и др, патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», заявка 21.05.2021, опубликовано 17.03.2022.

13. Патент RU 2783629 С1 Стабилитрон на структуре «кремний на изоляторе» / Шоболова Т.А. и др., патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», заявка 29.11.2021, опубликовано 15.11.2022.

ШОБОЛОВА Тамара Александровна

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ КНИ МОП- И БИПОЛЯРНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ИС С УЛУЧШЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 24.03.2025 г. Формат 60×90 1/16
Бумага писчая. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Научно-исследовательского института
измерительных систем им. Ю.Е. Седакова
603950, Нижний Новгород-137, ГСП-486