

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

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 наноэлектроники, квантовых
устройств

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор С.В. Оболенский

Нижний Новгород – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.....	18
1.1 Современные МОПТ с субмикронными проектными нормами на структурах КНИ.....	21
1.1.1 Электрофизические характеристики МОПТ	23
1.1.2 Размерные эффекты в МОПТ	26
1.1.3 Основные способы конструктивного исполнения МОПТ	28
1.2 Конструкции биполярных транзисторов на структурах КНИ	31
1.3 Стабилитрон с управляемыми параметрами	35
1.4 Выводы к главе 1	39
2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИС	40
2.1 Исследованные структуры и образцы элементов ИС	40
2.2 Экспериментальные установки для исследования ЭФП элементов ИС .	42
2.3 Программное обеспечение для моделирования конструкции и расчета характеристик элементов ИС	48
2.4 Выводы к главе 2	62
3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗАБОТКА КНИ-МОПТ С ДВУХСЛОЙНЫМ ПОЛИКРЕМНИЕВЫМ ЗАТВОРОМ	63
3.1 Преимущества МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором	64
3.2 Широкий МОПТ с зависимым контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором	69
3.2.1 Физико-топологическая модель широких МОПТ и область их применения.....	69
3.2.2 Характеристики широкого МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором.....	73
3.3 МОПТ с независимым контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором	76
3.3.1 Особенности технологии изготовления МОПТ с независимым контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором.....	79
3.3.2 Характеристики МОПТ с зависимым контактом к карману и с двухслойным поликремниевым затвором	81
3.4 Выводы к главе 3	85

4	БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С БОКОВЫМ КОНТАКТОМ К БАЗЕ И ПОВЫШЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИАНТА УСИЛЕНИЯ ТОКА	86
4.1	Физико-топологическая модель биполярных транзисторов с боковым контактом к базе	86
4.2	Особенности технологического маршрута изготовления БТ.....	90
4.3	Калибровка гамма-воздействия	96
4.3.1	Результаты численного моделирования.....	96
4.3.2	Верификация приборных моделей по экспериментально полученным характеристикам КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм.....	102
4.4	Исследование влияния гамма-воздействия на токи утечки «исток-сток» КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм.....	104
4.5	Ток утечки через подзатворный диэлектрик в КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм	107
4.5.1	Экспериментально полученные результаты без учета гамма-воздействия	107
4.5.2	Результаты, полученные посредством численного моделирования без учета гамма-воздействия.....	110
4.5.3	Влияние гамма-воздействия на характеристики КНИ МОПТ	113
4.6	Характеристики биполярного транзистора.....	116
4.7	Выводы к Главе 4	126
5	СТАБИЛИТРОН С УПРАВЛЯЮЩИМ КОНТАКТОМ НА СТРУКТУРЕ КНИ	127
5.1	Физико-топологическая модель стабилитрона с управляющим контактом	127
5.2	Характеристики стабилитрона с управляющим контактом	131
5.3	Технология изготовления стабилитрона с управляемым рабочим напряжением	135
5.4	Выводы к главе 5	137
	Заключение.....	138
	Список работ по теме диссертации.....	141
	Список справок об исполнении изобретений по теме диссертации.....	143
	Список литературы.....	144
	Приложение 1	157
	Приложение 2.....	158

Список основных обозначений и сокращений

- STI – Shallow Trench Isolation («щелевая» изоляция или изоляция мелкой канавкой);
- БиКМОП – технология, в которой биполярные и комплементарные металл-оксид-полупроводник транзисторы создаются в едином технологическом процессе;
- БТ – биполярный транзистор;
- ВАХ – вольтамперная характеристика;
- ВВФ – внешние воздействующие факторы;
- ИС – интегральная схема;
- КМОП – комплементарный металл-оксид-полупроводник (транзистор);
- КНИ – кремний на изоляторе;
- МДП – металл-диэлектрик-полупроводник;
- МОП – металл-оксид-полупроводник;
- МЭ – микроэлектроника;
- НИИИС – Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»;
- РИК – рентгеновский испытательный комплекс;
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
- РЭМ – растровый электронный микроскоп;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- ТЗЧ – тяжелые заряженные частицы;
- ТЭ – тестовые элементы;
- ХМП – химико-механическое полирование;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
- ЭКБ – электронная компонентная база;
- ЭФП – электрофизические параметры;

ЭФХ	– электрофизические характеристики;
Sprocess	– Sentaurus process (система расчета конструкции элемента);
SDE	– Sentaurus structure editor (система построения конструкции элемента);
μ_p	– подвижность дырок;
E_i	– динамическая диэлектрическая проницаемость изолятора;
C_i	– удельная емкость окисла;
E_V, E_C	– уровень валентной зоны и зоны проводимости;
E_g	– ширина запрещенной зоны;
I_C	– ток коллектора;
I_E	– ток эмиттера;
Q_S	– полная поверхностная плотность заряда в полупроводнике;
T_n, T_p	– температура носителей заряда;
c_i	– емкость слоя диэлектрика;
$j_{n,surf}$	– плотность поверхностного тока;
j_n, j_p	– плотность электронного и донорного тока;
m	– эффективная масса;
m_n, m_p	– масса электронов и дырок;
μ_n	– подвижность электронов (для n-канального транзистора);
φ_B	– высота барьера;
ψ_B	– поверхностный потенциал;
d_1 и d_2	– расстояние между обкладками конденсатора;
E	– электрическое поле;
I_d	– ток стока транзистора;
I_g	– ток затвора транзистора;
I_s	– ток истока транзистора;
J	– плотность тока;
k	– постоянная Больцмана;
k_τ	– коэффициент радиационного изменения времени жизни.

L	– длина канала;
Q	– элементарный заряд;
S	– крутизна;
S_1 и S_2	– площади обкладок конденсаторов;
t	– время задержки переключения;
U_d	– напряжение на стоке транзистора;
U_g	– напряжение на затворе транзистора;
U_s	– напряжение на истоке транзистора;
$U_{пр}$	– пробивное напряжение подзатворного диэлектрика транзистора;
Z	– ширина канала;
τ_0	– исходное время жизни носителей заряда;
τ_ϕ	– время жизни носителей заряда после облучения кристалла;
A	– постоянная Ричардсона;
C	– паразитная емкость «затвор-карман»;
T	– температура;
\hbar	– постоянная Планка;
Φ	– интегральный поток облучения;
n, p	– концентрация электронов и дырок.

ВВЕДЕНИЕ

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 радиационностойкая 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, О-типа, имеющих большие размеры, и, как следствие, накладывающих ограничение по степени быстродействия из-за высоких паразитных емкостей затвора [16-26]. 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) [10-11]. Разработанные базовые элементы могут использоваться для проектирования и изготовления быстродействующих и многофункциональных цифровых, аналоговых и радиочастотных радиационностойких 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 [2, 6-7].

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) радиационностойких транзисторов, отличающихся технологически и конструктивно [27-31]. Данная проблема также исследована и решена в представленной работе за счет разработки и научного обоснования специальной конструкции биполярного транзистора и применения новых технологических решений [12].

При этом большой проблемой также является необходимость создания радиационностойких высокоточковых 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 [32-36]. 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 радиационностойкого стабилитрона 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 радиационностойкого 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 радиационностойкого 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 ÷ 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 радиационнстойкого 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 [1-9], 4 патентах [10-13], 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 «Нанофизика и наноэлектроника», 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») [14-15].

1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Интегральная схема – это набор соединенных между собой приборных композиций, являющимися, по сути, базовыми элементами, как правило, формируемый на полупроводниковой пластине в едином производственном технологическом процессе [37-41]. Маршрут изготовления ИС представляет собой последовательность выполняемых в определенном порядке технологических операций, учитывающий все особенности изготовления отдельных базовых элементов и в целом ИС с необходимыми характеристиками. Характеристики ИС определяются областью ее применения (специальное, гражданское) и функциональным назначением.

В интегральной схеме выделяют активные и пассивные элементы [42]. Активные элементы – элементы, способные усиливать или преобразовывать электрические сигналы. К пассивным элементам относятся резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и другие. Такие элементы предназначены для перераспределения электрической энергии [38, 43].

По областям применения общепринятым является разделение интегральных схем на гражданские, космические и военные ИС [44-47]. Данная классификация основана, в первую очередь, на различных требованиях к надежности и радиационной стойкости. Интегральные схемы военного применения характеризуются самым широким диапазоном рабочих температур (не менее, чем от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$) и повышенной (вплоть до экстремальной) радиационной стойкостью, включая стойкость к поражающим факторам ядерного взрыва (электромагнитное излучение, гамма/альфа/нейтронное воздействие) [48]. У ИС космического применения важна стабильность параметров при квазистационарном наборе дозы гамма-излучения и стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц.

Как показывает практика, наиболее проблематично обеспечение стойкости ИС к дозовому воздействию гамма-излучения [49-55]. По этому критерию принята следующая условная градация ИС:

– ИС гражданского применения – требования по дозовой стойкости не предъявляются. Интегральные схемы, изготовленные по стандартному технологическому КМОП-маршруту без применения специальных схемотехнических и системных решений, как правило, могут быть устойчивыми к дозе гамма-излучения до уровня 10^3 у.е.;

– ИС космического применения – предъявляются требования по стойкости к дозе гамма-излучения не менее $5 \cdot 10^4$ у.е.;

– ИС военного применения – предъявляются требования по стойкости к дозе гамма-излучения не менее 10^5 у.е.

Радиационностойкие ИС, как правило, изготавливают на основе структур КНИ, поскольку их применение обеспечивает отсутствие тиристорного эффекта (эффекта «защелки») [56] и повышенную стойкость к импульсному воздействию ионизирующего излучения [57].

В свою очередь, структуры КНИ отличаются толщиной рабочего (верхнего) слоя кремния. Так, для изготовления приборных композиций с вертикальной структурой (например, вертикальных силовых и высоковольтных транзисторов с двойной диффузией – ДМОП) используются структуры КНИ с толстым (единицы и десятки микрометров) приборным слоем кремния. Для изготовления низковольтных (до 10 В) цифровых и цифро-аналоговых интегральных схем, как правило, используют пластины КНИ с тонким приборным слоем (менее 1 мкм) [57, 58].

В данной работе в качестве исходных пластин для изготовления элементов ИС использовались структуры КНИ с приборным слоем толщиной 0,2 мкм.

Существуют технологии изготовления ИС, в которых изначально используются пластины КНИ с тонким верхним кремниевым слоем, на которые для изготовления вертикальных элементов проводится осаждение

эпитаксиального слоя кремния. Для реализации данной технологии необходимо наличие установки эпитаксии слоев кремния (легированных и нелегированных).

Применение щелевой изоляции (или изоляции мелкой канавкой – Shallow Trench Isolation – STI) для изготовления ИС на основе структур КНИ позволяет изолировать элементы друг от друга слоем диэлектрика, что полностью исключает возможность возникновения тиристорного эффекта, а также значительно снижает токи межэлементных утечек внутри ИС, эффективно снижая ток потребления и повышая надежность ИС в целом.

Такая изоляция формируется посредством следующих операций:

- окисление структуры КНИ;
- осаждение слоя нитрида кремния;
- формирование канавок в приборном слое кремния путем травления слоев нитрида кремния/оксида кремния/ кремния до толстого захороненного оксида структуры КНИ по маске;
- осаждение оксида кремния необходимой толщины;
- химико-механическое полирование (ХМП) осажденного оксида кремния до слоя нитрида кремния;
- удаление нитрида кремния.

Слой нитрида кремния является «стоп-слоем» для операции полирования вследствие меньшей скорости полирования по сравнению с оксидом кремния. При полировании оксида кремния необходимо обеспечить «вполирование» в слой нитрида кремния на определенную глубину, что связано с неравномерностью процессов осаждения и полирования слоев по поверхности пластины. Неравномерность скорости полирования слоев также связана с рельефом поверхности, образованном при формировании топологии нижележащих слоев.

Большое внимание исследователи уделяют технологическим приемам улучшения тех или иных параметров изготавливаемых интегральных схем. Так, например, авторами [59] описан способ изготовления КМОП КНИ интегральные

схемы, где посредством увеличения дозы примеси легирования областей истока и стока повышается устойчивость ИС к воздействию высоких температур.

В данной работе рассмотрены оригинальные конструкции МОПТ, биполярного транзистора и стабилитрона.

Значительный интерес у разработчиков технологии и проектировщиков интегральных схем вызывает исследование возможности изготовления универсальных элементов ИС с параметризованной и охарактеризованной конструкцией, не зависящей от типа разрабатываемой интегральной схемы, с технологией изготовления, совместимой с классической кремниевой КМОП-технологией [60-62].

Далее рассмотрим основные активные и пассивные элементы ИС.

1.1 Современные МОПТ с субмикронными проектными нормами на структурах КНИ

МОПТ – это полевой транзистор, где затвор отделен от активной области слоем подзатворного оксида кремния. МОП-структура является частным случаем структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). На рис. 1.1 приведено схематическое изображение МОП-структуры и ее энергетическая диаграмма, где E_F – уровень Ферми, E_C – уровень дна зоны проводимости, E_V – потолок валентной зоны, E_i – уровень Ферми собственного полупроводника [63].

В данной работе в МОПТ в качестве затвора используют сильнолегированный поликремниевый слой (с концентрацией примеси $N > 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Исследованный субмикронный МОПТ состоял из следующих частей: поликремниевый затвор, подзатворный диэлектрик (собственный оксид кремния), низколегированный карман, сильнолегированные области стока и истока, слаболегированные области LDD (Lightly Doped Drain), спейсеры (используются в «самосовмещенной» технологии для формирования областей LDD, истока и стока) и т.д.

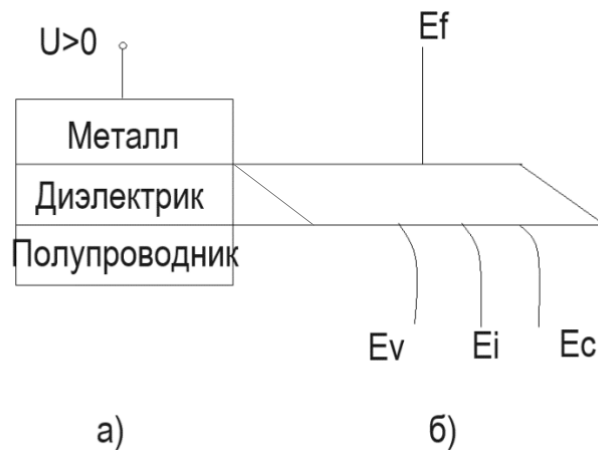


Рис. 1.1 – Схематическое изображение а) структуры и б) энергетической диаграммы для полупроводника р-типа (при напряжении на затворе $V > 0$)

Сильнолегированные области истока и стока формировались для уменьшения сопротивления контактов к данным областям транзистора. Слаболегированные области стока и истока обеспечивали увеличение значения напряжения пробоя между истоком и стоком транзистора. На рис. 1.2 приведено схематическое изображение МОПТ.

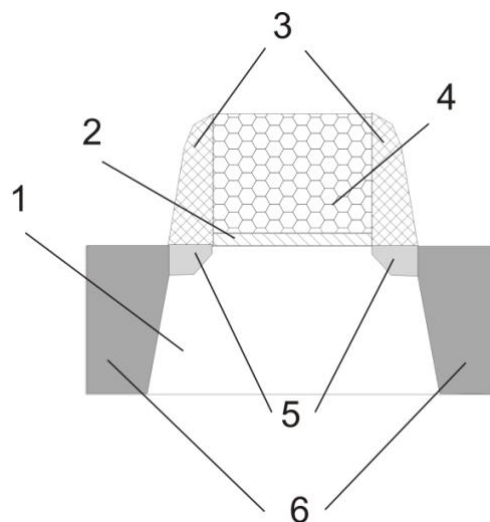


Рис. 1.2 – Схематическое изображение традиционной конструкции МОПТ: 1 – область кармана; 2 – подзатворный диэлектрик; 3 – спейсеры; 4 – поликремниевый затвор; 5 – слаболегированные области истока и стока (LDD); 6 – сильнолегированные области истока и стока

В зависимости от типа канала, образующегося между истоком и стоком транзистора при приложении на затвор соответствующего напряжения, выделяют n-канальные и p-канальные транзисторы. Также выделяют транзисторы с индуцированным и встроенным каналом. В ходе данной работы исследовались МОПТ с индуцированным каналом.

В табл. 1.1 приведена взаимосвязь типа транзистора с индуцированным каналом с характеристиками его областей.

Табл. 1.1 – Характеристики областей транзисторов разных типов

Тип транзистора	Тип проводимости истока и стока	Тип проводимости канала	Тип проводимости затвора
n-канальный	n-тип	p-тип	n-тип
p-канальный	p-тип	n-тип	p-тип

Рассмотрим основные характеристики МОПТ.

1.1.1 Электрофизические характеристики МОПТ

Рассмотрим электрофизические характеристики МОПТ с индуцированным каналом на примере n-канального транзистора. Принцип работы n-канального МОПТ с индуцированным каналом подробно описан авторами в [64]. Введем несколько понятий, используемых в работе ниже. Током утечки «исток – сток» транзистора ($I_{ут}$) будем называть ток, текущей между контактами истока и стока при нулевом напряжении на затворе.

Зависимость тока стока (I_d) от напряжения на затворе (U_g), полученная при напряжении на истоке $U_s=0$ и напряжении на стоке $U_d = 0,05$ В называется входной вольтамперной характеристикой. Пороговым напряжением называют значение U_g , полученное посредством аппроксимации линейного участка входной характеристики на соответствующую ось [65].

Для р-МОПТ описанный принцип работы тоже справедлив с учетом типа проводимости его областей. Ниже приведены формулы расчета характеристик МОПТ:

Пороговое напряжение [65]:

$$V_{th} = \frac{Q_s}{C_i} + 2\psi_B, \quad (1.1)$$

где Q_s – полная поверхностная плотность заряда в полупроводнике; C_i – емкость слоя диэлектрика; ψ_B – поверхностный потенциал.

Ток утечки «исток-сток»:

$$I_d \approx \frac{Z}{L} \mu_n C_i V_d V_{th}, \quad (1.2)$$

где Z – ширина канала; L – длина канала; μ_n – подвижность электронов (для n-канального транзистора); C_i – удельная емкость окисла; V_d – напряжение на стоке.

Ток утечки через подзатворный диэлектрик (I_g) – ток, текущей на затворе при нулевых напряжениях на контактах истока и стока и напряжении питания на затворе.

Ток утечки через подзатворный диэлектрик:

$$I_g = I_{Ш} + I_{П-Ф} + I_{П}, \quad (1.3)$$

где $I_{Ш}$ – ток утечки, механизмом переноса которого является эмиссия Шоттки; $I_{П-Ф}$ – ток утечки, механизмом переноса которого является эмиссия Пула-Френкеля; $I_{П}$ – ток утечки, механизмом переноса которого является туннелирование носителей заряда через подзатворный диэлектрик.

Таким образом, основные физические процессы, определяющие проводимость подзатворных диэлектриков, представлены следующими механизмами:

– эмиссия Шоттки [63];

$$J = A \cdot T^2 \exp \left[\frac{-q \left(\varphi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_i}} \right)}{kT} \right]; \quad (1.4)$$

– эмиссия Пула-Френкеля [65]:

$$J \sim \mathcal{E} \cdot \exp \left[\frac{-q \left(\varphi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_i}} \right)}{kT} \right]; \quad (1.5)$$

– туннельная или полевая эмиссия [66]:

$$J E^2 \exp \left[\frac{-4\sqrt{2m} (q\phi_B)^{3/2}}{3q\hbar E} \right], \quad (1.6)$$

где J – плотность тока; ϕ_B – высота барьера; E – электрическое поле; E_i – динамическая диэлектрическая проницаемость изолятора; m – эффективная масса; A – постоянная Ричардсона; T – температура; q – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; \hbar – постоянная Планка.

Вклад той или иной составляющей в ток утечки через подзатворный диэлектрик связан не только с типом подзатворного диэлектрика, но и с его геометрическими характеристиками, качеством, состоянием границы раздела с приборным слоем Si/SiO₂ и поликристаллическим затвором Si*/SiO₂, где Si* – поликристаллический кремний.

Уменьшение тока утечки через подзатворный диэлектрик является важной задачей для разработчиков технологии изготовления интегральных схем. Эта задача выходит на первый план по мере уменьшения толщины подзатворного диэлектрика и возникает в связи с необходимостью миниатюризации МОПТ при снижении проектных норм изготавливаемых ИС [67-69]. При малых толщинах подзатворного диэлектрика (менее 8 нм) токи утечки, обусловленные теми или иными механизмами формирования, значительно снижают надежность МОПТ, ограничивая и сужая области применения ИС [70-72]. Задача уменьшения тока утечки через подзатворный диэлектрик, согласно литературным данным, решается различными технологическими приемами (применением различных технологий выращивания пленок SiO₂, дополнительным легированием, введением подслоев и т.п.) [73], также ведутся исследования по использованию альтернативных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью (актуально при снижении проектной нормы до 45 нм и менее) [74].

В статье [75] авторы предлагают термополевой метод увеличения надежности подзатворного диэлектрика МОПТ, заключающийся в температурном воздействии при 200 °С в течение 5 минут и последующем

приложении напряжения на затвор транзистора величиной 9,5 В при заземленных истоке и стоке. Такое воздействие приводит к формированию напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике равное 2 МВ/см, что способствует к уменьшению заряда на границе раздела кремний/диэлектрик с уменьшением толщины оксида за счет перестройки его структуры и уплотнения.

1.1.2 Размерные эффекты в МОПТ

Одной из основных решаемых задач производства ИС является увеличение интеграции элементов на кристалле [76]. Увеличение числа элементов ИС на одном кристалле является одним из следствий уменьшения проектных норм, что диктуется необходимостью увеличения быстродействия схемы, ее функциональности, уменьшения энергопотребления и снижения себестоимости производства [77]. Уменьшенное быстродействие переключения МОПТ приводит к увеличенному времени задержки вентиляей. Это не позволяет реализовать высокочастотные схемы приема-передачи, усилители и др. Для увеличения времени задержки вентиляей необходимо уменьшить паразитную емкость МОПТ посредством изменения конструкции затвора.

Следствием уменьшения проектных норм транзисторов является возникновение короткоканальных и узкоканальных (так называемых размерных) эффектов, приводящих к изменению их основных характеристик. Короткоканальные эффекты в транзисторах начинают проявляться при длине затвора порядка сотен нм и менее [78]. В [66] описаны два основных вида проявлений качественно новых закономерностей переноса носителей в канале (при длине канала не более 0,18 мкм). В первом случае увеличение напряженности электрического поля приводит к ретроградному распределению плотности носителей в канале из-за квантования энергии носителей, что равноценно увеличению эффективной толщины подзатворного оксида. Вторая особенность транзисторов с малой длиной канала связана с возникновением «перегрева» носителей заряда, то есть, превышения скорости носителей ее

равновесного значения, соответствующего напряженности поля в данной точке [66]. Увеличенная напряженность электрического поля в области подзатворного диэлектрика транзистора приводит к уменьшению напряжения пробоя «исток-затвор» МОПТ. Это не позволяет реализовать ИС с увеличенной надежностью, в том числе повысить радиационную стойкость. Для уменьшения напряженности электрического поля в области подзатворного диэлектрика необходимо сформировать затвор специальной формы. Для этого проводился комплекс операций: формирование подзатворного диэлектрика, поликремниевого затвора и проведение операций окисления затвора, позволяющих сформировать специальную форму основания затвора.

У ИС для специальных применений возникновение описанных эффектов при увеличении интеграции элементов отрицательно сказывается на таких характеристиках, как надежность и радиационная стойкость. Избыточная площадь элемента приводит к невозможности увеличения степени интеграции ИС. Это не позволяет реализовать высокоинтеллектуальную схему памяти. Для уменьшения площади элемента ИС необходимо уменьшить площадь их составных областей, для этого реализовать комплекс операций фотолитографии, обеспечивающий минимальный размер этой области. В условиях сильного электрического поля (напряженность поля более 10^6 В/см) скорость носителей заряда перестает меняться при достижении определенного значения напряженности поля (зависимость выходит на насыщение), а в совокупности с уменьшением длины канала до 100 нм возникает эффект «всплеска скорости» носителей заряда [79]. Все это приводит к смещению в область более низких напряжений части кривой выходной ВАХ МОПТ, связанной с насыщением, что отрицательно сказывается на надежностных характеристиках ИС.

В ИС с проектными нормами 100 нм и менее ощутимое влияние оказывает разогрев носителей заряда [80, 81], приводящего к возникновению лавинного пробоя МОПТ. Одним из способов повышения значения напряжения лавинного пробоя при уменьшении длины канала транзистора является

изменение концентрации примеси в области кармана и слаболегированных областей стока и истока.

С уменьшением проектных норм необходимо более детально учитывать особенности процессов изготовления транзистора, приводящих к изменению каких-либо характеристик составных слоев элементов. Вариации параметров этих слоев вносят значимый вклад в характеристики всего элемента [78]. Увеличение интеграции элементов в ИС – задача, актуальная до сих пор.

1.1.3 Основные способы конструктивного исполнения МОПТ

В зависимости от геометрии поликремниевого затвора транзисторы делятся на два основных типа: полосковые и кольцевые. Данные типы конструктивного исполнения МОПТ используются в ИС различного применения (гражданского и специального). Полосковые транзисторы – транзисторы, в которых затвор представляет собой полосу [82]. Кольцевые транзисторы – транзисторы, у которых сток окружен поликремниевым затвором [83].

Также транзисторы делятся по конструктивно-топологической реализации контакта к карману: с независимым и с зависимым (или совмещенным с истоком) контактом к карману. Конструктивное совмещение контакта к карману и истоком обеспечивается технологически путем формирования в истоке сильнолегированной области и одновременного силицидирования этих областей. Такие транзисторы характеризуются минимальной занимаемой площадью.

Для транзисторов с независимым контактом к карману характерно расположение контакта вне областей истока и стока, зачастую отделенного от них слоем поликремния (сверху). На рис. 1.3 приведены изображения полосковых транзисторов так называемых Т- и Н-типов [84].

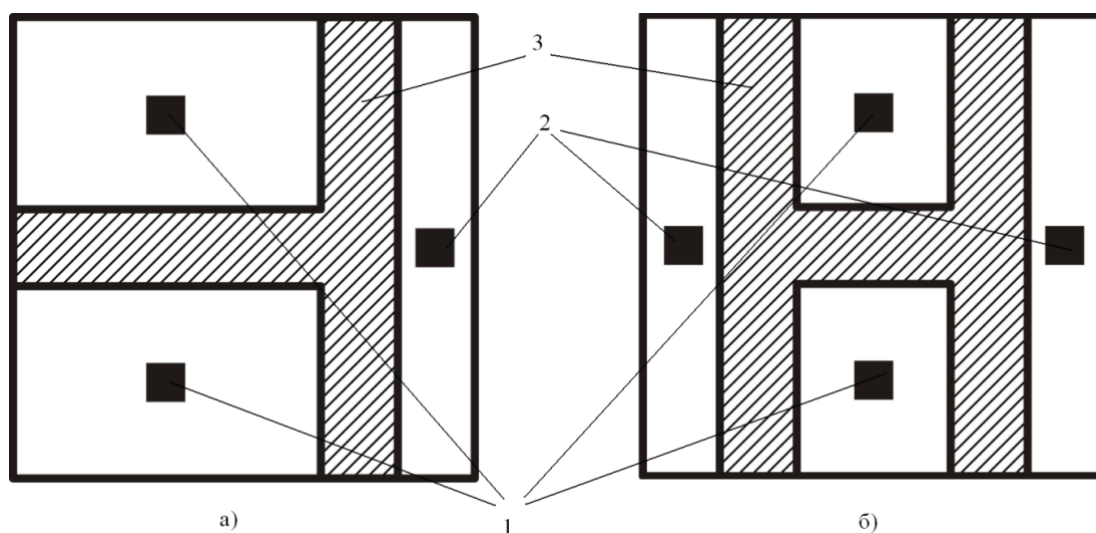


Рис. 1.3 – Изображение МОПТ: а) Т-типа; б) Н-типа: 1 – контакты к области истока или стока; 2 – контакты к карману; 3 – слой поликремния

На рис. 1.3 слой поликремния, находящийся между областями истока и стока, является затвором транзистора. Наличие поликремниевого слоя, отделяющего область контакта к карману от истока и стока транзистора, приводит к возникновению паразитной емкости транзистора: «затвор/карман» [85]. Таким образом, паразитная емкость «затвор/карман» транзистора Н-типа в полтора и более раз превышает паразитную емкость транзистора Т-типа.

Следует отметить, что транзисторы с независимым контактом к карману обладают большими размерами, чем транзисторы с зависимым контактом к карману [86]. Избыточная площадь элемента приводит к невозможности увеличения степени интеграции ИС. Это не позволяет реализовать высокоинтеллектуальную схему памяти. Для уменьшения площади элемента ИС необходимо уменьшить площадь их составных областей, для этого реализовать комплекс операций фотолитографии, обеспечивающий минимальный размер этой области

Кольцевые транзисторы обладают следующими преимуществами над полосковыми: меньшей паразитной емкостью по сравнению с транзисторами Т-типа и Н-типа, что приводит к увеличению быстродействия; большей радиационной стойкостью вследствие отсутствия боковых токов утечек, являющейся результатом геометрии кольцевого затвора. Основной недостаток

кольцевых транзисторов – невозможность создания узких транзисторов. Кольцевые транзисторы и транзисторы N-типа занимают одинаковую площадь на кристалле, значительно превосходящую занимаемой другими полосковыми транзисторами. Уменьшенное быстродействие переключения МОПТ приводит к увеличенному времени задержки вентилях. Это не позволяет реализовать высокочастотные схемы приема-передачи, усилители. Для увеличения времени задержки вентилях необходимо уменьшить паразитную емкость МОПТ посредством изменения конструкции затвора.

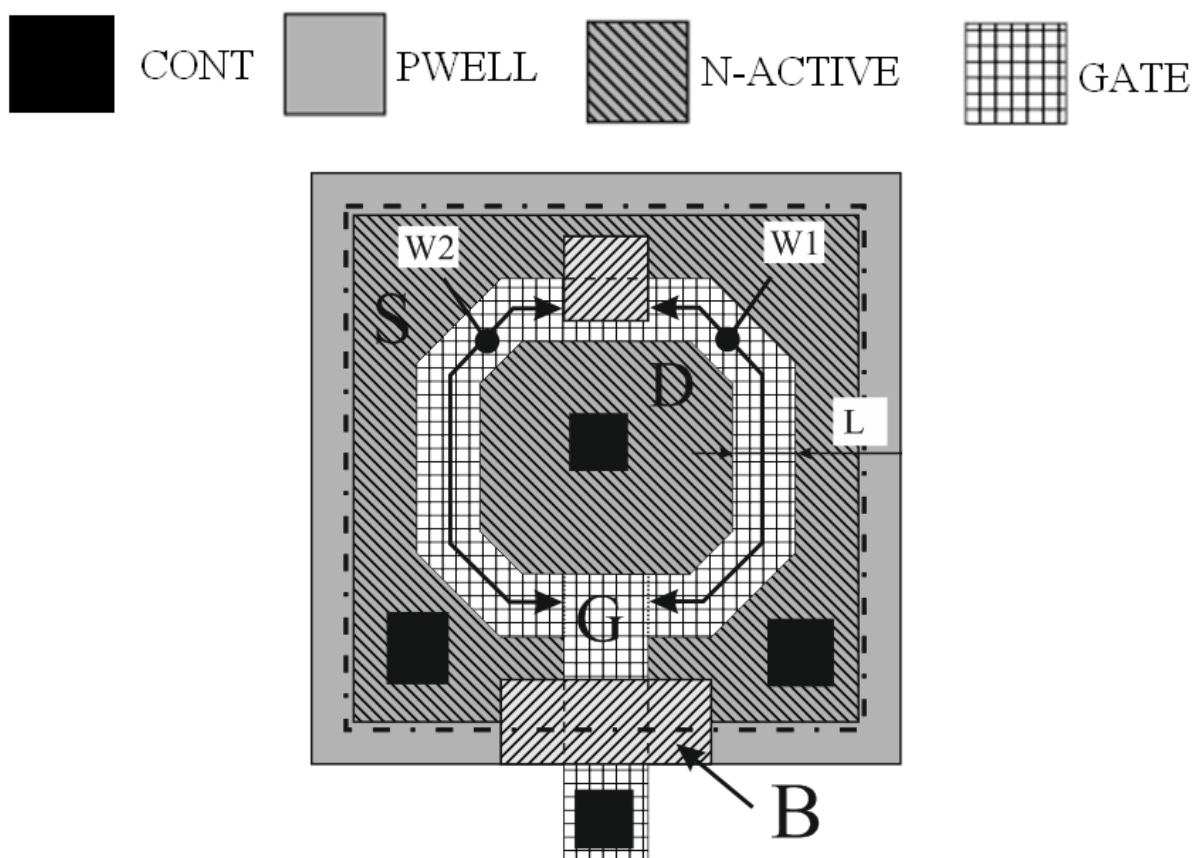


Рис. 1.4 – Схематическое изображение топологии кольцевого транзистора О-типа традиционной конструкции, где G – затвор; S – исток; D – сток транзистора; $W1 + W2 = W$ – ширина канала; L – длина канала, B – контакт к карману транзистора

В [86] описаны различные варианты топологической реализации МОПТ на структурах КНИ. Значимым недостатком данных МОПТ является наличие

описанных выше паразитных емкостей «затвор/карман», приводящих к уменьшению их быстродействия.

Также увеличенная напряженность электрического поля в области подзатворного диэлектрика транзистора приводит к уменьшению напряжения пробоя «исток-затвор» МОПТ. Это не позволяет реализовать ИС с увеличенной надежностью, в том числе повысить радиационную стойкость. Поэтому задача разработки полосковых транзисторов, обладающих большей радиационной стойкостью, меньшей паразитной емкостью и меньшей занимаемой площадью на кристалле – является актуальной и требует решения.

1.2 Конструкции биполярных транзисторов на структурах КНИ

Биполярные транзисторы (БТ), обладая высокой помехоустойчивостью, низким уровнем шумов и большим коэффициентом усиления, широко применяются в качестве активных элементов интегральных схем усилителей, генераторов и других аналоговых устройств с высокими электрическими характеристиками [63,87].

Вертикальные БТ возможно изготовить на структурах КНИ посредством ионной имплантации бора, фосфора и мышьяка в приборный слой структуры, если толщина рабочего слоя превышает 3 мкм. Таким образом, на структурах КНИ с приборным слоем толщиной порядка 0,2 мкм, применяемым для изготовления КМОП интегральных схем, вертикальные БТ изготовить нельзя. Рассмотрим некоторые варианты исполнений биполярного транзистора.

Так автор патента [88] предлагаю сформировать биполярный транзистор на структуре КНИ, где соединительный слой транзистора формируется посредством эпитаксиального осаждения. Установка эпитаксии слоев кремния является очень дорогостоящим оборудованием и имеется в наличии не у каждой производственной линии. Это является значительным недостатком такого метода изготовления БТ на структуре КНИ. Также в патенте не приведены ВАХ БТ.

Авторы статьи [89] предлагают способ изготовления БТ на структуре КНИ, где толщина приборного слоя кремния составляет более 1 мкм. Предложенная технология не реализуема на КНИ подложках с кремниевым приборным слоем толщиной 0,2 мкм и менее. Это является ограничивающим фактором для применения в интегральных схемах, подвергающихся нейтронному воздействию.

Авторы [90] предлагают латеральные биполярные транзисторы на полупроводниковых структурах с диэлектрической изоляцией.

Активные области транзисторов содержат многослойные структуры с использованием различных полупроводниковых материалов: кремния, германия, SiGe, SiC и др. В пленке полупроводника на скрытом слое диэлектрика формируют области эмиттера, активной базы и коллектора. Пассивная база и области контактов к базе, на основе поликристаллических и металлизированных слоев, расположены сверху над активной базой. Размеры активных областей транзисторов, составляющие десятки нм, а также высокая подвижность носителей заряда в многослойных полупроводниковых структурах, обуславливают рабочий диапазон частот приборов уровня сотен ГГц.

К сожалению, в материалах [90] не рассматриваются вопросы радиационной стойкости заявленных приборов при воздействии ионизирующего излучения. Интересное конструктивное решение создания биполярного транзистора предложено в патенте [91] (рис. 1.5).

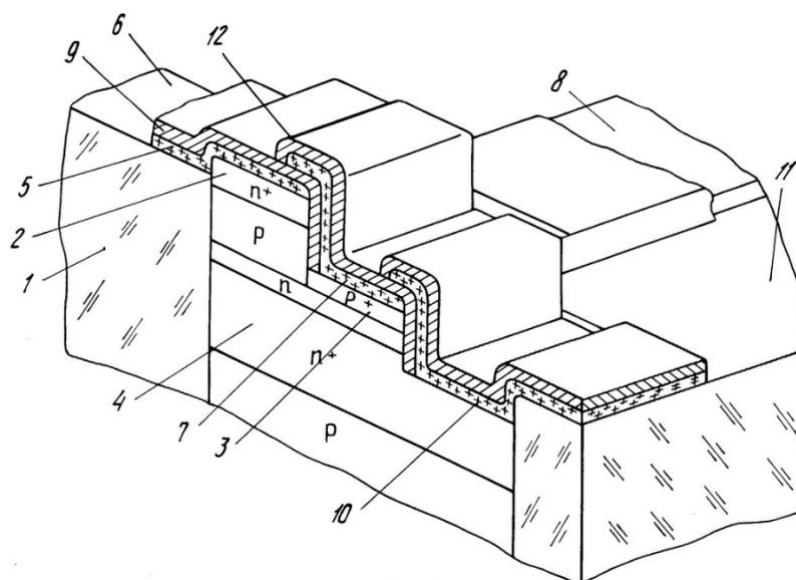


Рис. 1.5 – Конструкция биполярного транзистора с меза-структурами [91]: 1 – диэлектрический материал; 2 – область эмиттера; 3 – область базы; 4 – область коллектора; 5 – проводник; 6 – верхняя ступенька изолирующего материала; 7 – проводник; 8 – ступенька среднего уровня; 9 – диэлектрический слой; 10 – проводник; 11 – ступенька нижнего уровня; 12 – диэлектрический слой

Биполярный транзистор, содержащий области эмиттера, базы и коллектора, сформирован на пластине кремния с использованием изолированных диэлектриком полупроводниковых меза-структур. Ступенчатая структура транзистора выполнена так, что горизонтальные поверхности ступенек расположены на поверхности меза-структуры в областях базы и коллектора. Диэлектрик, изолирующий меза-структуру, выполнен также в виде ступенек, горизонтальные поверхности которых расположены на трех уровнях, соответствующих по высоте месту расположения областей эмиттера, базы и коллектора. Проводники к указанным областям электрически соединены с соответствующими областями на горизонтальных поверхностях ступенек меза-структуры и размещены на соответствующей горизонтальной поверхности ступенек диэлектрика.

Техническим результатом данного изобретения является уменьшение площади транзистора при одновременном повышении быстродействия и пробивных напряжений р-п переходов. При этом транзистор такой конструкции обладает низкой стойкостью к воздействию ионизирующего излучения из-за возможности образования паразитных каналов утечек по подложке кремния и в структуре транзистора. Накопление положительных зарядов в слоях изолирующих окислов с ростом дозы излучения, обуславливает появление инверсных слоев n-типа проводимости и образование каналов, соединяющих области коллектора с эмиттером, а также соседние скрытые слои n⁺-типа. Увеличение скорости поверхностной рекомбинации вдоль границы раздела с боковой диэлектрической изоляцией приводит также к росту обратных токов р-п переходов.

Авторами [92] предложена конструкция латерального биполярного транзистора на структуре «кремний на изоляторе». Данный транзистор рассчитан на радио- и сверхвысокий диапазон рабочих частот. Область базы транзистора, толщиной менее 100 нм, создается по технологии с использованием спейсеров в качестве масок при имплантации примесей. По самосовмещенной технологии, сформированы области высоколегированного эмиттера и коллектора, а также области селективно имплантированного малыми дозами коллектора. Пассивная база создается диффузией из насыщенной бором пленки поликристаллического кремния по всей области активной базы сверху. Kontakтами к базе служат слои поликристаллического кремния и металла.

Отмечается, что предложенная конструкция и малые размеры активных областей, определяют характеристики транзистора, не уступающие по диапазону рабочих частот и коэффициенту передачи тока базы вертикальным биполярным транзисторам на структурах SiGe. К конструктивным недостаткам предложенного варианта – такие транзисторы не позволяют достичь высоких уровней радиационной стойкости, вследствие расположения области пассивной базы сверху над всей областью активной базы. Большая площадь контакта активной и пассивной базы обуславливает рост базового тока и соответственно

снижение коэффициента усиления транзистора при воздействии ионизирующего излучения. Кроме того, поликремниевый контакт к базе требует дополнительной планаризации рельефа поверхности кристалла для достижения плотной упаковки структуры ИС.

Одним из отрицательных эффектов является увеличенная инжекция носителей заряда из базы в эмиттер, так как приводит к уменьшению коэффициента усиления по току в БТ. Это не позволяет реализовать ИС с увеличенными усилительными характеристиками, в том числе повысить радиационную стойкость. Для уменьшения инжекции носителей заряда из базы в эмиттер необходимо уменьшить напряженность электрического поля в базе БТ, для этого разработать базовый электрод специальной конструкции, позволяющий снизить напряженность электрического поля за счет оптимального распределения погонного сопротивления электрода.

Результатом воздействия нейтронами на элемент интегральных схем является формирование дефектов и их кластером в кремниевом слое [93]. Таким образом, разработка конструкции биполярного транзистора на КНИ с приборным слоем толщиной 0,2 мкм является актуальной задачей для микроэлектроники.

1.3 Стабилитрон с управляемыми параметрами

Стабилитрон – элемент ИС, применяемый для стабилизации напряжения. Стабилитрон представляет собой диод, который работает при обратном смещении, его рабочим напряжением является напряжение пробоя обратной ветви р-п перехода [94].

Автор книги [95] приводит основные характеристики стабилитронов. В патенте [32] описан способ изготовления стабилитрона с регулировкой рабочего тока. Такой стабилитрон с регулировкой рабочего тока содержит соединенные последовательно между собой источник питания, сопротивление нагрузки, ограничительное сопротивление в цепи нагрузки, снабжен триодным

стабилитроном, включенным параллельно сопротивлению нагрузки и ограничительным сопротивлением, включенным между базой и коллектором триодного стабилитрона. Недостатком такого стабилитрона с регулировкой рабочего тока является большая занимаемая площадь на кристалле.

Авторы патента [33] предложили конструкцию источника опорного напряжения. Технический результат патента заключается в создании управляемого аналога стабилитрона – двухполюсника с изменяемым электронным способом уровнем напряжения стабилизации. Управляемый источник опорного напряжения содержит выходной транзистор, эмиттер которого соединен с первым выходным узлом управляемого источника опорного напряжения и токостабилизирующим двухполюсником, подключенным к шине источника питания, а коллектор связан со вторым выходным узлом управляемого источника опорного напряжения, вспомогательный повторитель напряжения, выход которого подключен к первому выводу вспомогательного резистора. База выходного транзистора соединена со вторым выводом вспомогательного резистора и дополнительным управляющим источником опорного тока, а вход вспомогательного повторителя напряжения связан с коллектором выходного транзистора.

Недостатком этого изобретения является большая занимаемая площадь на кристалле, так как управляемый стабилитрон представляет собой совокупность несколько элементов ИС.

Невозможность управлять рабочим напряжением стабилитрона приводит к отсутствию компенсации радиационного воздействия посредством сдвига рабочего напряжения. Это не позволяет реализовать ИС с широкой областью применения. Для обеспечения управляемости рабочим напряжением стабилитрона необходимо создать возможность изменения концентрации носителей заряда в средней области стабилитрона, что можно осуществить за счет формирования специального управляющего (дополнительного) электрода стабилитрона.

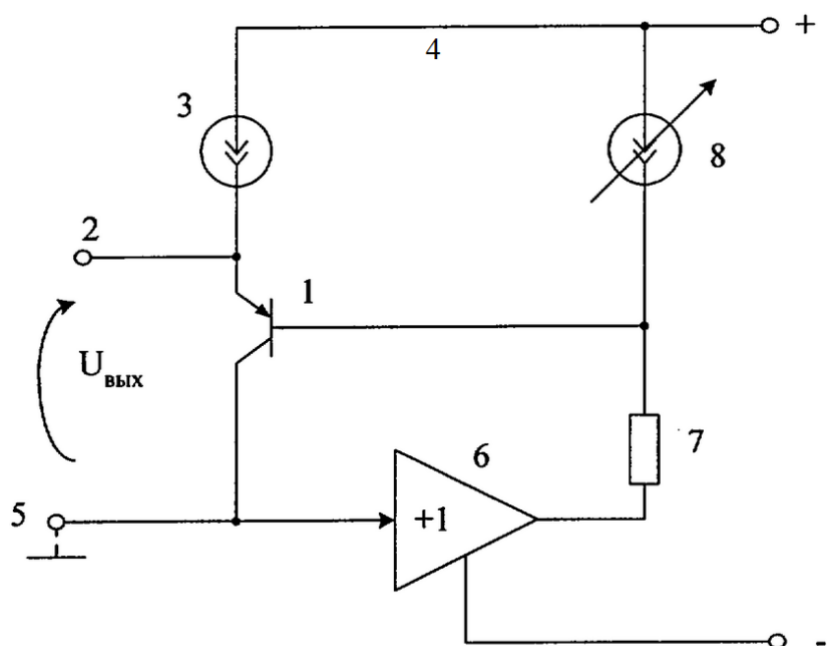


Рис. 1.6 – Схематическое изображение управляемого источника опорного напряжения: 1 – выходной транзистор; 2 – первый выходной узел управляемого источника опорного напряжения; 3 – токостабилизирующий двухполюсник; 4 – шина источника питания; 5 – второй выходной узел управляемого источника опорного напряжения; 6 – вспомогательный повторитель напряжения; 7 – вспомогательный резистор; 8 – дополнительный управляющий источник опорного тока

Авторы патента [34] предложили стабилизирующий выпрямитель на кремниевых управляемых диодах.

Стабилизирующий выпрямитель с управляемыми диодами содержит каскад запуска тиристоров и каскад управления этим запуском, а также усилитель сигнала ошибки. Отличается тем, что с целью повышения надежности и расширения диапазона выходных напряжений, коллектор транзистора каскада управления одновременно соединен с эмиттером транзистора каскада запуска не непосредственно, а через конденсатор с катодами тиристоров и эмиттером транзистора усилителя, коллектор которого подключен к базам транзистора упомянутого каскада управления, при этом эмиттер последнего нагружен на

дополнительный выпрямитель, а коллектор транзистора усилителя и база транзистора каскада запуска на основной выпрямитель.

Недостатком предложенного стабилизирующего выпрямителя на кремниевых управляемых диодах является большая занимаемая площадь на кристалле, вследствие содержания большого количества элементов ИС.

Все приведенные источники для регулировки рабочего напряжения стабилитрона используют схемотехнический метод, то есть используют дополнительные элементы ИС. В работах [96-99] также предложены схемотехнические методы для формирования стабилизатора постоянного напряжения.

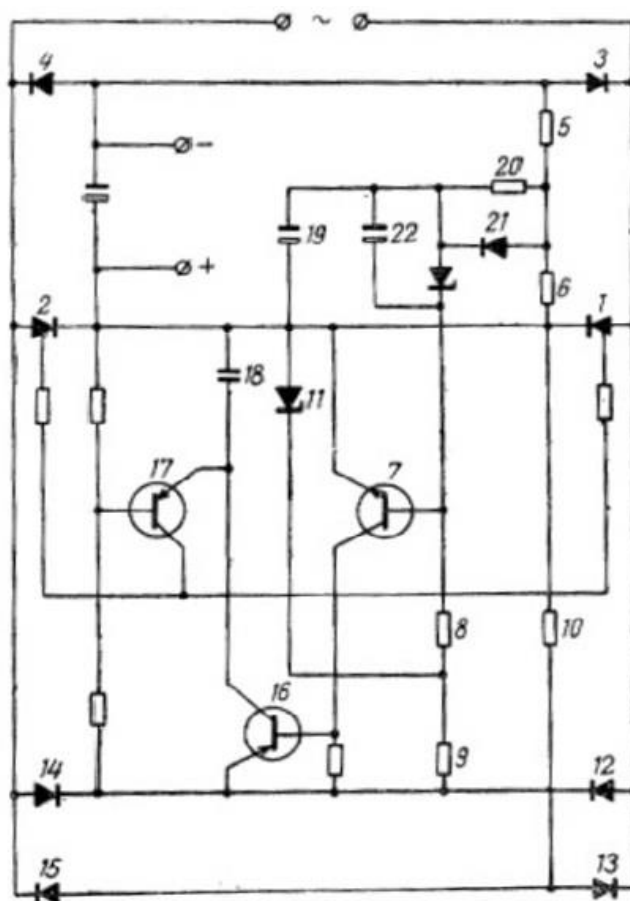


Рис. 1.7 – Схематическое изображение стабилизирующего выпрямителя на кремниевых управляемых диодах: 1, 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 21 – диоды; 5, 6, 8, 9, 10, 20 – сопротивления; 7, 16, 17 – транзисторы; 11 – стабилитрон; 18, 19, 22 – конденсаторы

Увеличения интеграции ИС зачастую происходит путем уменьшения занимаемой площади на кристалле используемых элементов. Поэтому разработка конструкции стабилизатора, позволяющей управлять его рабочим напряжением посредством приложения напряжения, является актуальной задачей. В данной работе предложена конструкция стабилизатора, рабочим напряжением которого можно управлять посредством приложенного напряжения и представляющего собой один элемент ИС.

1.4 Выводы к главе 1

Анализ существующей литературы выявил, что актуальными для исследования являются следующие направления:

- разработка конструкции МОПТ, характеризующихся меньшей занимаемой площадью на кристалле, меньшим значением паразитной емкости;
- разработка широких МОПТ, характеризующихся увеличенным значением быстродействия и используемых в качестве стандартных базовых элементов цифровой схемы (логических вентилях), а также в переходных ключах и ячейках ввода-вывода;
- разработка конструкции радиационностойкого биполярного КНИ-транзистора с высоким значением коэффициента усиления тока;
- разработка конструкции стабилизатора, характеризующегося возможностью управления рабочим напряжением посредством приложения напряжения в процессе эксплуатации.

Также все маршруты изготовления разработанных элементов новых конструкций должны интегрироваться в стандартный маршрут изготовления ИС.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИС

2.1 Исследованные структуры и образцы элементов ИС

В работе экспериментально исследовались следующие образцы МОПТ на структурах КНИ:

– изготовленные в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякова» (г. Н. Новгород) с проектной нормой 0,350 мкм (напряжение питания 3,3 В), четырьмя уровнями алюминиевой металлизации, щелевой (STI) изоляцией активных элементов. Толщина подзатворного диэлектрика составляла 6,5 нм, приборного слоя кремния – 200 нм;

– изготовленные в АО «Микрон» (г. Зеленоград) с проектной нормой 90 нм (напряжение питания 1,2 В), семью уровнями медной металлизации, щелевой (STI) изоляцией активных элементов. Толщина подзатворного диэлектрика составляла 1,8 нм, приборного слоя кремния – 70 нм.

У МОПТ производства АО «Микрон» для соединения сильнолегированных областей стока, истока и поликремниевого затвора транзистора с вольфрамовым столбиком, ведущим к металлической шине, использовался силицид титана. Контакт к карману топологически располагался на истоке транзистора и был электрически с ним соединен также посредством совместного силицидирования.

На рис. 2.1 приведен снимок поперечного скола типичной исследованной транзисторной структуры, полученный с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). В табл. 2.1 приведены геометрические параметры исследованных МОПТ n- и p- типа.

Проводилось исследование ЭФП в диапазоне температур (от -65°C до +200°C) у МОПТ с разным геометрическим соотношением W/L (W-ширина канала, L-длина канала) и разным типом проводимости (табл. 2.1). Выбранный набор типоразмеров транзисторов необходим и достаточен для характеристики конструктивно-технологических решений по результатам исследования ЭФП данных транзисторов.

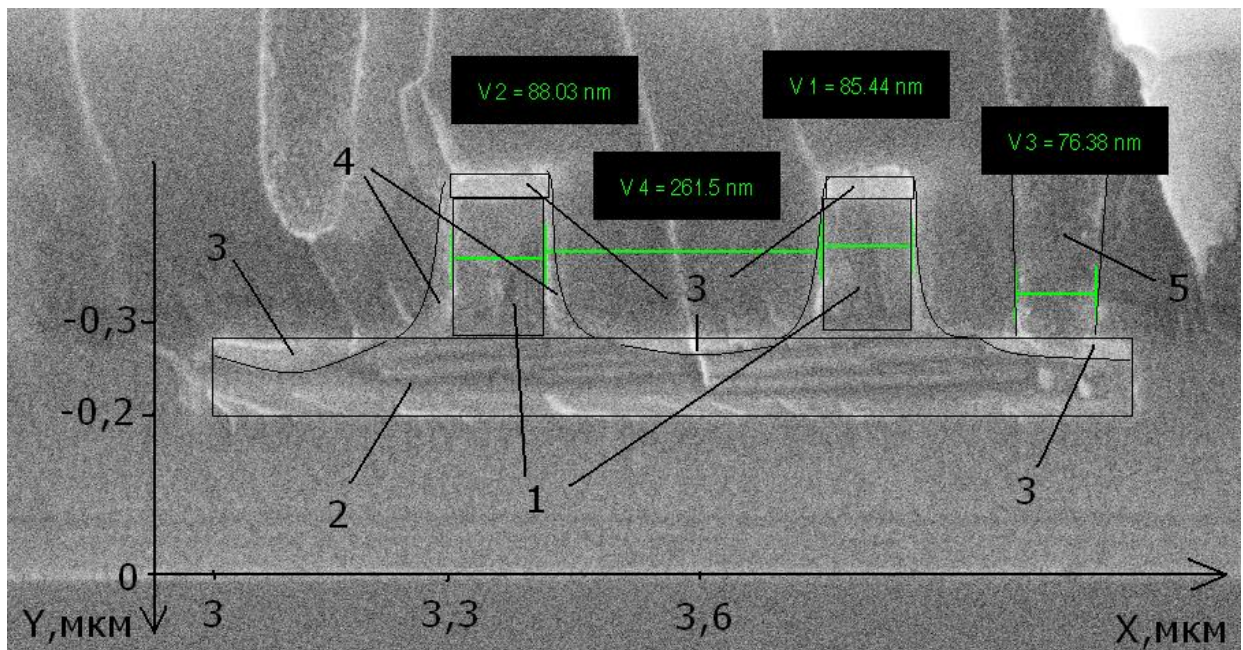


Рис. 2.1 – РЭМ-снимок поперечного скола транзисторной структуры с указанными размерами: 1 – поликремниевый затвор, 2 – кремниевый приборный слой, 3 – силицидированные контакты, 4 – спейсеры, 5 – вольфрамовый столбик (контакт к стоку транзистора)

Табл. 2.1 – Геометрические параметры исследованных МОПТ

Номер образца	Тип транзистора	W, мкм	L, мкм
1	n-канальный	0,26	0,1
2		0,26	10
3		10	0,1
4		10	10
5	p-канальный	0,26	0,24
6		0,26	10
7		10	0,1
8		10	10

Посредством численного 2D и 3D моделирования исследовались следующие приборные композиции на структурах КНИ: МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором, МОПТ с однослойным поликремниевым затвором, биполярные транзисторы, а также стабилитроны.

2.2 Экспериментальные установки для исследования ЭФП элементов ИС

Для экспериментального исследования ВАХ элементов ИС использовался измерительный комплекс на основе прецизионного анализатора параметров элементов ИС (характериографа) и зондовой станции полуавтоматического типа (рис. 2.2, 2.3).



Рис. 2.2 – Блок-схема измерительного комплекса на основе прецизионного анализатора параметров ИС и зондовой станции

Были исследованы вольтамперные характеристики одиночных транзисторов из состава параметрического монитора кристалла ИС. Соединение с контактными площадками (КП) исследуемых элементов осуществлялось посредством зондовых игл (рис. 2.4). Измерения ЭФП проводилось в соответствии с [100-101]. Влияние изменения температуры на характеристики исследуемых транзисторов, проводилось при следующих значениях

температуры: -60°C , -20°C , $+22^{\circ}\text{C}$, $+85^{\circ}\text{C}$, $+125^{\circ}\text{C}$ посредством нагрева или охлаждения столика, на котором располагался образец.

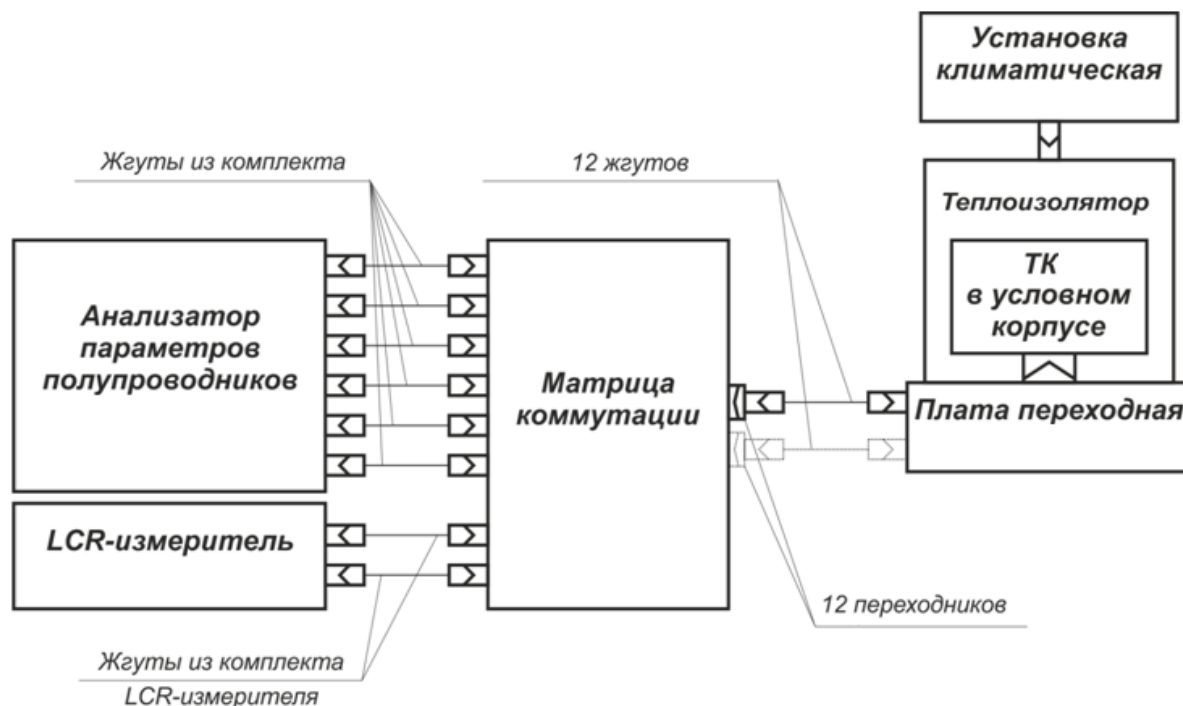


Рис. 2.3 – Функциональная схема измерительного комплекса для исследования ВАХ элементов ИС

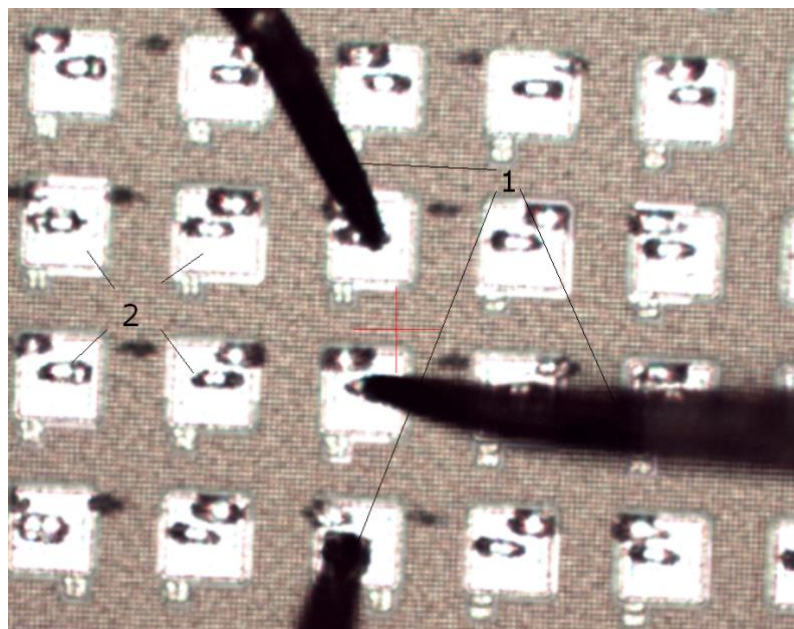


Рис. 2.4 – Расположение зондов на контактных площадках для измерения ВАХ исследуемых транзисторов: 1 – зонды; 2 – контактные площадки

Экспериментально были получены следующие характеристики: входные – зависимость тока стока от напряжения на затворе, при разных напряжениях на стоке; выходные – зависимость тока стока от напряжения на стоке при разных напряжениях на затворе. В табл. 2.2 приведены режимы измерений, использованные для получения ВАХ [102].

Табл. 2.2 – Режимы измерений ВАХ исследованных транзисторов

Зависимость	Режим измерения
Входная	$U_d = 0.05 \text{ В}, U_s = 0, U_g = (0 \dots 1.2) \text{ В}$
Выходные	$U_s = 0, U_d = (0; 1.2) \text{ В}, U_g = (0 \dots 1.2) \text{ В}$

Ток утечки через подзатворный диэлектрик (I_g) измерялся при $U_g = 1,2 \text{ В}$; $U_s = 0$; $U_d = 0,05 \text{ В}$.

Значения порогового напряжения транзисторов рассчитывались на основе экспериментально полученных входных характеристик. Выходные характеристики использовались для определения тока утечки «исток-сток». Полученные параметры использовались для разработки и калибровки численной модели транзисторов.

Так же входная характеристика использовалась для определения тока утечки через подзатворный диэлектрик толщиной 1,8 нм, представляющий собой по кристаллической структуре дефектный слой SiO_2 [103]. Значение концентрации дефектов в подзатворном оксиде кремния зависит от метода формирования этого диэлектрика. Слой окисла формировался методом высокотемпературного окисления в среде сухого кислорода при температуре 850 °С в течении 180 минут. Расчеты концентрации дефектов в подзатворном диэлектрике исследуемых структур приведены ниже.

Пороговое напряжение определялось методом аппроксимации линейного участка входной характеристики, так как данный метод является более точным в

отличие от метода фиксированного тока. Используемый метод учитывает основные эффекты (короткоканальные, узкоканальные и др.), характерные полевым транзисторам [104].

Исследование зависимостей параметров элементов от дозы гамма-облучения проводилось имитационным методом с использованием стенда на основе рентгеновского имитационного комплекса (РИК) с камерой тепла и холода (КТХ) и автоматического измерительного комплекса (АИК). Структурная схема стенда приведена на рис. 2.5.

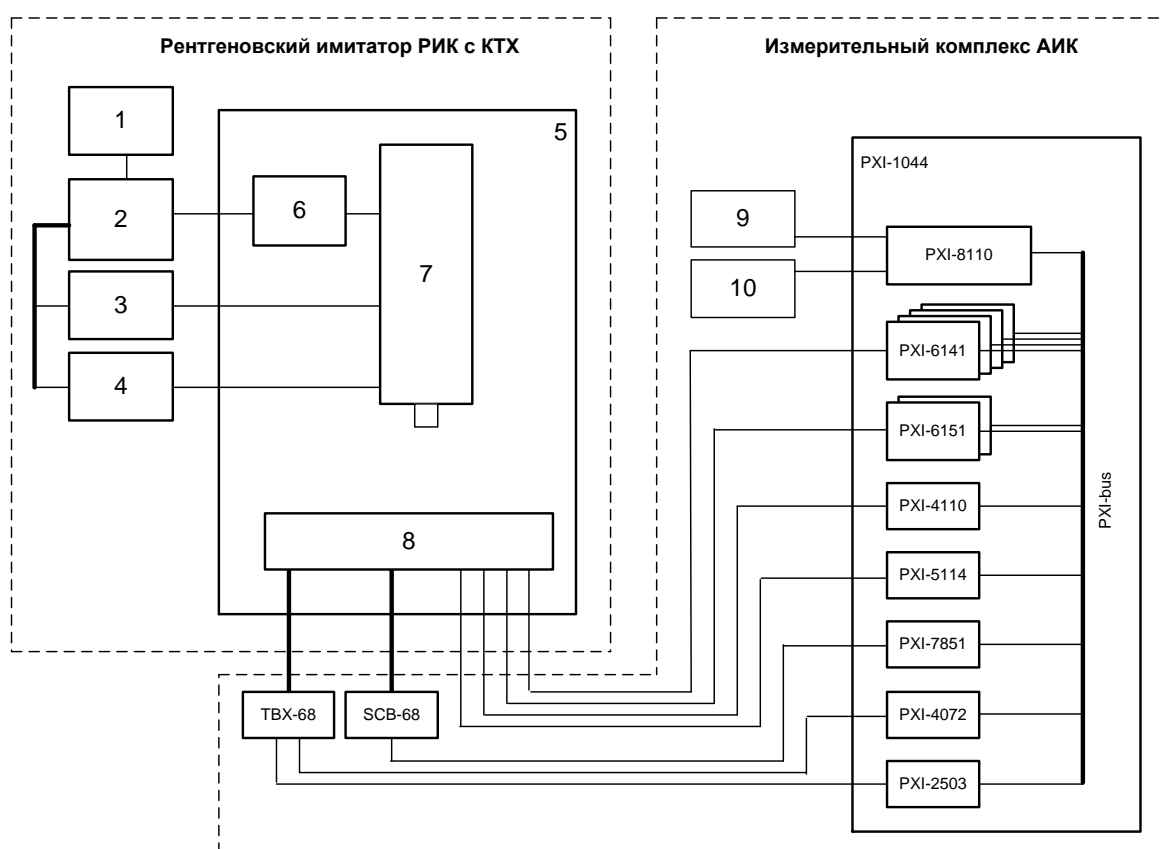


Рис. 2.5 – Структурная схема рентгеновского стенда: 1 – монитор; 2 – управляющий компьютер; 3 – блок управления рентгеновским источником; 4 – подсистема охлаждения анода рентгеновского источника; 5 – защитный бокс рентгеновского имитатора; 6 – устройство перемещения рентгеновского источника; 7 – рентгеновский источник; 8 – плата согласования исследуемого объекта; 9 – клавиатура; 10 – монитор

Задание электрического режима исследуемых образцов в процессе воздействия ИИ (рентгеновскими лучами), измерение параметров и управление рентгеновским комплексом обеспечивалось автоматизированным измерительным комплексом АИК, представляющим собой модульную PXI-систему со встроенным контроллером PXI-8110 и специализированными PXI-модулями цифрового и аналогового ввода-вывода, трехканального источника питания, осциллографа, мультиплексора, мультиметра, управляемых посредством высокопроизводительного интерфейса PXI. Назначение и характеристики модулей измерительного комплекса приведены в табл. 2.3.

Табл. 2.3 – Состав и назначение специализированных модулей комплекса АИК

Обозначение	Наименование, назначение, основные характеристики
PXI-1044	Шасси, 14-слотов, 3U, с блоком питания переменного тока
PXI-8110	Контроллер Core 2 Quad 2.2 ГГц, Win 7 (32-бит)
PXI-6551	Цифровой генератор/анализатор сигналов (50 МГц, уровни от -2,0 до 5,5 В, 20 каналов, 8 Мбит/канал)
PXI-6541	Цифровой генератор/анализатор сигналов (50 МГц, уровни 5.0, 3.3, 2,4, 1,8 В, 32 канала, 8 Мбит/канал)
PXI-7851R	Многофункциональный модуль ввода-вывода (8 AI, 8 AO, 96 DIO, 750 kS/sec)
PXI-4110	Программируемый источник постоянного тока, 3 канала
PXI-4072	Цифровой мультиметр и измеритель параметров LCR (6 1/2 разрядов, 1,8 MS/s, 100 нВ - 300В, 10нА-1А)
PXI-5114	Цифровой осциллограф, 2 канала (250 MS/s, 125 МГц, 8-бит, 64 МБ/канал)
PXI-2503	Мультиплексор, 48 каналов
TBX-68S	Терминальный блок (для подключения мультиплексора PXI-2503)
SCB-68	Терминальный блок (для подключения измерительных каналов модуля PXI-7851R)

Облучение образцов ИС проводилось при напряжении на аноде трубки рентгеновского источника 45 кВ, токе анода 160 мкА, мощности дозы рентгеновского излучения 50...120 рад[Si]/с. Дозиметрический контроль при

исследованиях проводился методами ОСТ 11 073.013 (ч. 10), РД В 319.03.22 по показаниям калиброванного детектора рентгеновского излучения ДРИ-0401.

Исследуемые тестовые кристаллы были собраны в металлокерамические корпуса: кристалл фиксировался внутри корпуса на его основание с использованием токопроводящего клея, контактные площадки тестовых элементов были соединены с выводами корпуса посредством золотых проволочных соединений, приваренных с помощью ультразвуковой сварки (рис. 2.6). Корпуса с тестовыми кристаллами помещались в измерительную оснастку, соединяемую с измерительным оборудованием посредством жгутов, и размещались в РИК.

В состав исследованных тестовых кристаллов входили транзисторы с контактом к карману, совмещенным с истоком (А-типа [105]), разного типа проводимости и с разным геометрическим соотношением W/L (табл. 2.1). Измерения проводились при четырех уровнях дозы гамма-облучения: 0 ; $0,1 \cdot D_{\max}$; $0,5 \cdot D_{\max}$; D_{\max} , где D_{\max} – максимальное значение дозы (10^6 у. ед.). Измерение электрофизических параметров транзисторов проводилось в момент набора каждого из четырех уровней доз.

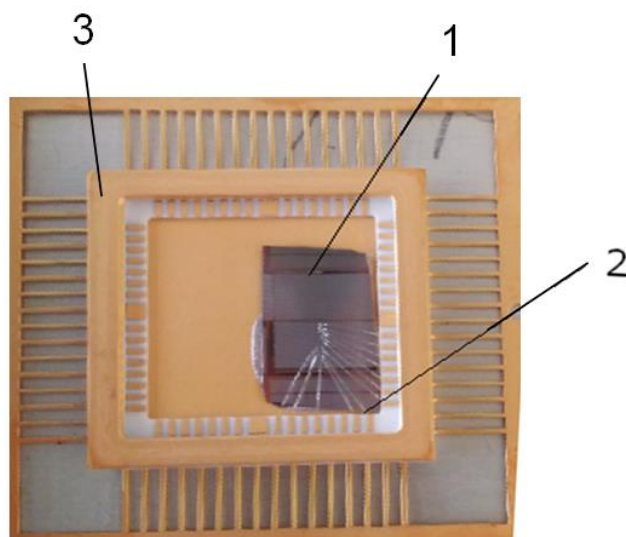


Рис. 2.6 – Пример исследуемого тестового кристалла, собранного в корпус: 1 – кристалл; 2 – золотые проволочные соединения; 3 – металлокерамический корпус

2.3 Программное обеспечение для моделирования конструкции и расчета характеристик элементов ИС

Экспериментальные методы исследования являются дорогостоящими и время затратными, в связи с чем, часто возникает необходимость применения методов физико-математического моделирования с помощью, специализированных САПР [106]. Современный уровень развития технологических систем проектирования (TCAD) позволяет проводить моделирование электрофизических параметров разрабатываемых приборных композиций с высокой степенью сходимости (до 0,98) с экспериментальными данными (при условии необходимой калибровки моделей TCAD по параметрам реальных технологических процессов, применяемых для формирования данных приборных композиций). В настоящей работе для получения ЭФП исследуемых структур широко применялись методы численного моделирования в САПР Sentaurus TCAD.

Калибровка используемых моделей для численного моделирования проводилась для образцов с проектными нормами 350 нм (под производственную линию филиала ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова») и 100 нм (под производственную линию АО «Микрон»). На первом этапе проводилась калибровка моделей окисления кремния и осаждения поликремния на основании сравнительного анализа толщин слоев, полученных расчетном путем и экспериментально (табл. 2.4).

Табл. 2.4 – Калибровка моделей окисления кремния, осаждения поликремния и т.д.

	Толщина подзатворного диэлектрика, нм	Толщина буферного окисла, нм	Толщина поликремниевого слоя, нм	Толщина SiO ₂ над поликремнием, нм
Эксперимент	6,5±0,5	15,0±1,0	260,0±20,0	8,0±1,0
Расчет	6,5	15,0	260,0	8,0

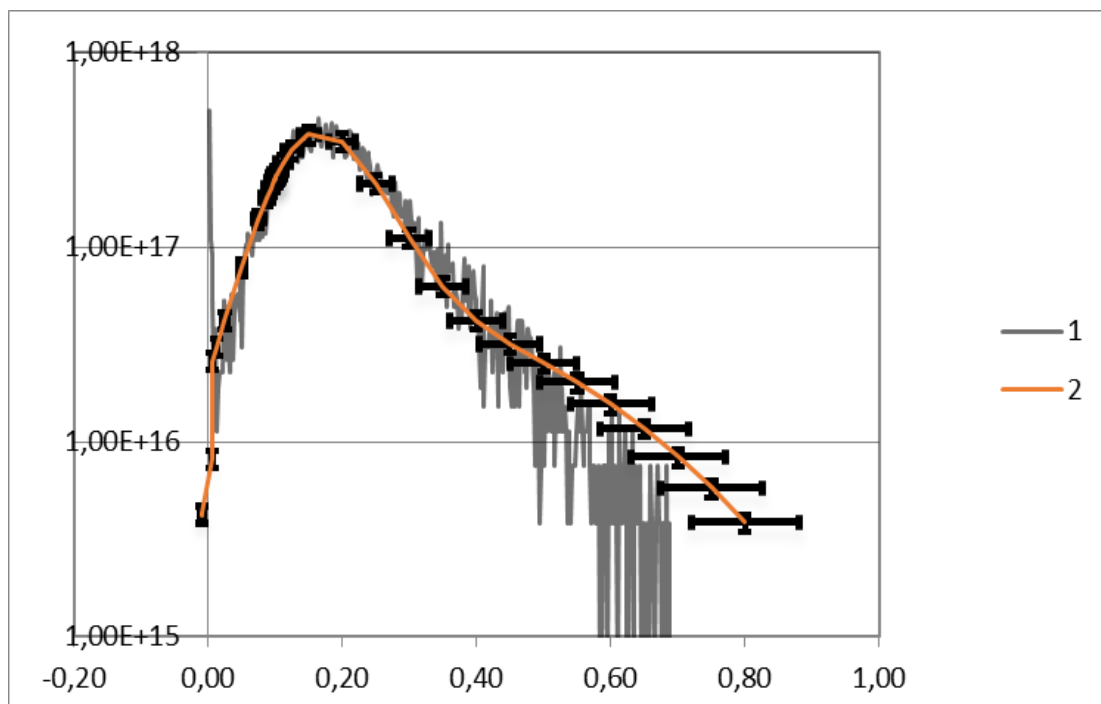


Рис. 2.7 – Экспериментальный (кривая 1) и расчетный (кривая 2) профили распределения фосфора в кремниевой пластине, имплантированного с дозой $8 \cdot 10^{12} \cdot \text{см}^{-3}$, энергией 140 кэВ и под углом 0 град (от вертикальной оси)

Далее была проведена калибровка моделей имплантации и диффузии примеси n- и p-типа в структурах КНИ по данным, экспериментально полученным методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Для иллюстрации на рис. 2.7 приведен профиль распределения фосфора в пластине объемного кремния, где на оси абсцисс координата равна 0 соответствует поверхности кремниевой пластины. На рис. 2.7 наблюдается высокая сходимость результатов полученных экспериментально и посредством численного моделирования (указанный допуск 10%), что свидетельствует о допустимости использования в TCAD выбранных моделей имплантации и диффузии.

Таким образом были изготовлены тестовые элементы для калибровки отдельных технологических процессов (окисленные пластины, пластины с осажденным слоем поликремния, пластины после имплантации примеси и отжига) и была проведена калибровка технологических моделей (цикл итераций) до получения высокой сходимости экспериментальных и расчетных результатов (не менее 95%) (моделей окисления, имплантации примеси, диффузии примеси)

Далее была проведена конструктивная калибровка:

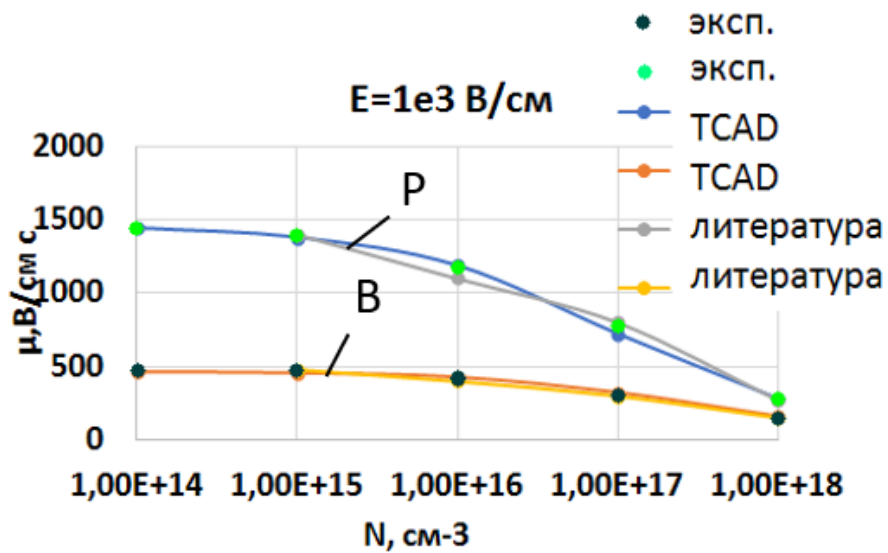
– разработаны модели транспорта электронов в транзисторах и стабилитроне оригинальных конструкций (шаг сетки технологической и конструктивной модели пропорционально уменьшался с уменьшением концентрации примеси, коррекция граничных и начальных условий);

– изготовлены специальные тестовые структуры для калибровки моделей (имеющие поликремниевый затвор специальной формы, боковой электрод к базе БТ, управляющий электрод к стабилитрону).

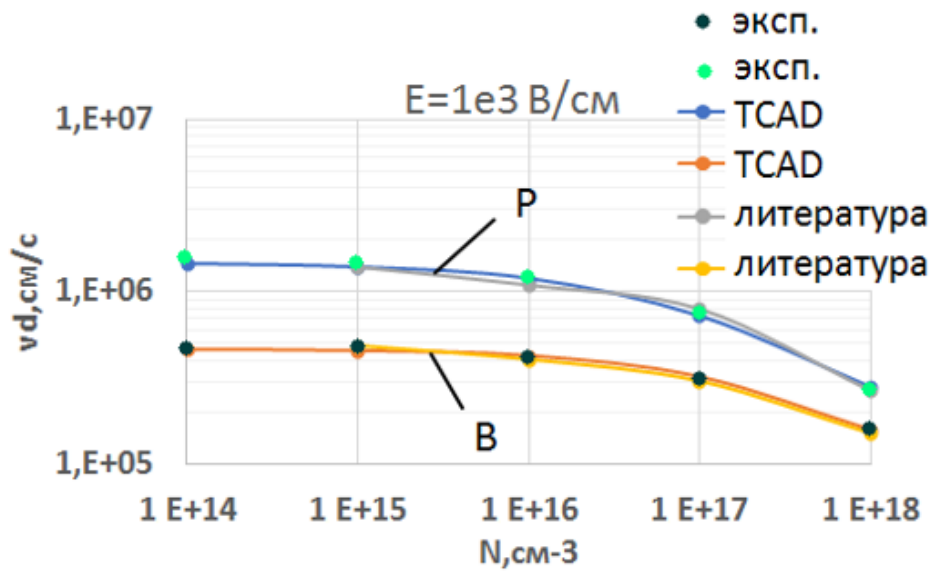
– проведено моделирование транспорта носителей заряда в электродах специальной формы (затворе МОПТ, базе БТ и управляющем электроде в стабилитроне). Калибровка проводилась по ВАХ резисторов, диодов, стабилитронов, транзисторов;

Для калибровки модели транспорта носителей заряда исследовался кремниевый образец длиной 100 мкм с площадью сечения 1 мкм². На рис. 2.8 приведены зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси в образце (рис. а) и зависимость дрейфовой скорости от концентрации примеси (рис. б). Сравнивались результаты, полученные экспериментально с рассчитанными с помощью численного моделирования, а также взятыми из литературы [63].

Таким образом, полученные результаты подтверждают допустимость использования выбранных моделей транспорта носителей заряда при численном расчете параметров структур (с малой напряженностью электрического поля в активной области). Также была проведена калибровка моделей транспорта носителей заряда в кремниевой структуре длиной 100 нм и площадью сечения 1 нм². На рис. 2.9 приведены следующие характеристики: зависимость времени релаксации электронов при разной концентрации носителей заряда (а) и зависимость времени релаксации импульса при разной концентрации примеси (б).



а)



б)

Рис. 2.8 – Зависимость а) подвижности носителей заряда и б) средней дрейфовой скорости носителей заряда от концентрации примеси в исследуемом образце

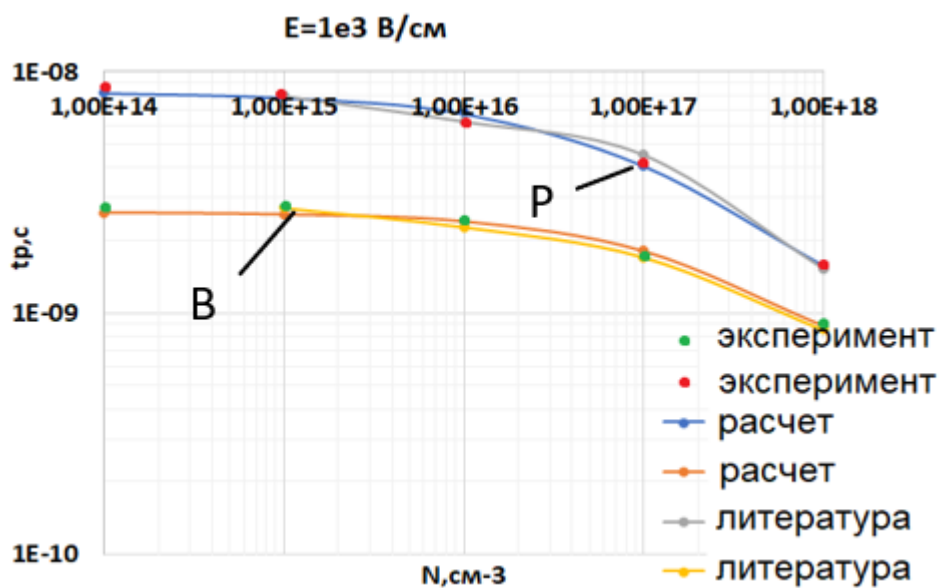
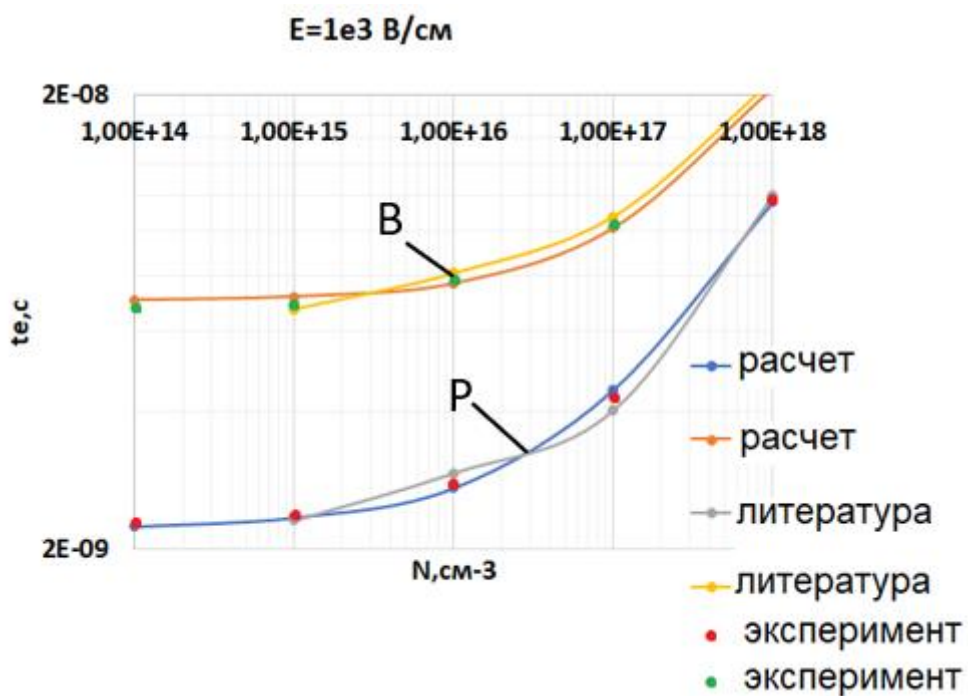


Рис. 2.9 – Зависимость времени релаксации импульса (а) и времени релаксации энергии (б) от концентрации примеси в исследуемом образце при напряженности электрического поля 10^3 В/см

Как видно из полученных результатов, наблюдается высокая сходимость рассчитанных и экспериментально полученных данных.

Далее была проведена конструктивная калибровка тестовых элементов (ТЭ) – диодов (рис. 2.10), резисторов, конденсаторов, для определения конструкций ТЭ, позволяющих проводить наиболее полную калибровку моделей и, затем, выполнялась калибровка моделей элементов (цикл итераций по тестовому изготовлению приборных композиций, измерению их электрофизических характеристик (ЭФХ), корректировке конструкции ТЭ) до получения высокой сходимости экспериментальных и расчетных результатов (не менее 95%).

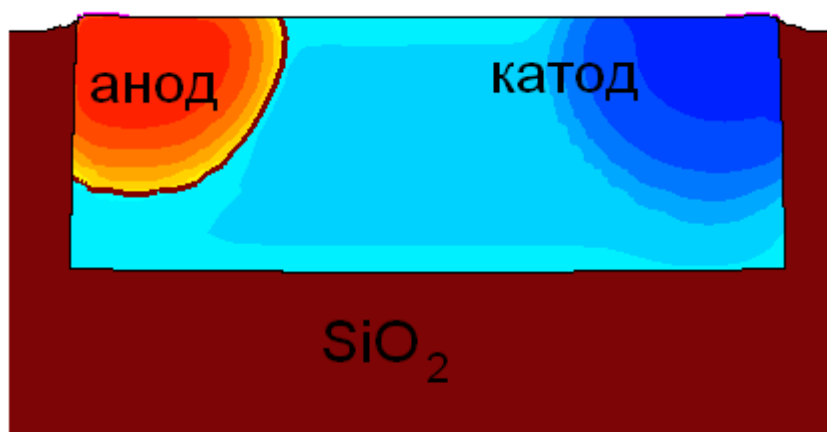
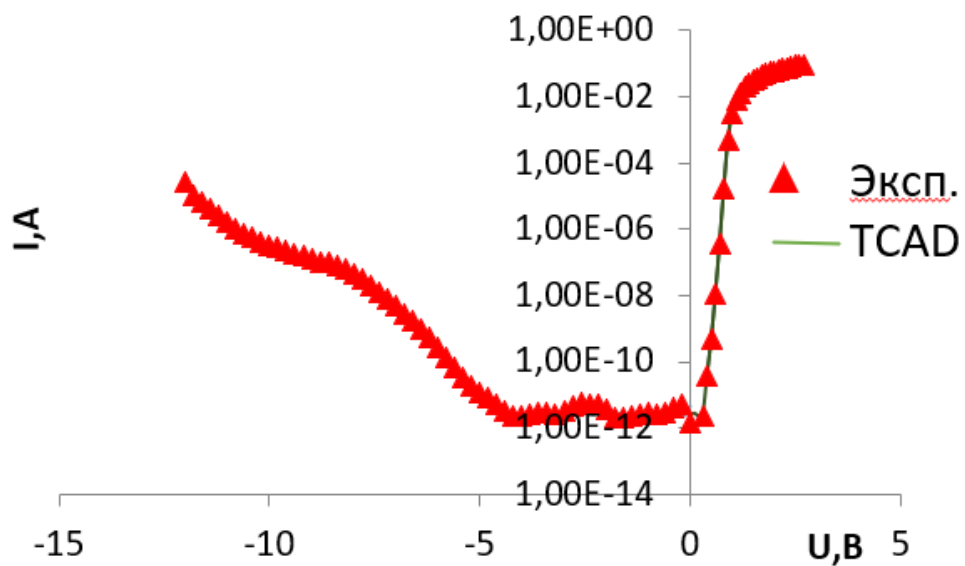


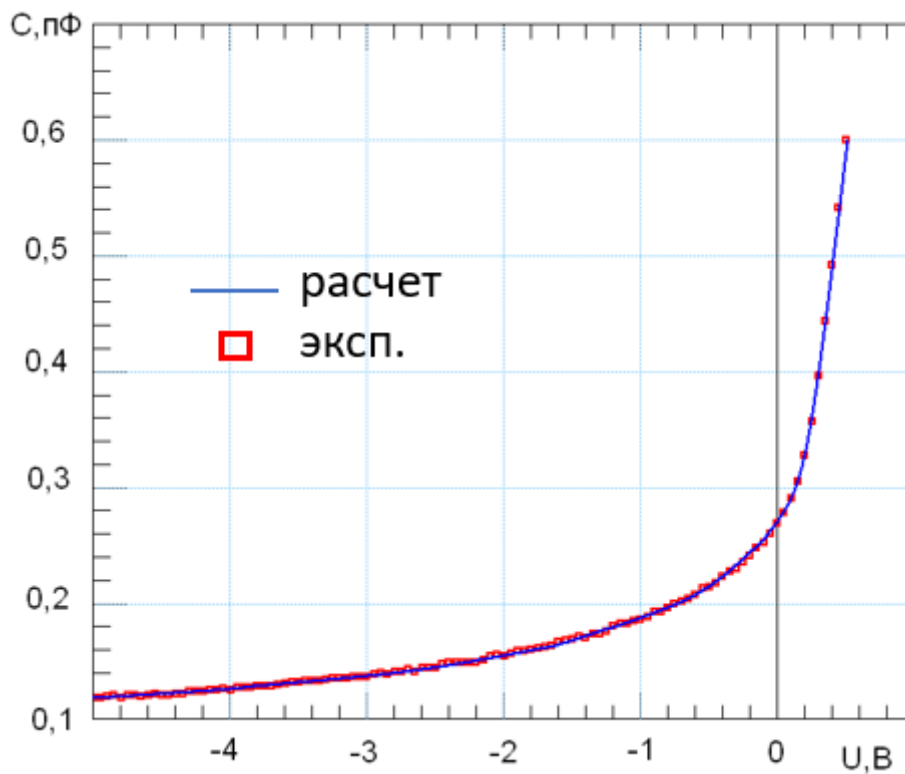
Рис. 2.10 – Изображение рассчитанной структуры диода

На рис. 2.11 приведены вольтамперная (а) и вольтфарадная характеристики рассчитанного диода, подтверждающие высокую сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

Последним этапом являлась калибровка электрофизических характеристик транзисторов. На рис. 2.12 приведены входная (а) и выходные (б) ВАХ МОПТ, рассчитанные посредством численного моделирования (сплошные линии) и экспериментально (точки).

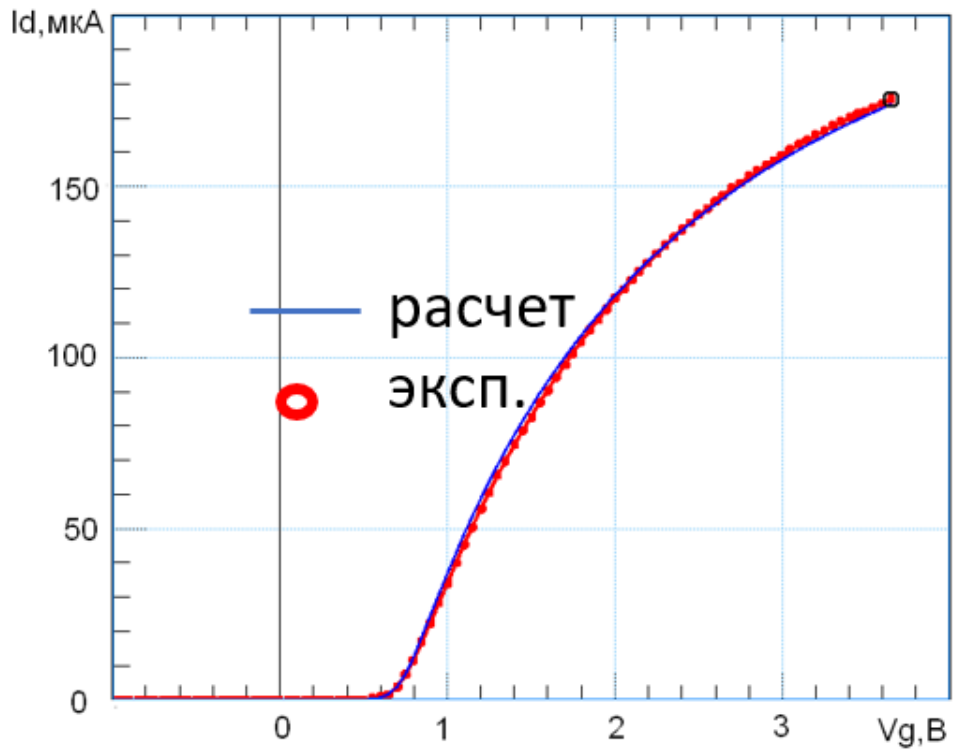


а)

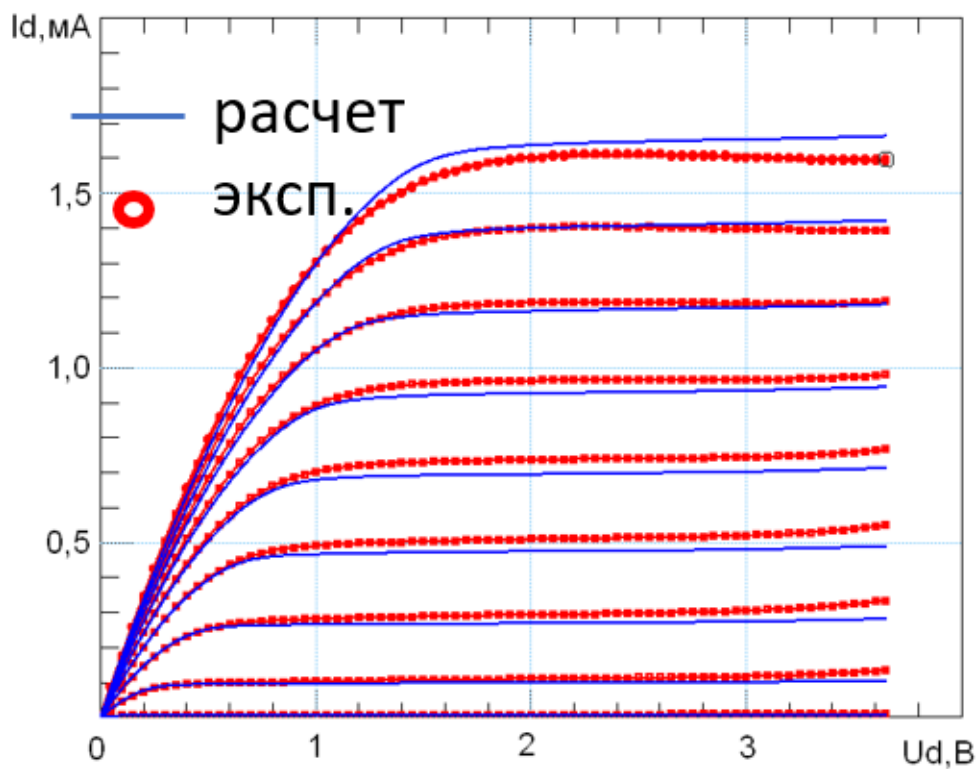


б)

Рис. 2.11 – Расчетные и экспериментальные электрофизические характеристики диода: а) вольтамперная характеристика; б) вольтфарадная характеристика



а)



б)

Рис. 2.12 – Входная (а) и выходные (б) ВАХ МОПТ, полученные экспериментально (точки) и посредством численного моделирования (сплошная линия)

По результатам калибровки были выбраны модели, совпадающие с высокой точностью с экспериментально полученными зависимостями (среднеквадратичное отклонение менее 5%). В табл. 2.5 приведены расчётные и экспериментально полученные характеристики МОПТ.

Табл. 2.5 – Характеристики МОПТ

Транзистор	Пороговое напряжение, В	Ток утечки, А	Ширина спейсеров, мкм	Частота, МГц
Расчет	0,65	10^{-12}	0,17	33
Эксперимент	0,65	10^{-12}	0,17	38

Полученные результаты калибровки позволяют интерпретировать рассчитанные результаты как ожидаемые экспериментально с вероятностью не менее 95%. Для описания движения носителей заряда в полупроводнике использовалась гидродинамическая модель. Данная модель учитывает изменение температуры носителей заряда обоих типов проводимости.

Для учета эффекта туннелирования использовались модели прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик. Необходимость 3D моделирования в некоторых случаях объясняется тем, что 2D сечение структуры является недостаточным для учета объемных эффектов. Математической основой численного моделирования является решение фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов, которая для диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей состоит из следующих уравнений:

$$\vec{j}_n = \mu_n \cdot (n \nabla E_c + k T_n \nabla n - n k T_n \nabla \ln \gamma_n + \lambda_n f_n^{td} k n \nabla T_n - 1.5 n k T_n \nabla \ln m_n); \quad (2.1)$$

$$\vec{j}_p = \mu_p \cdot (p \nabla E_c + k T_p \nabla p - p k T_p \nabla \ln \gamma_p + \lambda_p f_p^{td} k p \nabla T_p - 1.5 p k T_p \nabla \ln m_p); \quad (2.2)$$

$$j_{n,surf} = -q n s_n, \quad j_{p,surf} = -q n s_n; \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \vec{P}) = -q(p - n + N_D - N_A) - \rho_{trap}; \quad (2.4)$$

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_n(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)}; \quad (2.5)$$

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right), p = n_{i,eff} \cdot \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right); \quad (2.6)$$

$$R_{net}^A = (C_n n + C_p p) \cdot (np - n_{i,eff}^2); \quad (2.7)$$

$$R_{surt,net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\frac{(n+n_1)}{s_p} + (p+p_1)/s_n}; \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qR_{net,n} + q \frac{\partial n}{\partial t}, -\nabla \cdot \vec{J}_p = qR_{net,p} + q \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_n = \vec{J}_n \cdot \frac{\nabla E_c}{q} + \frac{\partial W_n}{\partial t}_{coll}; \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial W_p}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_p = \vec{J}_p \cdot \frac{\nabla E_v}{q} + \frac{\partial W_p}{\partial t}_{coll}, \frac{\partial W_L}{\partial t} + \Delta \cdot \vec{S}_L = \frac{\partial W_L}{\partial t}_{coll}, \quad (2.11)$$

где (2.1, 2.2) – уравнения плотности тока электронов и дырок; (2.3) – уравнение плотности поверхностного тока; (2.4) – уравнение Пуассона для распределения электростатического потенциала; (2.5) – уравнение темпа рекомбинации Шокли-Рида-Холла; (2.6) – уравнение концентрации равновесных носителей; (2.7) – уравнение темпа Оже-рекомбинации; (2.8) – уравнение скорости поверхностной рекомбинации; (2.9) – уравнение непрерывности; (2.10, 2.11) – уравнения энергетического баланса для электронов, дырок и кристаллической решетки [64], где j_n, j_p – плотность электронного и донорного тока, μ_n, μ_p – подвижность электронов и дырок, n, p – концентрация электронов и дырок, k – постоянная Больцмана, E_v, E_c – уровень валентной зоны и зоны проводимости, T_n, T_p – температура носителей заряда, m_n, m_p – масса электронов и дырок, $j_{n,surf}$ – плотность поверхностного тока

Граничные условия заключаются в следующем: используемые контакты исследуемой структуры являются омическими, электрическое поле не выходит за границы образца. Так как геометрические размеры исследуемых структур БТ и широких МОПТ достигали более 3 мкм, для графического проектирования 2D и 3D структур использовался модуль структурного моделирования Sentaurus Topography Dimensional. Формирование структуры при этом включало в себя генерацию геометрической модели по областям структуры вместе с контактами,

задание аппроксимирующих профилей легирования и определение процесса построения вычислительной конечно-элементарной сетки.

Это связано с тем, что, согласно [107], образование поверхностных состояний в основном обусловлено взаимодействием протонов и дырок с границей раздела Si/SiO₂. Поскольку у интегральных схем радиационностойкого исполнения на подложку всегда подается отрицательное смещение, препятствующее движению образующихся положительно заряженных частиц в оксиде к границе раздела «захороненный оксид/приборный слой», влиянием деградации поверхностных состояний на радиационную стойкость интегральные схемы на этой границе раздела можно пренебречь. Кроме того, в противоположность индуцированным в оксиде зарядам, которые всегда являются положительными и уменьшают пороговое напряжение обратных n-канальных транзисторов, поверхностные состояния на границе с n-канальным транзистором заряжаются отрицательно (на границе с p-канальным транзистором – положительно), увеличивая пороговое напряжение обратного транзистора, тем самым эффективно повышая дозовую стойкость интегральной схемы, поэтому влиянием поверхностных состояний на границе раздела «приборный слой/захороненный оксид» на радиационную стойкость интегральных схем можно пренебречь.

Контакты к сильнолегированным областям, сформированные с использованием слоя силицида титана, считались омическими. В ходе расчета электрофизических характеристик использовались встроенные в TCAD модели (табл. 2.6).

Выбранные модели позволяли проводить численное моделирование с высокой сходимостью (до 95%) с полученными экспериментально результатами. В табл. 2.7 приведены режимы получения ВАХ при численном моделировании исследуемых элементов. Приведенные в табл. 2.7 режимы были выбраны для характеристики исследуемых элементов. Следует заметить, что при исследовании МОПТ рассчитывался также ток утечки через подзатворный диэлектрик.

Табл. 2.6 – Перечень моделей, используемых при расчете характеристик

Характеристика	Модель
Перенос носителей заряда	Drift-Diffusion
Модель подвижности	UniBo
Время жизни	Hurkx
Насыщение скорости электронов в сильных электрических полях	eHighFieldsaturation (CarrierTempDrive)
Насыщение скорости дырок в сильных электрических полях	hHighFieldsaturation (GradQuasiFermi)
Рекомбинация	Shockley-Read-Hall
Туннелирование	Band2BandTunneling

Табл. 2.7 – Режимы получения ВАХ при численном моделировании

Элемент	Режим получения ВАХ
Транзистор с двухслойным поликремниевым затвором	$U_d = 0,05 \text{ В}; U_s = 0; U_g = (0; 3,3) \text{ В}$
Транзистор с однослойным поликремниевым затвором	$U_d = 0,05 \text{ В}; U_s = 0; U_g = (0; 1,2) \text{ В}$
Биполярный транзистор	$U_e = 0, U_b = 0,7 \text{ В}; U_c = 3,3 \text{ В}$
Стабилитрон	$U_c = 0; U_a = 1,2 \text{ В}; U_k = 0,5 \text{ В}$

Конструкция всех элементов, кроме БТ, рассчитывалась посредством пооперационной симуляции в TCAD при помощи сформированного входного файла Sprocess. В реальных структурах вследствие отличия постоянных решеток приборного слоя кремния и оксида кремния вблизи границы их раздела присутствуют механические напряжения, что приводит к дефектообразованию в оксиде кремния вблизи границы раздела с кремнием и формированию переходного слоя [108-109]. Переходной слой – это наиболее дефектная область SiO_2 , где присутствует большое количество вакансий и оборванных связей.

Гамма-облучение приводит к образованию в диэлектрике (подзатворном и захороненном оксиде кремния) положительных ионов и свободных электронов. Последние вследствие приложения электрического поля дрейфуют

в направлении контактов. Более тяжелые ионы дрейфуют медленно и захватываются существующими дефектами структуры. Это приводит к накоплению зарядов вблизи границы раздела Si/SiO₂ (в переходном слое). После прекращения гамма-воздействия положительные заряды сохраняются. Накопление заряда в захороненном диэлектрике может приводить к образованию паразитного n-канала в приборном слое кремния (p-кармане) вдоль его границы с захороненным диэлектриком (рис. 2.13).

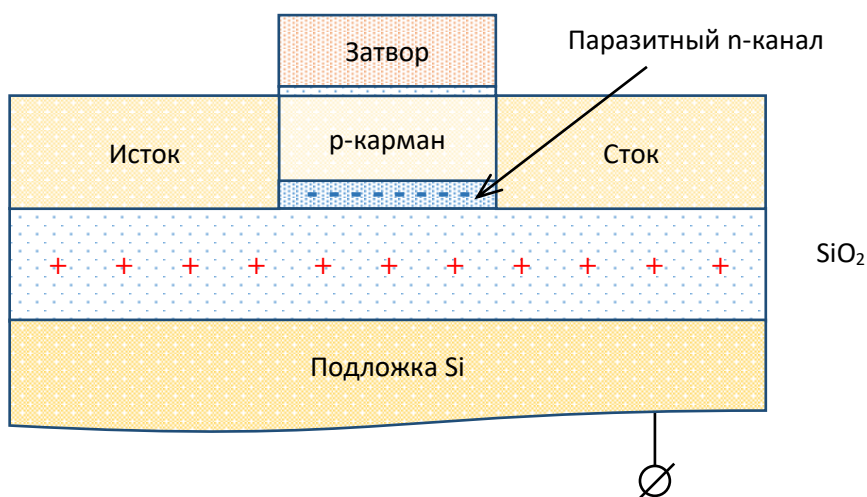


Рис. 2.13 – Формирование под влиянием ИИ встроенного положительного заряда в захороненном оксиде, индуцирующего появление инверсного паразитного n-канала утечки в p-кармане МОПТ

Пространственное распределение накопленного заряда зависит от технологии получения диэлектрика. Для оксида кремния, полученного посредством высокотемпературного термического окисления кремния в сухом кислороде, основная часть ловушек с концентрацией 10^{12}см^{-2} локализована вблизи его границ на расстоянии $50\div 70$ нм [110].

В исследуемых структурах толщина подзатворного диэлектрика составляла 6,5 нм и 1,8 нм, поэтому можно заключить, что эти слои оксида кремния представляют собой полностью переходный слой. Захороненный оксид кремния структуры КНИ имел толщину 200 нм, поэтому представлял собой

структурную комбинацию переходных слоев на границах раздела с кремнием и стехиометрического SiO₂ в объеме.

Таким образом, если сравнивать два идентичных транзистора с разной геометрией (шириной или длиной) канала, облученных за время t , то для наводимого потенциала U в конденсаторах с разной площадью обкладок, сформированных затвором и приборным слоем, будет верно соотношение:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{S_1}{S_2}, \quad (2.12)$$

где S_1 и S_2 – площади обкладок конденсаторов.

Если сравнивать наводимый потенциал такого конденсатора основного транзистора (U_1) с паразитным (U_2), в котором в качестве подзатворного диэлектрика выступает захороненный оксид структуры КНИ, а в качестве затвора – кремниевая подложка (рис. 2.13), то:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{S_1 \cdot d_2}{S_2 \cdot d_1}, \quad (2.13)$$

где d_1 и d_2 – расстояние между обкладками конденсатора.

При моделировании гамма-воздействия на характеристики исследуемых элементов считалось, что оксид кремния получен методом термического окисления в сухом кислороде и при воздействии дозой D_{\max} все ловушки полностью заряжены. Таким образом, при численном моделировании гамма-воздействие с дозой D_{\max} имитировалось введением положительных зарядов на границу раздела Si/SiO₂ с концентрацией 10^{12} см⁻² [111].

2.4 Выводы к главе 2

Вследствие дороговизны и времязатратности экспериментального исследования для разработки новой конструкции элемента ИС использовалось численное моделирование. При моделировании для описания движения носителей заряда в полупроводнике использовалась гидродинамическая модель. Данная модель учитывает изменение температуры носителей заряда обоих типов проводимости. Для учета эффекта туннелирования использовались модели прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик.

Необходимость 3D моделирования в некоторых случаях объясняется тем, что 2D сечение структуры является недостаточным для учета объемных эффектов.

Используемые при этом модели были откалиброваны по характеристикам элементов ИС, изготовленных по стандартной технологии. Например, калибровка гамма-воздействия проводилась по экспериментально полученным результатам МОП-транзисторов с длиной затвора 100 нм. Полученные результаты калибровки позволяют интерпретировать рассчитанные результаты как ожидаемые экспериментально с вероятностью 95%.

Процесс отработки новой конструкции элемента ИС заканчивался изготовлением этого элемента и получением его электрофизических параметров. Таким образом в работе были рассчитаны, изготовлены и исследованы МОП-транзисторы, биполярный транзистор и стабилитрон новой конструкции.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗБОТКА КНИ-МОПТ С ДВУХСЛОЙНЫМ ПОЛИКРЕМНИЕВЫМ ЗАТВОРОМ

В данной главе приведены результаты разработки оригинальной технологии изготовления МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором на структуре КНИ. Данный способ реализуем на производственной линии, оборудованной для производства ИС по классическому КМОП-маршруту с субмикронными проектными нормами.

В патенте [112] предложен способ изготовления транзистора с двухслойным поликремниевым затвором с повышенной надежностью. Транзистор, описанный в [112] является аналогом транзистора, разработанного в данной работе. Недостатками транзистора [112] является: невозможность использования предложенной технологии для изготовления широких транзисторов с зависимым контактом к карману и транзисторов с независимым контактом к карману, что ограничивает область его применения. У предложенного способа изготовления МОПТ повышена надежность за счет увеличения напряжения пробоя подзатворного диэлектрика, достигнутая за счет применения оригинальной конструкции транзистора.

Особенности технологии формирования двухслойного поликремниевого затвора, следующие: формирование первого и второго слоев поликремния разнесены в маршруте изготовления интегральных схем в несколько отдельных блоков операций. Первый слой поликремния используется в качестве маски для формирования «охранных колец» транзистора и способствует увеличению толщины слоя оксида кремния между вторым поликремнием и карманом транзистора, тем самым уменьшая паразитную емкость «затвор/карман».

«Охранное кольцо» транзистора представляет собой легированный слой кремния с концентрацией примеси, превышающей ее концентрацию в кармане транзистора и располагающееся по краю кремниевого островка между щелевой изоляцией и телом транзистора. Основная функция «охранного кольца» – повышение радиационной стойкости ИС за счет снижения влияния

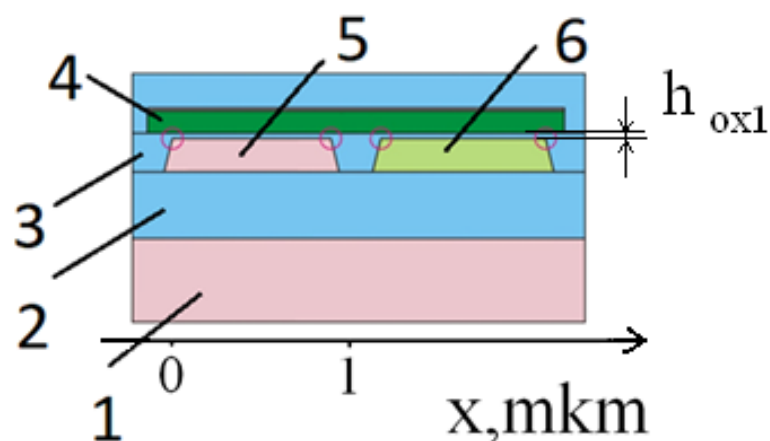
положительного заряда в щелевой изоляции, образовавшегося при радиационном воздействии и приводящего к возникновению паразитных каналов утечек вдоль боковых поверхностей кармана.

Технология изготовления МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором обеспечивает формирование охранного кольца минимально возможного размера, что, во-первых, приводит к уменьшению занимаемой площади на кристалле (увеличению степени интеграции) и, во-вторых, способствует обеспечению радиационной стойкости такого транзистора. В [112] контакт к карману осуществлялся посредством легированной области кремния под «охранным кольцом». Таким образом, контакт к слаболегированному карману осуществляется с двух сторон транзисторной структуры, что исключает возможность использования данной технологии при изготовлении «широких» транзисторов (размером более 10 квадратов (L/W)).

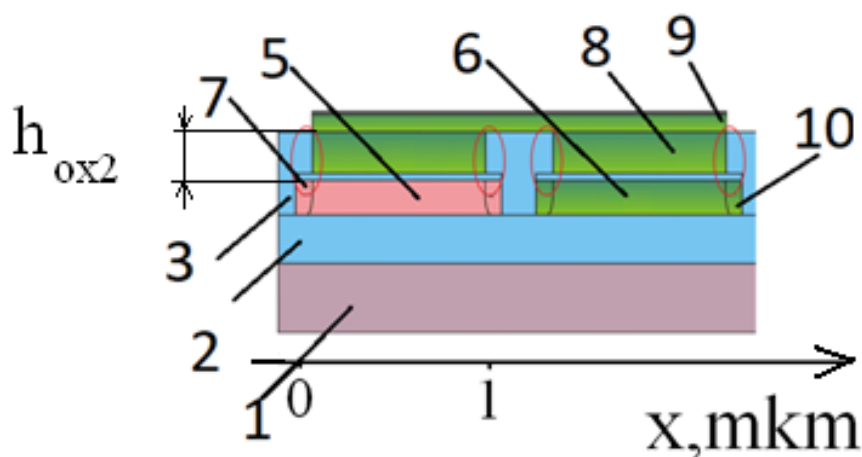
3.1 Преимущества МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором

На рис. 3.1 представлены структуры МОПТ с однослойным (классическим) и с двухслойным поликремниевым затвором. Выделенные (кружками и овалами) области являются областями транзистора с повышенной напряженностью электрического поля. В областях, выделенных овалом (в транзисторах с двухслойным затвором), паразитная емкость «карман-затвор» меньше, чем в областях, выделенных кружком (в классических транзисторах).

Так как у транзистора с двухслойным поликремниевым затвором толщина оксида кремния между поликремниевой шиной и контактом к карману h_{ox2} больше на толщину первого поликремния, чем у транзистора с однослойным поликремниевым затвором h_{ox1} (рис. 3.1), то, соответственно, паразитная емкость в первом случае меньше, чем во втором, так как отношение емкостей структур обратно пропорционально соотношению толщин оксида $h_{ox2}/h_{ox1} \approx 30$. Это оказывает существенное влияние на скоростные характеристики транзистора (численная оценка приведена ниже).



а)



б)

Рис. 3.1 – Схематическое изображение поперечных сечений МОПТ: а) с однослойным поликремниевым затвором; б) с двухслойным поликремниевым затвором: 1 – кремниевая подложка; 2 – слой захороненного оксида кремния; 3 – щелевая изоляция (оксид кремния); 4 – поликремниевая шина классического транзистора; 5 – р-карман (n-МОП); 6 – n-карман (p-МОП); 7 – р+ охрана (n-МОП); 8 – первый слой поликремниевого затвора; 9 – второй слой поликремниевого затвора (поликремниевая шина); 10 – n+охрана (p-МОП). Выделены проблемные области транзисторов

Для сравнительной оценки стойкости подзатворного диэлектрика к пробоям у классического и разработанного транзистора рассмотрим распределение напряженности поля в подзатворном диэлектрике на расстоянии $4 \cdot 10^{-4}$ мкм от поверхности кремниевого островка при напряжении на поликремниевой шине 1 В, а на кармане транзистора 0 В (рис. 3.2). Ширина кремниевого островка при моделировании принималась равной 1 мкм ($0 < x < 1$ мкм).

Напряжение пробоя подзатворного диэлектрика транзистора классической конструкции в 4 раза ниже напряжения пробоя подзатворного диэлектрика транзистора с двухслойным поликремниевым затвором. Также, при разработке технологии изготовления транзистора с зависимым контактом к карману необходимо учитывать зависимость напряженности электрического поля от расстояния до контакта [113]. Особенно это явление заметно в низколегированных образцах, так как с уменьшением концентрации примеси в полупроводнике увеличивается его сопротивление [114]. Напряженность электрического поля обратно пропорциональна квадрату расстояния (координаты) [115]. Для анализа влияния расстояния между контактами к карману на управляемость области канала посредством приложения напряжения на контакт к карману было проведено моделирование 2D кремниевой полупроводниковой структуры, легированной примесью аналогично карману транзистора (врезка на рис. 3.2).

Как следует из результатов моделирования, приведенных на рис. 3.2, в МОПТ с типовой конструкцией в подзатворном диэлектрике вблизи верхних углов кремниевого островка наблюдаются локальные (дельта) всплески напряженности электрического поля (кривая 1). В результате этого в данных областях подзатворного диэлектрика формируются условия для туннелирования носителей заряда, что приводит к увеличению тока утечки через подзатворный диэлектрик.

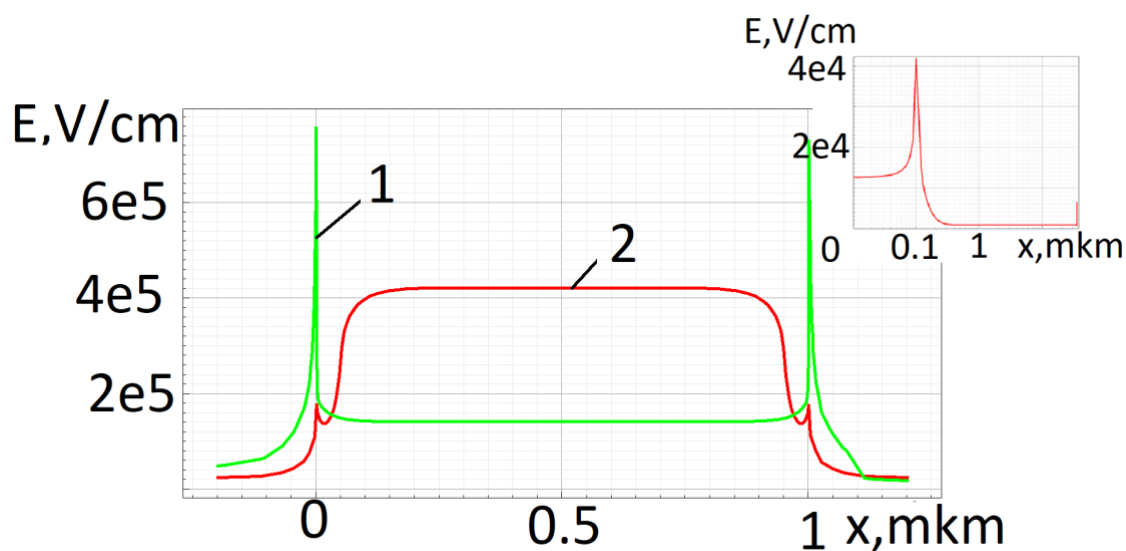


Рис. 3.2 – Распределение напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике вблизи кремниевого островка: 1 – для транзистора с однослойным поликремниевым затвором; 2 – для транзистора с двуслойным поликремниевым затвором. На врезке – распределение модуля напряженности электрического поля в слаболегированном ($N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$) кремниевом образце (ином) прямоугольной формы длиной $0 < x < 1 \text{ мкм}$

Для устранения данного эффекта была предложена конструкция, позволяющая уменьшить напряженность электрического поля в 4 раза за счет специальной формы затвора (увеличения радиуса закругления нижних углов поликремниевого затвора с 20 \AA до 122 \AA). Специальная форма затвора – результат проведения нескольких итераций окисления, расположенных в маршруте между операциями осаждения первого и второго слоев поликремния. Высокотемпературное окисление протравленного по маске слоя поликремния приводит к образованию «птичьего клюва» (увеличение толщины оксида кремния вблизи нижних углов поликремния). Уменьшение напряженности электрического поля приведет к увеличению напряжения пробоя подзатворного диэлектрика [35, 114]. На рис. 3.3 приведен снимок скола изготовленной в НИИИС структуры (промежуточной структуры в маршруте изготовления

МОПТ), где выделена область (кругом) нижнего угла первого слоя поликремния с увеличенным радиусом закругления.

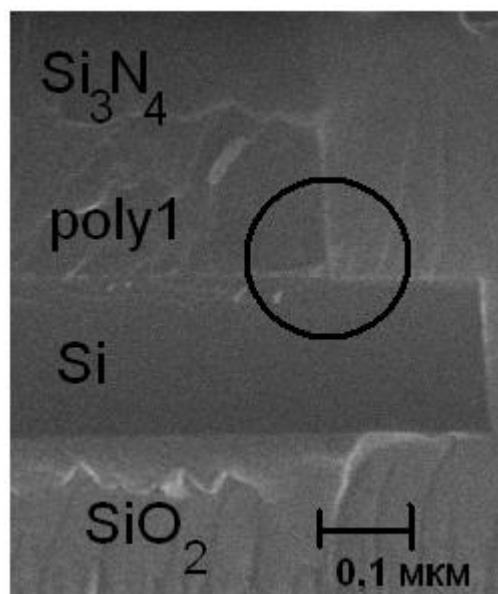


Рис. 3.3 – Снимок промежуточной структуры изготовления МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором. Кружком выделена область нижнего угла поликремниевого затвора

В табл. 3.1 приведены следующие характеристики классического и разработанного транзисторов с совмещенным с истоком контактом к карману: C – паразитная емкость «затвор-карман», S – крутизна, t – время задержки переключения, $U_{пр}$ – пробивное напряжение подзатворного диэлектрика транзистора.

Табл. 3.1 – Характеристики классического и разработанного транзисторов

Тип транзистора	C , пФ	S , См	t , нс	$U_{пр}$, В
Классический	8,56	1,45e-5	0,213	12
Разработанный	0,28	2,6e-5	0,18	15

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что МОПТ с совмещенным с истоком контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором обладает лучшими надежностными характеристиками, чем аналогичный классический транзистор. Повышенная надежность такого транзистора связана с уменьшением напряженности

электрического поля в верхних углах кремниевого островка и в подзатворном диэлектрике. Высота поликремниевого затвора определяется технологией изготовления транзисторных структур.

3.2 Широкий МОПТ с зависимым контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором

Рассмотрим более подробно широкий МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором и с совмещенным с истоком контактом к карману [116].

3.2.1 Физико-топологическая модель широких МОПТ и область их применения

На рис. 3.4 приведены два варианта топологии транзисторов с совмещенным с истоком контактом к карману и с двухслойным поликремниевым затвором. Первый вариант (рис. 3.4 а), разработанный предложен авторами патента [112] (ф. Honeywell), где контакты к карману расположены только на охранном кольце транзистора (далее такой вариант топологии будем называть двухконтактным). На втором варианте (рис. 3.4 б), разработанном в данной работе (оригинальном), топология включает контакты к карману не только на охранной области, но также и в области истока в виде «вставок» [116, 117].

В патенте [111] контакты к карману формировались только на охранных областях транзистора. В оригинальном транзисторе формировались дополнительные контакты к карману вне охранных областей посредством введения в маршрут изготовления ИС дополнительных блоков операций [112].

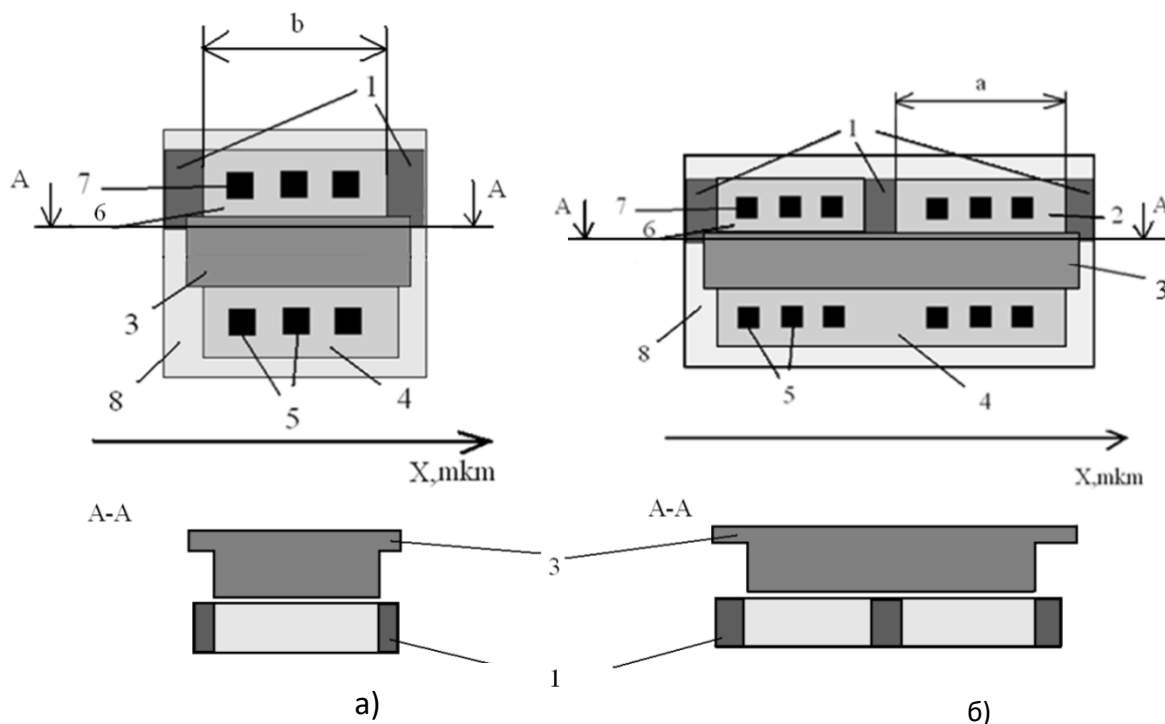


Рис. 3.4 – Топология и схематическое изображение структуры в сечении А-А: а) транзистора, предложенного в патенте [111]; б) широкого оригинального транзистора: 1 – контакт к карману; 2, 6 – кремниевый легированный слой (исток транзистора); 3 – поликремниевый затвор; 4 – кремниевый легированный слой (сток транзистора); 5 – силицидированный контакт к стоку; 7 – силицидированный контакт к истоку; 8 – кольцевидная легированная область кремния – охранная область транзистора

В процессе моделирования сравнивались транзисторы с двухслойным поликремниевым затвором, которые отличаются расстоянием между легированными областями кремния – контактами к подложке (рис. 3.4а и 3.4б), а именно, $a=3,5$ мкм, $b=7$ мкм. Остальные геометрические характеристик были одинаковыми. В 3D модели оригинального транзистора шириной 7 мкм дополнительная вставка (контакт к карману) располагалась на расстоянии 3,55 мкм от края кремниевого островка.

Исследуемые транзисторы обладали следующими геометрическими параметрами: длина поликремниевого затвора 0,35 мкм, длина области LDD

0,1 мкм, истока/стока 0,1 мкм, ширина транзистора 7 мкм. Толщины захороненного оксида и приборного слоя кремния у структур КНИ составляли 0,2 мкм (типичные толщины в производстве интегральных схем с проектными нормами 0,35 мкм). В табл. 3.2 приведены уровни легирования областей исследованных транзисторов.

Табл. 3.2 – Уровни легирования областей транзисторов

Название области	Исток	Сток	Затвор	Карман	Контакт к карману
Концентрация примеси, см ⁻³	10 ²⁰	10 ²⁰	10 ²⁰	10 ¹⁷	10 ²⁰

Необходимость 3D моделирования объясняется тем, что 2D сечение транзистора является недостаточным для решения поставленной задачи и не может охватить необходимое для расчета влияние введения дополнительного контакта к карману на управляемость областью канала в транзисторе (рис. 3.5). На рис. 3.5 приведено изображение рассчитанного МОПТ со сформированными контактами к карману.

При расчете характеристик использовались следующие начальные условия: напряжение на контактах равно нулю, температура электродов и структуры в целом равна 300 К, контакты являлись омическими. Для расчета приборно-технологической модели и при расчете электрофизических характеристик использовалась аддитивная сетка, измельчающаяся на границах раздела и в легированных областях материала. Размеры сетки менялись от 0,1 мкм до 0,001 мкм в кремнии. В подзатворном оксиде сетка задавалась значительно меньше, согласно его толщине (0,0065 мкм).

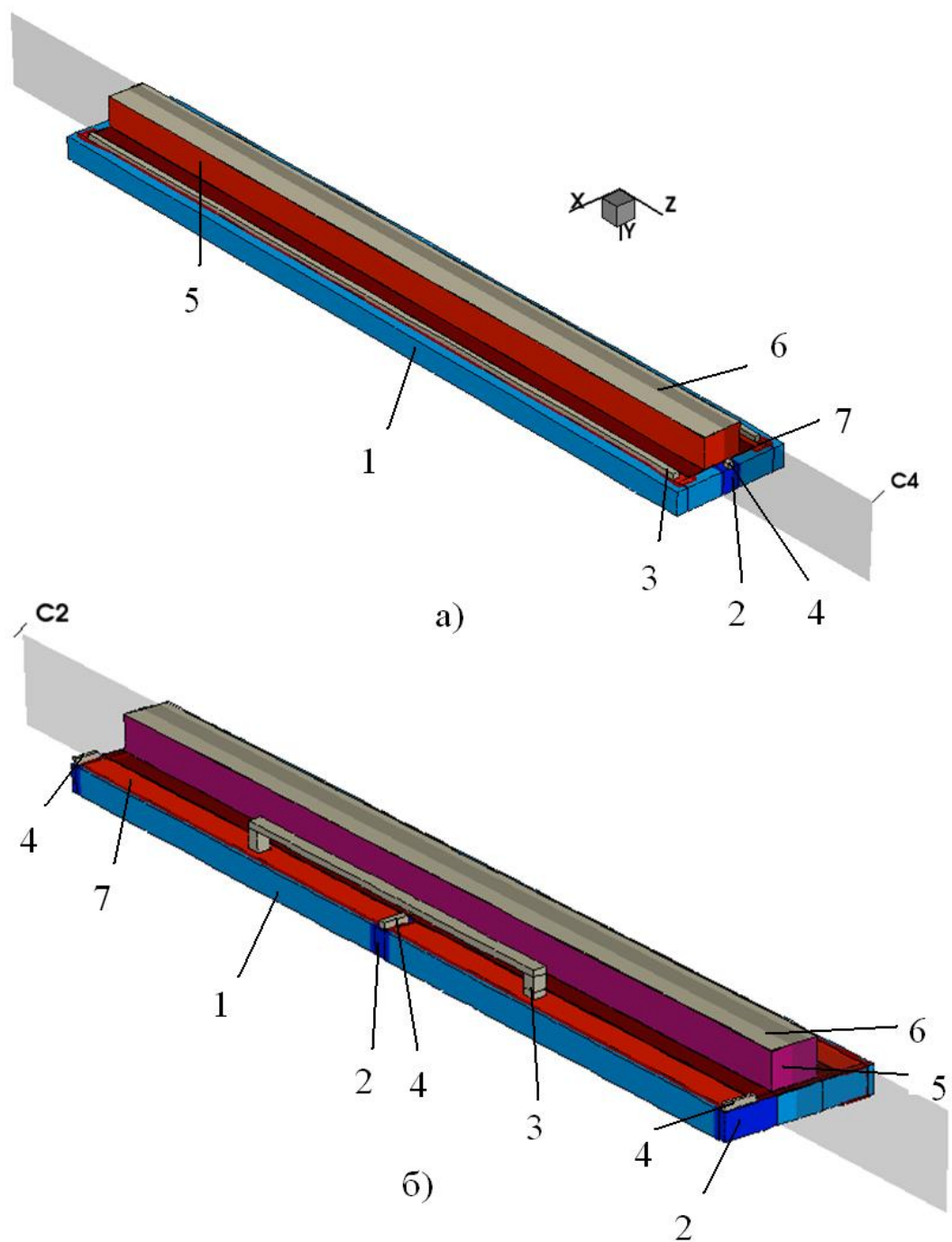


Рис. 3.5 – Изображение рассчитанной структуры оригинального МОПТ шириной 20 квадратов со сформированными контактами к карману, где С2 и С4 исследуемые плоскости сечения 3D структур: 1 – область охраны; 2 – контакт к карману (сильнолегированный слой кремния); 3 – силицидированный контакт к истоку транзистора; 4 – силицидированный контакт к карману транзистора; 5 – поликремниевый затвор (для упрощения расчетов использовали один слой поликремния); 6 – силицидированный контакт к затвору транзистора; 7 – сильнолегированная область истока транзистора

3.2.2 Характеристики широкого МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором

Сравним характеристики транзистора с дополнительным контактом к карману (оригинального) и транзистора без дополнительного контакта к карману (двухконтактного). На рис. 3.6 приведены распределения напряженности электрического поля в сечениях С2 и С4 (см. рис. 3.5) в канале транзистора вблизи с границей с подзатворным диэлектриком.

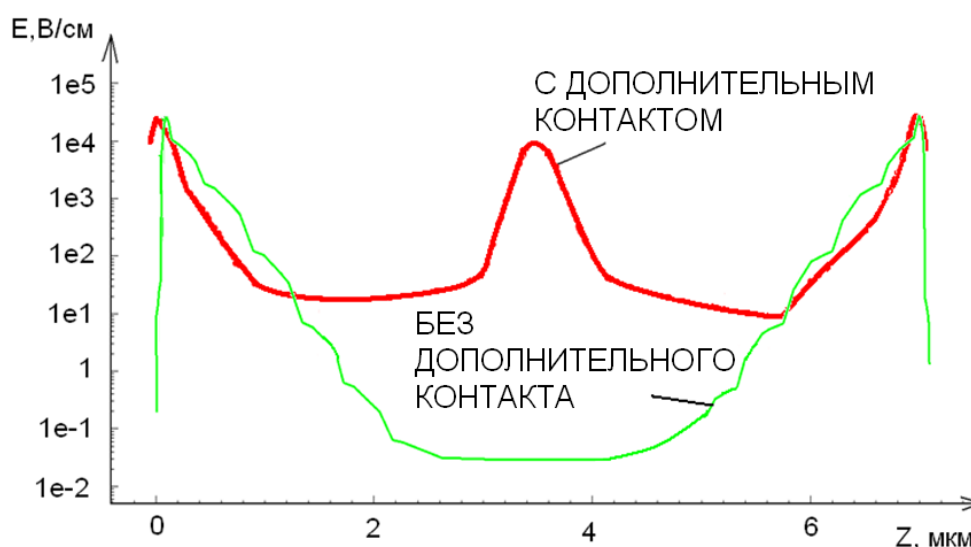


Рис. 3.6 – Распределение напряженности электрического поля вдоль оси Z в канале транзисторов длиной 7 мкм: красный – для оригинального транзистора (структура б на рис. 3.5); зеленый – для двухконтактного транзистора (ф. Honeywell, структура а на рис. 3.5)

Как указывалось ранее, в элементах ввода-вывода ИС используются «широкие» транзисторы, т.к. именно такая конструкция транзисторов обеспечивает протекание повышенных токов. Для проектирования «широких» транзисторов необходимо учитывать эффект уменьшения напряженности электрического поля при удалении от контакта к карману [63]. Отрицательным результатом данного эффекта является нарушение работы транзистора вследствие задержки открытия канала. На врезке рис. 3.2 приведен результат моделирования распределения модуля напряженности электрического поля 2D

структуры. Между двумя контактами подавалось напряжение $V = 0$ при $x = 35,0$ мкм и $V = 3,3$ В при $x = 0,1$ мкм соответственно. Исследуемая структура – это кремниевый слой толщиной $0,2$ мкм (соответствует толщине рабочего слоя структуры КНИ) и шириной $35,0$ мкм, легированный фосфором с концентрацией 10^{17} см⁻³. Приведенное значение концентрации соответствует концентрации примеси в кармане транзистора. Контакты моделировались точечными на расстоянии $0,1$ мкм и $35,0$ мкм от левой границы структуры. Таким образом, при создании геометрии транзистора для улучшения управляемости областью канала, осуществляемой посредством подачи напряжения на контакт к карману, необходимо учитывать распределение напряженности электрического поля в легированном полупроводнике.

Учитывая вышеперечисленные особенности, была разработана технология изготовления транзистора с зависимым контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором на структурах КНИ (оригинальный транзистор) шириной от 10 до 100 квадратов. Самосовмещенная технология такого транзистора отличается от известной двухконтактной структуры введением дополнительного топологического слоя, который состоит из высоколегированной области кремния «вставки» (контакта к карману, см. рис. 3.2) и слаболегированной области кремния, посредством которой происходит соединение «вставки» с карманом транзистора. Так как предложенный контакт к карману не привязан к «охранному кольцу» транзистора, то на области истока можно сформировать несколько подобных контактов к карману («вставок»), тем самым учесть и исключить нежелательное падение напряженности электрического поля в кармане и улучшить управляемость областью канала посредством подачи напряжения на контакт к карману.

Предложенное изменение контакта к транзистору способствует расширению области использования транзистора, так как позволяет изготавливать транзисторы любой ширины без ухудшения их электрофизических параметров.

Моделирование передаточной характеристики осуществлялось в двух режимах работы:

– на исток и контакт к карману подавался 0, на сток 0,1 В. Рассчитывался ток стока в диапазоне напряжений на затворе от 0 до 3,3 В. Полученные передаточные характеристики транзисторов были идентичны друг другу;

– на исток подавался 0, на сток 0,1 В, на контакт к карману подавалось напряжение минус 0,5 В. Рассчитывался ток стока в диапазоне напряжений на затворе от 0 до 3,3 В.

Приложение напряжения на карман широкого двухконтактного транзистора ($W/L = 20$) не привело к какому-либо изменению его передаточной характеристики, что свидетельствует о том, что предложенный вариант формирования контакта к карману не подходит для широких транзисторов.

Приложение отрицательного напряжения на карман широкого оригинального транзистора привело не только к увеличению начального тока стока, но и к увеличению порогового напряжения транзистора (сдвигу характеристики вправо). Значения сдвига и увеличения начального тока зависят от величины приложенного напряжения. На рис. 3.7 приведены передаточные характеристики исследуемых транзисторов. При приложении небольшого напряжения (относительно напряжения питания) на контакт к карману оригинальной транзисторной структуры наблюдается динамика ВАХ, для двухконтактной структуры этого не наблюдается.

Из рисунка 3.7 следует, увеличение напряженности электрического поля в кармане оригинального транзистора приводит к увеличению крутизны этого транзистора, что объясняется увеличением концентрации носителей заряда в подзатворной области канала.

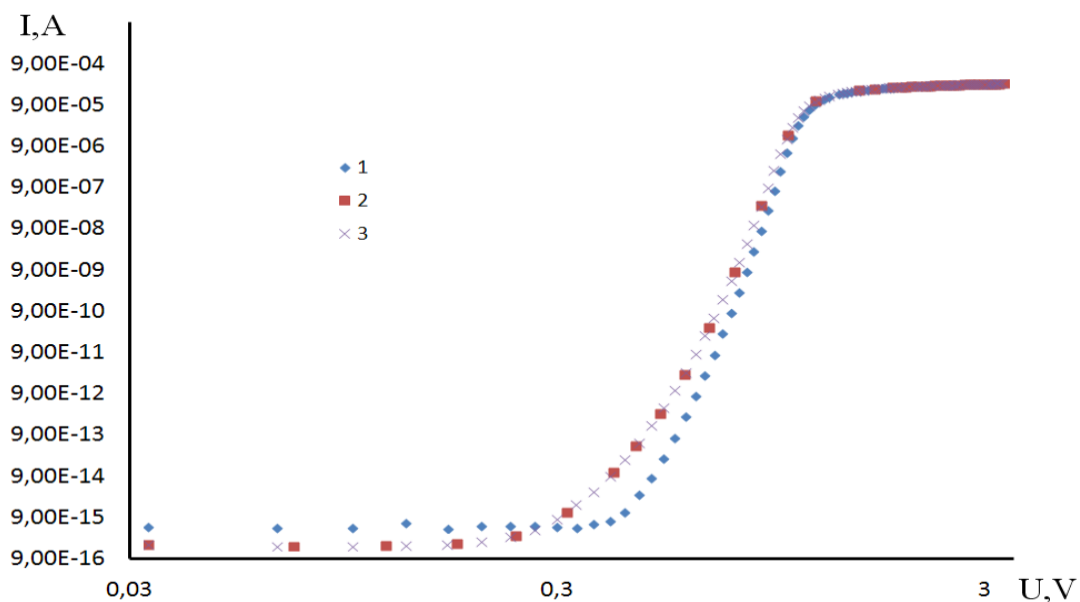


Рис. 3.7 – Передаточные характеристики оригинального и двухконтактного транзисторов: 1 – оригинальный транзистор с напряжением на подложке минус 0,5 В; 2 – двухконтактный транзистор с напряжением на подложке минус 0,5 В; 3 – двухконтактный транзистор с напряжением на подложке 0 В

Полученные результаты моделирования и экспериментального изготовления свидетельствует о лучшем управлении областью канала «широкого» транзистора посредством контакта к карману в оригинальной структуре, чем в двухконтактной структуре транзистора. Таким образом, оригинальный транзистор не только обладает всеми преимуществами, характерными транзистору с двухслойным поликремниевым затвором, но и может использоваться в элементах ввода и вывода ИС.

3.3 МОПТ с независимым контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором

Одним из результатов представленной работы являлась разработка двух оригинальных вариантов конструктивного исполнения транзисторов с минимальной проектной нормой $0,35$ мкм с двухслойным поликремниевым

затвором и независимым контактом к карману, являющихся аналогами транзисторов Т- и Н-типа с одним уровнем поликремния (рис. 3.8):

– несимметричный (относительно оси, перпендикулярной плоскости сечения А-А и проходящей через контакты истока и стока) транзистор с двухслойным поликремниевым затвором и независимым контактом к карману, где формируется только один контакт;

– симметричный транзистор с двухслойным поликремниевым затвором с двумя независимыми контактами к карману (рис. 3.8б).

Данные элементы можно использовать в качестве проходных ключей в ИС [85, 118].

Как видно из рис. 3.8, оригинальные транзисторы с независимым контактом к карману являются симметричными относительно плоскости сечения А-А.

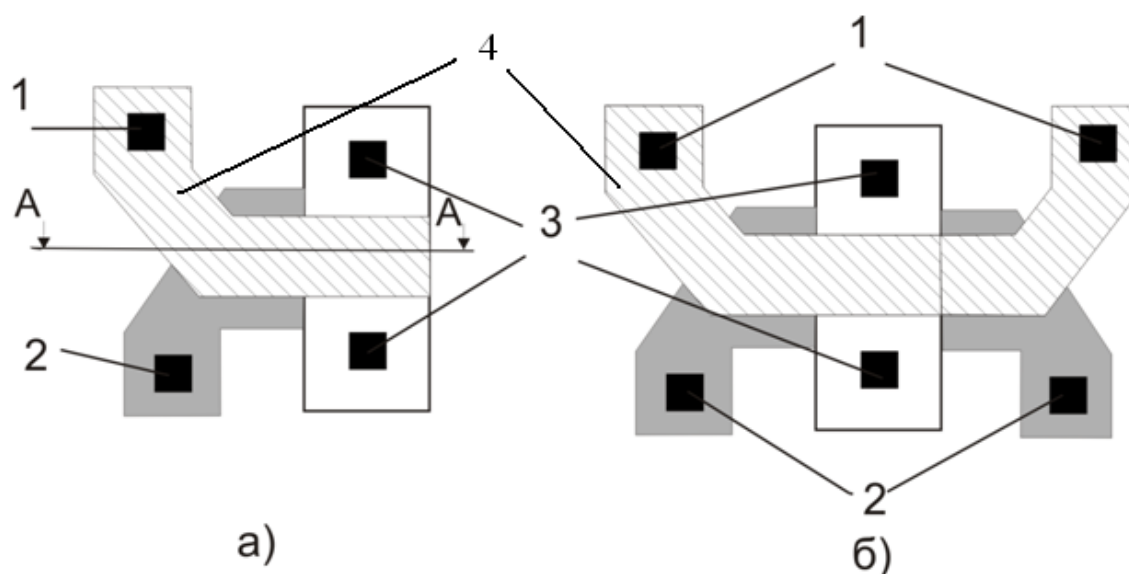


Рис. 3.8 – Топология разработанных оригинальных МОПТ с двумя уровнями поликремния: а) ПС-типа (аналог классическому транзистору Т-типа); б) ИС-типа (аналог классическому транзистору Н-типа): 1 – контакт к затвору транзистора; 2 – контакт к карману транзистора; 3 – контакты к областям истока и стока транзистора; 4 – поликремниевые шины

Необходимо отметить, что сама структура транзистора с однослойным поликремниевым затвором (классического транзистора Т-типа (рис. 1.4а)), расположенная ниже затвора, аналогична структуре транзистора с двухслойным поликремниевым затвором ПС-типа (рис.3.8а). Также структура классического транзистора Н-типа (рис. 1.4б) аналогична структуре предложенного транзистора I2С-типа.

Как уже отмечалось, транзистор Н-типа отличается от транзистора Т-типа (рис. 1.3) также, как транзистор I2С-типа отличается от транзистора ПС-типа, а именно наличием дополнительного контакта к карману (рис. 3.8).

В классическом варианте контакт к карману формируется на одном кремниевом острове с истоком, стоком транзистора и отделен слоем поликремния, что является источником паразитной емкости «поликремниевая шина-карман». В оригинальных транзисторах с независимым контактом к карману, сам контакт вынесен с области транзистора (рис. 3.9).

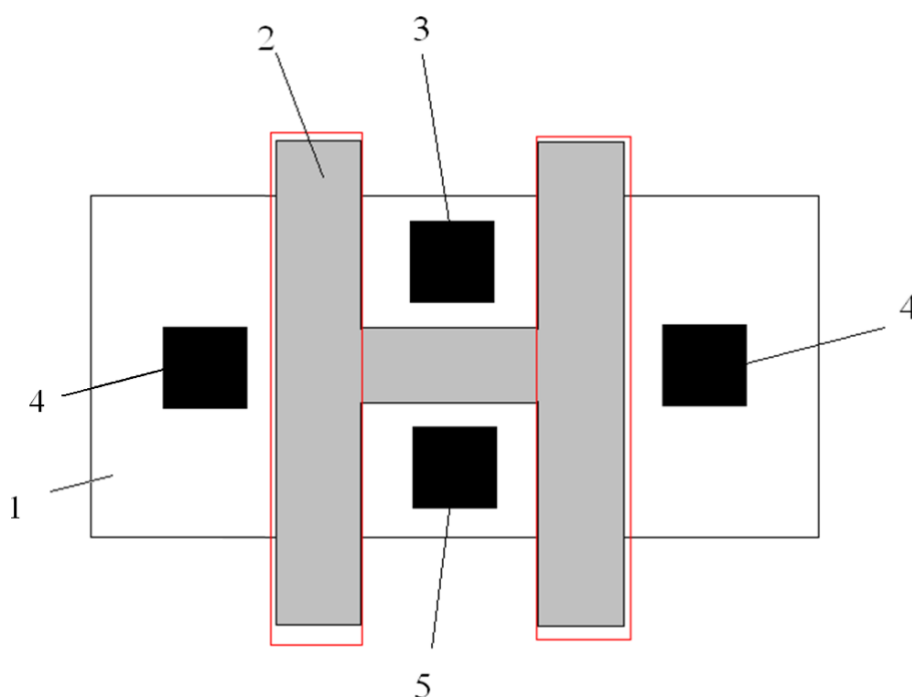


Рис. 3.9 – Схематическое изображение транзистора Н-типа, где красными прямоугольниками выделены области поликремния, создающие паразитную емкость: 1 – кремниевый островок; 2 – слой поликремния; 3 и 5 – контакты к областям истока и стока; 4 – контакт к карману транзистора

Из рис. 3.9 следует, что в транзисторе N-типа затвором является область поликремния, расположенная между истоком и стоком (область поликремния, расположенная между красными прямоугольниками). Остальная часть поликремниевого слоя, расположенная на кремниевом островке является причиной формирования паразитной емкости.

3.3.1 Особенности технологии изготовления МОПТ с независимым контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором

Для реализации предложенной топологии транзистора с минимальной проектной нормой 0,35 мкм была разработана технология изготовления МОПТ с двухслойным самосовмещенным поликремниевым затвором и независимым контактом к карману.

Данные транзисторы изготавливались на структуре КНИ с кремниевым приборным слоем толщиной 0,2 мкм. Толщина захороненного оксида кремния составляла 0,2 мкм. Затвор в предложенных транзисторах состоял из двух слоев поликремния, первый из которых использовался только в качестве части затвора транзистора, а второй – как в качестве части затвора транзистора, так и поликремниевой шины (рис. 3.10).

Кремниевый островок, контакт к карману, область, соединяющая контакт к карману и карман транзистора формировались с помощью одной операции травления слоя кремния до захороненного оксида кремния. Второй слой поликремния осаждался после формирования целевой изоляции. В предложенной технологии изготовления транзисторов с двухслойным поликремниевым затвором первый слой поликремния травился 2 раза по разным маскам (в разных частях маршрута). Первый раз – по маске актива для формирования охранных областей, второй раз – совместно со вторым поликремнием по одной маске формировались затворы транзисторов.

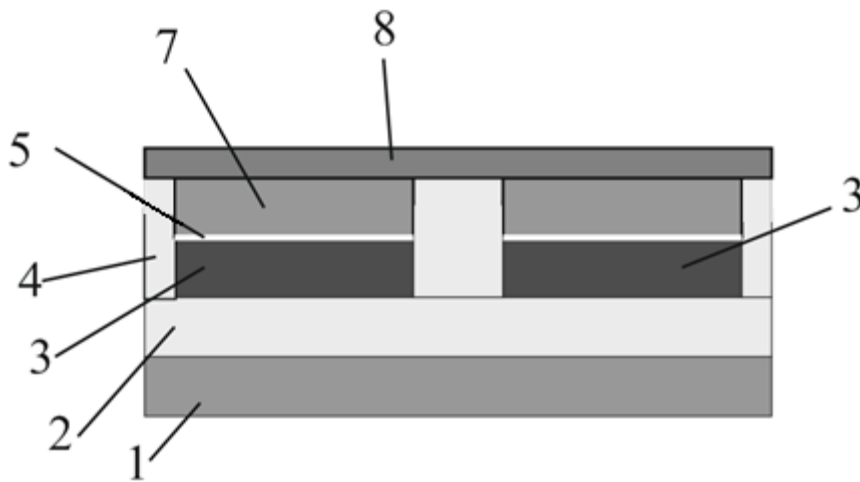


Рис. 3.10 – Структура кремниевого МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором, сформированного на структуре КНИ, где:

1 – кремниевая подложка; 2 – слой захороненного оксида кремния; 3 – легированные кремниевые островки (тело транзистора); 4 – щелевая изоляция, заполненная оксидом кремния; 5 – подзатворный диэлектрик (оксид кремния); 6 – легированный слой поликремниевого затвора; 7 – первый слой легированного поликремния; 8 – второй слой легированного поликремния

Второй слой поликремния травился один раз. После формирования затворов разработанных транзисторов процесс изготовления транзисторных структур заканчивался классическими последовательными блоками операций: формирование низколегированных областей истока и стока, формирование спейсеров, формирование сильнолегированных областей истока и стока, формирование силицидированных контактов и последующей металлической разводки.

Разработанная технология позволяет изготавливать субмикронные МОПТ с независимым контактом к карману со всеми преимуществами, характерными транзисторам с двухслойным поликремниевым затвором перед транзисторами с однослойным поликремниевым затвором. Более подробно технология изготовления предложенного транзистора приведена в патенте [119].

3.3.2 Характеристики МОПТ с зависимым контактом к карману и с двухслойным поликремниевым затвором

SPICE-модели элементов необходимы для схемотехнического моделирования электрической схемы. Экстракция SPICE-параметров проводилась с помощью САПР IC-CAP с применением модели МОП КНД транзисторов BSIMSOI3 и с использованием внешнего симулятора Spectre ф. Cadence.

В результате экстракции SPICE-параметров получена следующая сходимость ВАХ транзисторов: максимальная относительная ошибка не превосходит 15%, а среднеквадратическая ошибка $RMS < 0.043\%$. Исходя из этого, можно констатировать высокую точность моделирования ВАХ на основе экстрагированных SPICE-параметров.

Полученные в результате экстракции наборы SPICE-параметров классических транзисторов и МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором были использованы в схемотехническом моделировании кольцевых генераторов для расчета времени задержки на вентиль элементов «НЕ», «2И-НЕ», «2ИЛИ-НЕ». Электрические схемы кольцевого генератора и вентиля «2ИЛИ-НЕ» приведены на рисунке 3.11.

Моделирование кольцевых генераторов проводилось в САПР ф. Cadence с использованием симулятора Spectre. В электрической схеме на «независимый контакт» транзистора n-типа подавалось ноль вольт, транзистора p-типа подавалось напряжение питания.

Для сравнения в табл. 3.3 приведены результаты схемотехнического моделирования вентилях на классических транзисторах (левый столбец) и на транзисторах с двухслойным поликремниевым затвором (правый столбец). Из табл. 3.3 видно, что вентили на предложенных типах транзисторов обладают меньшим временем задержки, чем вентили на классических транзисторах с однослойным поликремниевым затвором.

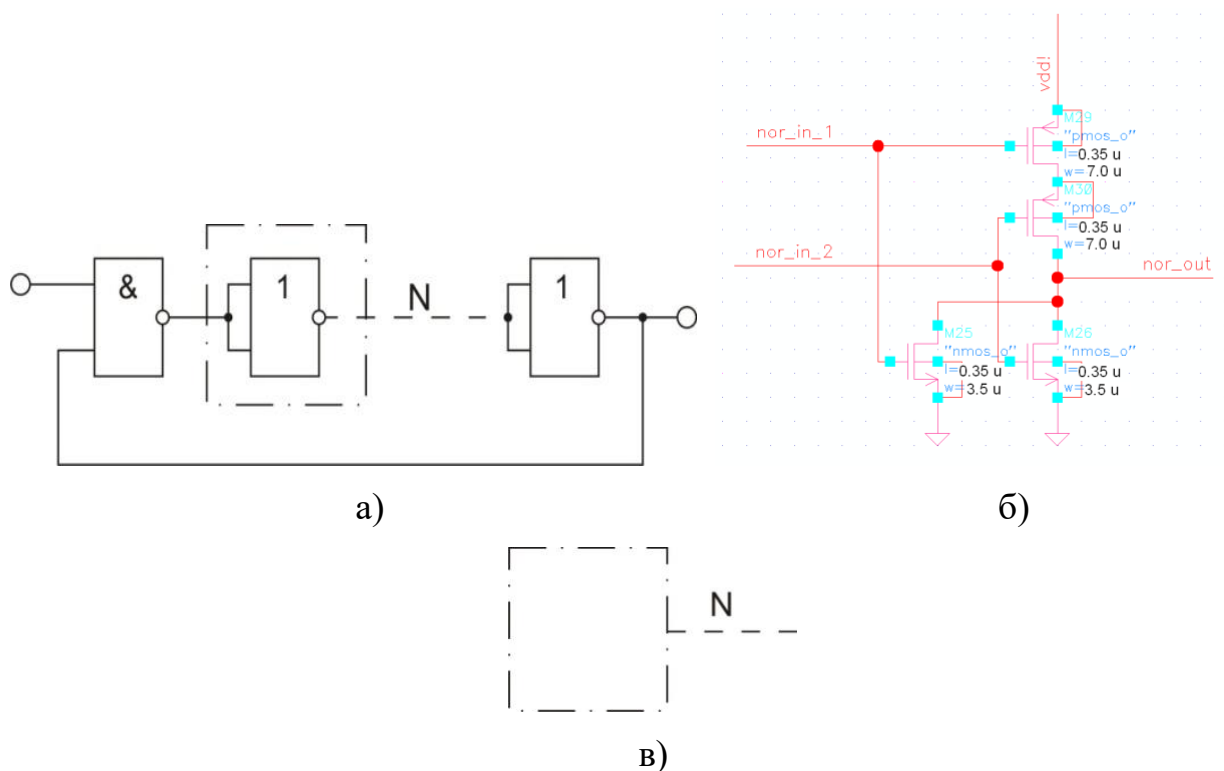


Рис. 3.11 – Электрическая схема кольцевого генератора на вентилях «2ИЛИ-НЕ» (а), электрическая схема вентиля «2ИЛИ-НЕ» (б), условное обозначение последовательности повторяющихся функциональных групп (в)

Табл. 3.3 – Значения времени задержки вентилях, спроектированных на классических и разработанных транзисторах

Типы транзисторов	«НЕ»			«2ИЛИ-НЕ»			«2И-НЕ»		
	Время задержки t, нс		$\Delta t, \%$	Время задержки t, нс		$\Delta t, \%$	Время задержки t, нс		$\Delta t, \%$
H→I1C	0,208	0,105	-50	0,378	0,187	-51	0,371	0,19	-49
H→I2C	0,208	0,098	-53	0,378	0,175	-54	0,371	0,176	-53
T→I1C	0,175	0,105	-40	0,321	0,187	-42	0,313	0,19	-39
T→I2C	0,175	0,098	-44	0,321	0,175	-45	0,313	0,176	-44

Для исследования влияния температуры на среднее время задержки вентилях на исследуемых транзисторах были проведены аналогичные расчеты (табл. 3.4) при разных температурах: -60°C , $+27^{\circ}\text{C}$, $+125^{\circ}\text{C}$.

Табл. 3.4 – Значения времени задержки на вентилях для различных типов МОПТ при минимальной и максимальной ширине канала и различных температурах

Типы транзисторов			Вентиль	-60 °С			+27 °С			+125 °С		
				Время задержки t, нс		Δt , %	Время задержки t, нс		Δt , %	Время задержки t, нс		Δt , %
	NMOS	PMOS		Н	I2C		Н	I2C		Н	I2C	
W_{max} , МКМ	1.75	3.5	«НЕ»	0.186	0.078	-58	0.241	0.105	-56	0.308	0.142	-54
W_{min} , МКМ	1.0	2.0		0.257	0.085	-67	0.333	0.115	-65	0.425	0.154	-64
W_{max} , МКМ	1.75	3.5	«2И-НЕ»	0.326	0.139	-57	0.433	0.189	-56	0.565	0.264	-53
W_{min} , МКМ	1.0	2.0		0.452	0.152	-66	0.601	0.206	-66	0.782	0.286	-63
W_{max} , МКМ	1.75	3.5	«2ИЛИ- НЕ»	0.337	0.135	-60	0.440	0.187	-57	0.558	0.254	-54
W_{min} , МКМ	1.0	2.0		0.471	0.148	-69	0.616	0.204	-66	0.780	0.275	-65

В табл. 3.4 приведены средние времена задержки переключения вентиляей на транзисторах Н и I2С-типов. Из приведенных результатов моделирования следует, что времена задержки на вентилях НЕ, 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ, спроектированных на основе разработанных конструктивно-технологических решений, на **50-75 % меньше**, чем времена задержки на таких вентилях, изготовленных по классической КМОП КНИ технологии. Увеличение температуры приводит к увеличению времени задержки на вентиле.

Преимуществом предложенной технологии также является уменьшение занимаемой площади на кристалле транзистора. На рис. 3.11 приведены две ячейки памяти статического ОЗУ с памятью 1 Мбит, спроектированные на классических транзисторах (рис. 3.13 а) и на разработанных транзисторах I2С-типа (рис. 3.13 б).

Кристалл СОЗУ с информационной емкостью 1 Мбит на классических транзисторах занимает площадь $10,5 \times 10,5 \text{ мм}^2$. Аналогичный кристалл на вновь разработанных транзисторах занимает площадь на $7,0 \times 7,0 \text{ мм}^2$.

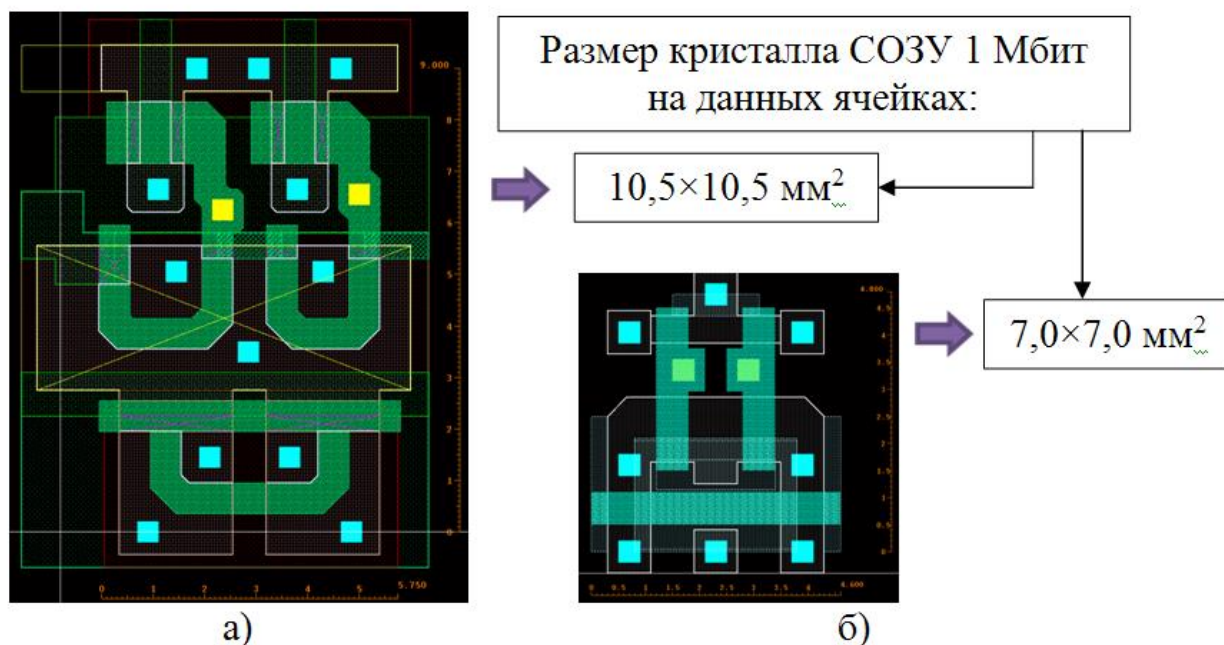


Рис. 3.13 – Сравнение размеров ячеек памяти статического ОЗУ соответствующей памяти 1 Мбит: а) классическая КМОП КНИ технология; б) КМОП КНИ технология на предложенных транзисторах I2C-типа

Таким образом, использование предложенного оригинального типа транзисторов приводит к уменьшению площади топологии схем в 1,5-2 раза. Это способствует увеличению интеграции элементов на кристалле приблизительно в два раза.

В работе были разработаны и исследованы МОПТ, являющиеся аналогами разных типов классических транзисторов, обладающие всеми преимуществами, характерными транзисторам с двухслойным поликремниевым затвором, а именно: повышение скоростных характеристик, радиационной стойкости и пробивной надежности подзатворного диэлектрика. Разработанная технология изготовления таких транзисторов совместима с технологией изготовления классических МОПТ и может быть реализована на производственной линии изготовления интегральных схем без дополнительного дооснащения.

3.4 Выводы к главе 3

Предложены новые конструктивно-технологические решения создания МОП-транзисторов с двухслойным поликремниевым затвором, а именно: разделение блоками операций формирование нижнего и верхнего слоя поликремния для увеличения расстояния между поликремниевой шиной и карманом транзистора; подобран режим окисления нижнего слоя поликремния, позволявший сформировать необходимого радиуса закругления нижние углы затвора для уменьшения напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике, введение дополнительных областей имплантации для формирования контакта к карману. Такие транзисторы обладают следующими преимуществами по сравнению с транзисторами с однослойным поликремниевым затвором:

1. За счет увеличения расстояния между поликремниевой шиной и карманом транзистора удалось уменьшить паразитную емкость «затвор-карман» и тем самым увеличить его быстродействие, что позволяет повышение скоростных характеристик ИС. Впервые было предложено конструктивно-технологическое решение, способствующее уменьшению время задержки на вентиль до двух раз. Этот результат является практически значимым.

2. За счет уменьшения напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике транзистора с оригинальной конструкцией двухслойного затвора удалось увеличить напряжение пробоя подзатворного диэлектрика, что позволяет изготавливать ИС с повышенной надежностью.

3. За счет увеличения напряженности электрического поля в кармане широкого транзистора (до 100 квадратов) посредством ввода дополнительных контактов к карману удалось улучшить управляемость этого транзистора и расширить их область применения (элементы ввода-вывода ИС).

4 Ошибка! Закладка не определена.

В ходе работы был разработан оригинальный биполярный транзистор (БТ) с боковым контактом к базе на структуре «кремний на изоляторе», который может быть изготовлен по совместимому с КМОП КНИ технологическому маршруту. Вследствие отсутствия полного обеднения области базы при приложении напряжения на ее контакт наблюдается увеличение коэффициента усиления тока по сравнению с аналогом с верхним контактом к базе. За счет применения оригинальной конструкции данные БТ обладают высоким коэффициентом усиления тока при нормальных условиях, а также после гамма-воздействия.

4.1 Ошибка! Закладка не определена.

Конструкции разработанных БТ с боковым контактом на структуре КНИ и с верхним контактом к активной базе приведены на рис. 4.1. Как видно из рис. 4.1, разработанные структуры БТ окружены щелевой изоляцией (оксидом кремния).

Параметры предложенной конструкции транзисторов определялись по результатам трехмерного численного моделирования транспорта носителей заряда. Расположение активных областей эмиттера, базы и коллектора таково, что движение носителей заряда от эмиттера к коллектору проходит параллельно поверхности полупроводниковой структуры. Это позволяет разместить транзистор в приборном слое кремния толщиной 200 нм. Приоритетной задачей было снижение величины базовых токов, определяющих токи рекомбинации в активных областях структуры транзистора. Важным фактором конструкции, влияющим на транспорт носителей и параметры транзисторов, явилось расположение контактов к области активной базы.

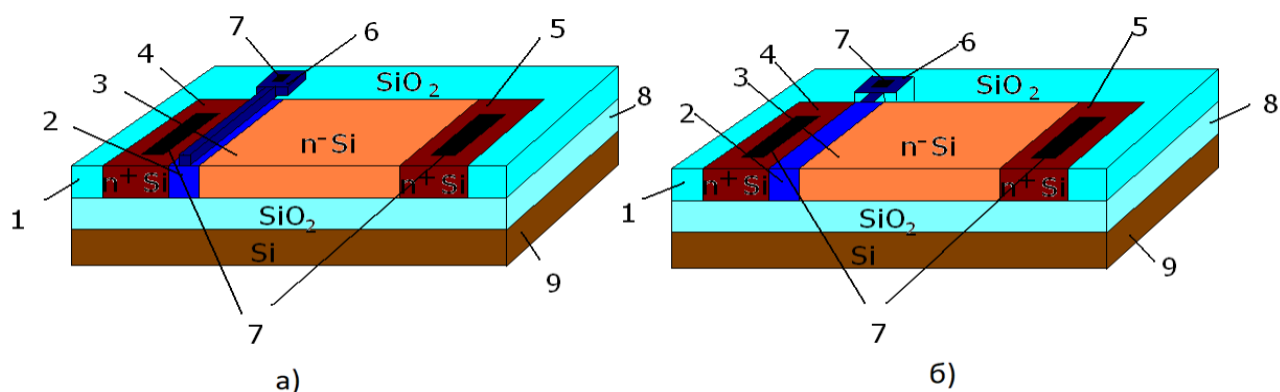


Рис. 4.1 – Модельный вид конструкции биполярных транзисторов с верхним (а) и боковым (б) контактом к базе: 1 – диэлектрическая изоляция; 2 – область активной базы; 3 – область p^- коллектора; 4-область p^+ -эмиттера; 5 – p^+ -коллектор; 6 – пассивная база; 7 – области контактов; 8 – «захороненный» диэлектрик; 9 – подложка

Исследуемые транзисторы выполнены в приборном слое кремния толщиной 200 нм и имеют латеральное расположение активных областей эмиттера, базы и коллектора. Формировались транзисторы в электрически изолированном кармане с использованием боковой диэлектрической изоляции и слоя «захороненного» диэлектрика. Сравнивались параметры транзисторов, имеющих аналогичную геометрию активных областей и равную концентрацию примеси в p^+ -эмиттере и коллекторе ($N_{e,c(p^+)}$), базе (N_b) и p^- -коллекторе ($N_{c(p^-)}$). Толщина области активной базы (W) определяется проектными нормами субмикронной технологии с диапазоном 0,24-0,35 мкм. Максимальная ширина активной области транзистора была обусловлена шириной активной базы и составляла при моделировании 10 мкм. Силицидированные контакты к эмиттеру и коллектору выполнялись аналогично для обоих транзисторов. Отличие конструкции транзисторов заключалось в применении верхней и боковой геометрии контактов к пассивной базе. Концентрации примесей в активных областях варьировались с целью определения оптимальных электрических параметров транзисторов. В сильнолегированных областях эмиттера и коллектора ($N_{e,c(p^+)}$) концентрации примеси при расчетах начинались с уровня $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, в области активной базы (N_b) с уровня $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Контакты к базе моделировались с пренебрежимо малым контактным сопротивлением. Значения

электрофизических параметров варьировались с учетом требований к параметрам интегральных схем, выполненных по субмикронной биполярной и КМОП технологии. Учитывались требования к параметрам транзисторов по диапазону напряжений питания, токам потребления, коэффициенту передачи тока базы. Рассматривалась схема включения транзистора с общим эмиттером. Напряжение, приложенное к области базы, варьировалось в пределах $0 \div 0,9$ В; напряжение, приложенное к коллектору – $0 \div 3,3$ В.

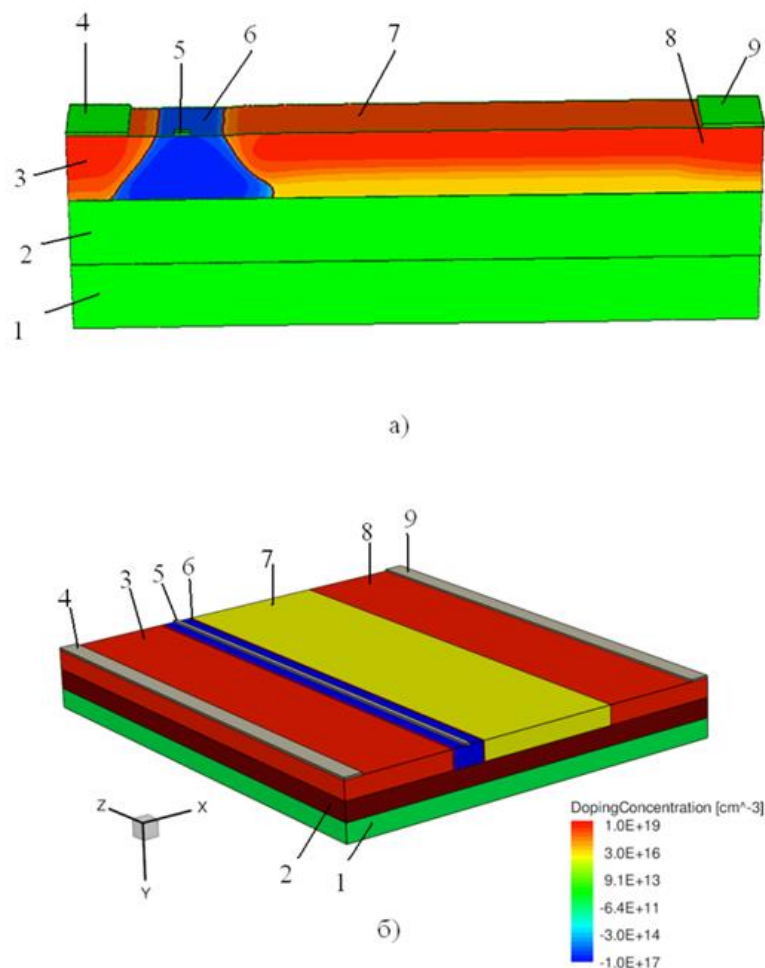


Рис. 4.2 – Модельный вид конструкции биполярных транзисторов с верхним контактом к базе, рассчитанный посредством численного моделирования в системе расчета конструкции элемента – Sprocess (а) и системе построения структуры элемента – SDE (б): 1 – кремниевая подложка; 2 – слой захороненного оксида кремния; 3 – область эмиттера; 4 – контакт к эмиттеру; 5 – контакт к базе; 6 – область базы; 7 – область слаболегированного коллектора; 8 – область сильнолегированного коллектора; 9 – контакт к коллектору

4.2 Особенности технологического маршрута изготовления БТ

Технологический маршрут изготовления разработанных латеральных БТ совместим с КМОП маршрутом по составу операций. БТ формировались на структурах «кремний на изоляторе» с толщиной приборного слоя кремния 200 нм и толщиной скрытого слоя диэлектрика 150-200 нм. В технологическом маршруте использовались операции фотолитографии, осаждения диэлектрических и проводящих слоев, операции ионного легирования, термических обработок, плазмохимического травления, химической очистки и т.д. На рис. 4.3 а приведено схематическое изображение этапов изготовления БТ на КНИ.

Топологическая схема размещения активных и пассивных областей БТ представлена на рис. 4.3. Оптимальные геометрические размеры области активной базы определяются по результатам моделирования и составляют: толщина 0,2-0,3 мкм, ширина 5-7 мкм. Первоначально проводилось формирование электрически изолированной приборной области транзистора с использованием операций фотолитографии и плазмохимического травления эпитаксиального слоя кремния, двуокиси и нитрида кремния по маскам (рис. 4.3 а). Выполнялось формирование боковой диэлектрической изоляции посредством последовательного высокотемпературного окисления в сухом кислороде и осаждения слоя двуокиси кремния. Затем с использованием операции химико-механической полировки проводилась планаризация поверхности.

Далее нитрид кремния удалялся, после чего приступали к формированию областей БТ. Легирование области активной базы транзисторов выполнялось по маске фоторезиста через буферный слой двуокиси кремния (рис. 4.3 б). Для более равномерного распределения примеси на всю глубину эпитаксиального слоя кремния легирование базы для n-p-n транзисторов проводилось двойной имплантацией ионами бора и BF_2^+ .

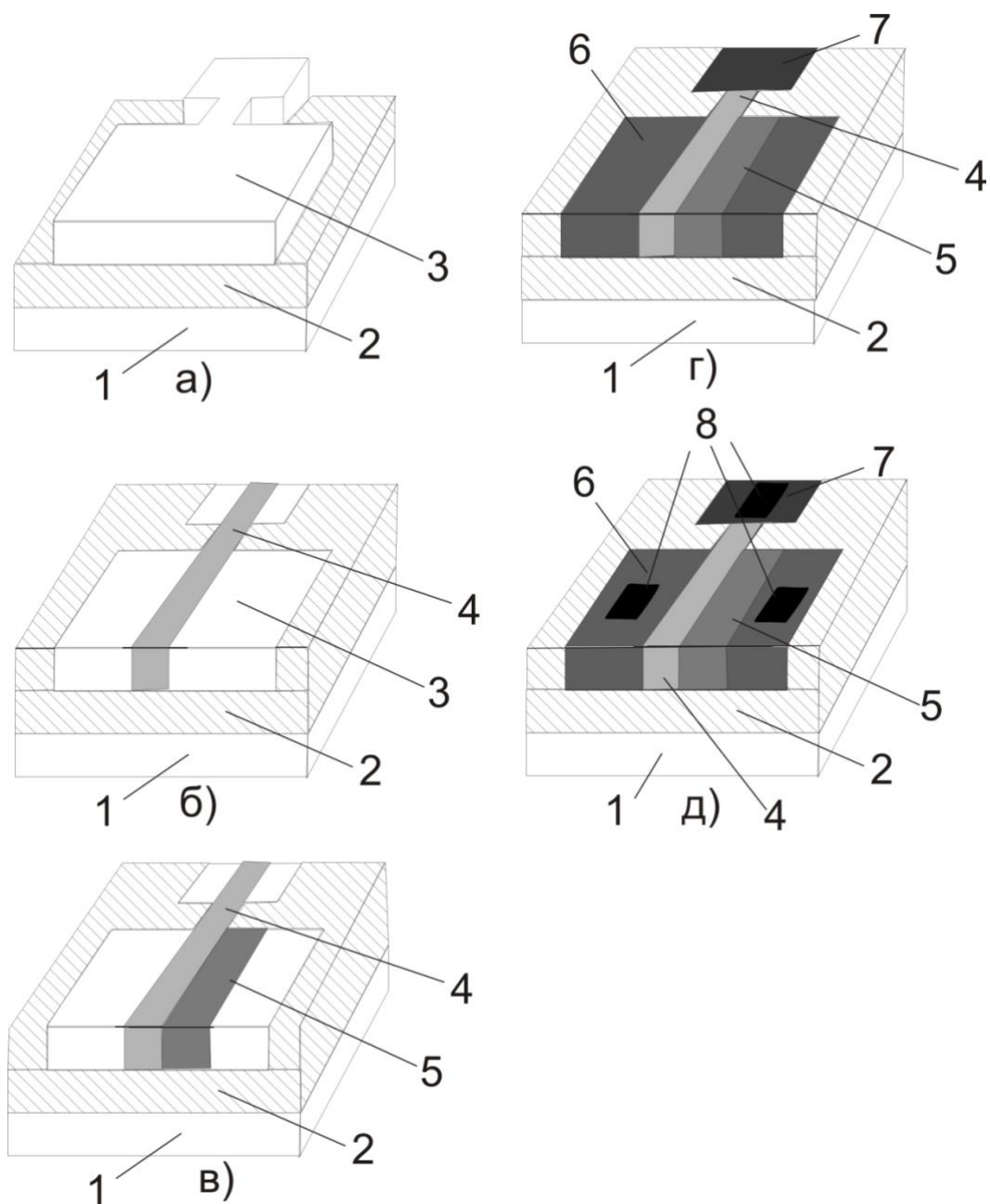


Рис. 4.3 – Схематическое изображение этапов изготовления БТ с боковым контактом к базе на КНИ: а) – формирование кремниевого островка; б) – формирование базы транзистора; в) – формирование слаболегированной области коллектора; г) – формирование областей эмиттера и сильнолегированного коллектора транзистора; д) – формирование контактов из силицида титана. 1 – кремниевый слой подложки; 2 – слой захороненного оксида кремния; 3 – сформированный кремниевый островок; 4 – легированная область базы; 5 – слаболегированная область коллектора; 6 – сильнолегированные области

эмиттера и коллектора; 7 – сильнолегированная область пассивной базы; 8 – силицидированные области

Слабелегированную область коллектора формируют посредством двойной имплантации ионами соответствующей примеси также по маске фоторезиста через буферный слой двуокиси кремния, на всю глубину эпитаксиального кремния (рис. 4.3 в). Далее после нанесения на поверхность структур пленки диэлектрика, формируют сильнолегированные области эмиттера, коллектора и пассивной базы (рис. 4.3 г) посредством ионной имплантации примеси по соответствующей фотокопии.

Дозы легирования определяются по результатам моделирования оптимальных для характеристик транзисторов концентраций примеси в активных областях структур: $N_{e,c(n+)}$, N_b , $N_{c(n-)}$. Для активации примеси и отжига радиационных дефектов используют быстрый термический отжиг в течение 30 секунд с нагревом поверхности кристаллов до температуры 1050 °С. Затем формируют силицидированные области эмиттера, коллектора и пассивной базы (рис. 4.3 д). Топологическая схема биполярного транзистора с периферийным контактом к базе приведена на рис. 4.4.

Далее после осаждения пленки диэлектрика и травления контактных окон к областям эмиттера, базы и коллектора, формируют металлизацию, при этом количество уровней металла определяется степенью сложности интегральной схемы. Близость конструкции и технологии изготовления латеральных биполярных и МОПТ может обеспечить успешную разработку электрических схем и проектирование совмещенной топологии БиКМОП интегральных схем. Уровни коллекторных токов БТ близки к плотности драйверных токов МОПТ, созданных по технологии с соответствующими проектными нормами.

В ходе работы были исследованы структуры оригинального и классического транзисторов посредством численного моделирования. Первая итерация расчетов характеристик транзисторов была проведена на двухмерных моделях транзисторов, то есть сечениях трехмерных структур транзисторов. На рис. 4.5 приведено распределение плотности тока в исследуемых транзисторах в

рабочем режиме (удельный ток на базе 10^{-7} А/мкм, напряжение на коллекторе 3,3 В, напряжение на эмиттере 0 В, см. рис. 4.6).

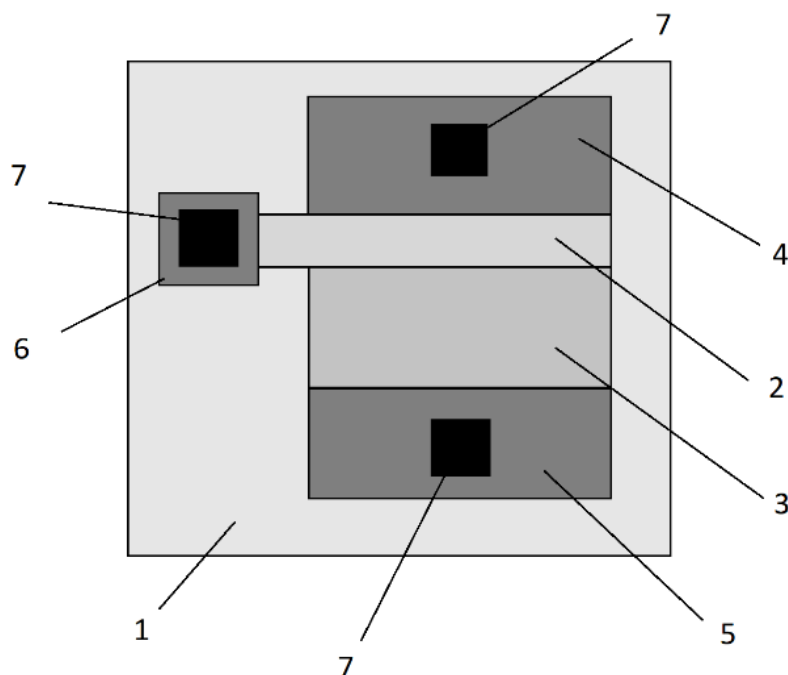


Рис. 4.4 – Топологическая схема биполярного транзистора с периферийным контактом к базе: 1 – диэлектрическая изоляция; 2 – область активной базы; 3 – область n⁻коллектора; 4 – область n⁺-эмиттера; 5 – n⁺-коллектор; 6 – пассивная база; 7 – области контактов

Из рис. 4.5 следует, что также причиной низкого коэффициента усиления по току в классическом БТ является влияние границы Si/SiO₂, что способствует увеличению ширины области обеднения. Для учета влияния эффектов, свойственных трехмерным структурам были исследованы трехмерные модели БТ.

Были получены характеристики БТ в схеме с общей базой. На рисунке 4.6 приведено схематическое изображение функциональной схемы БТ с общей базой.

На рис. 4.7 приведено изображение распределения плотности тока электронов и концентрации электронов в трехмерной модели оригинального транзистора. Из приведенных на рис. 4.7 б распределений тока следует, что

плотность тока принимает максимальное значение почти по всей ширине базы, что связано с оптимальным выбором ширины транзистора.

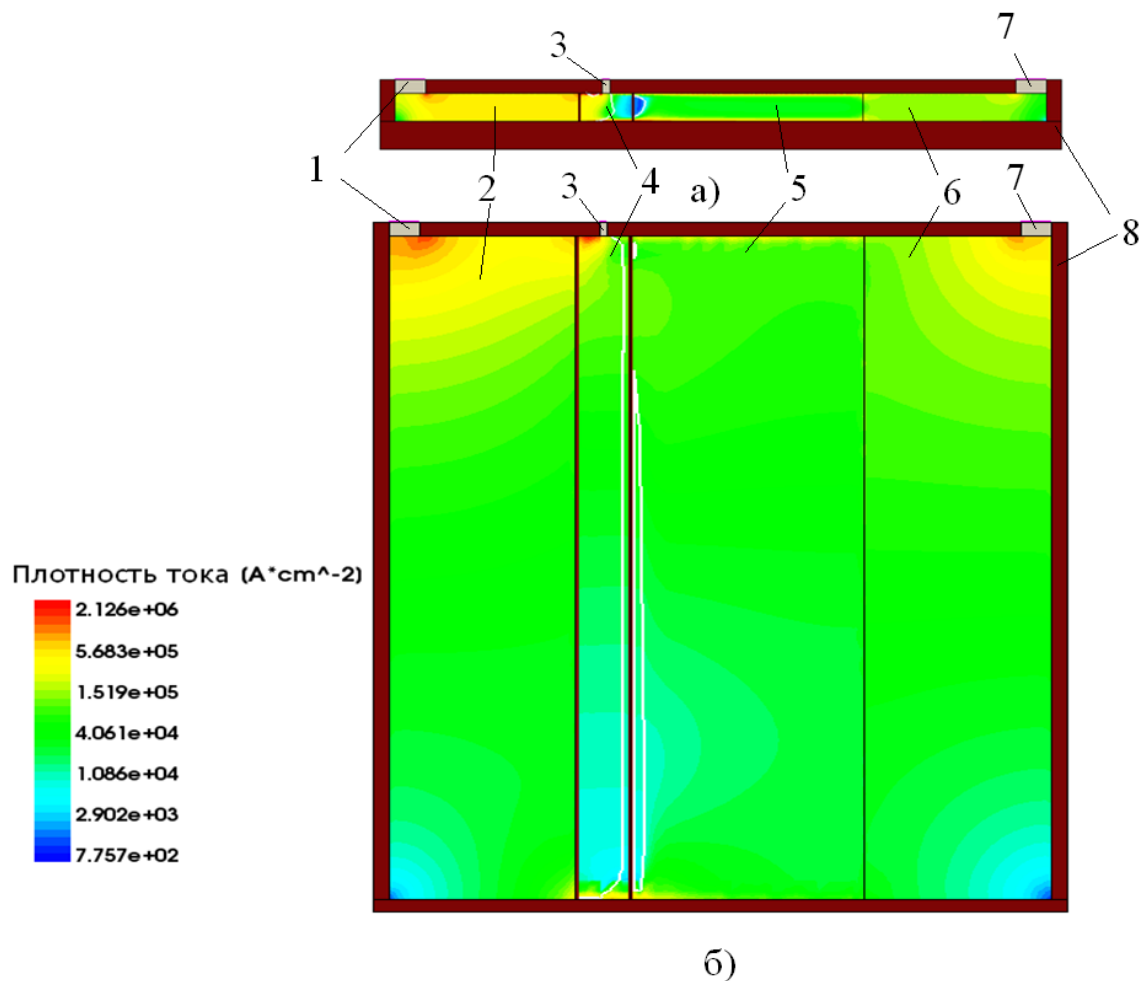


Рис. 4.5 – Распределение плотности тока, полученное при исследовании 2D структур БТ, где: а) высотой 0,2 мкм; б) высотой 5 мкм: 1 – силицидированный контакт к эмиттеру; 2 – область эмиттера; 3 – силицидированный контакт к базе; 4 – область базы; 5 – область слаболегированного коллектора; 6 – область сильнолегированного коллектора; 7 – силицидированный контакт к коллектору; 8 – слой оксида кремния

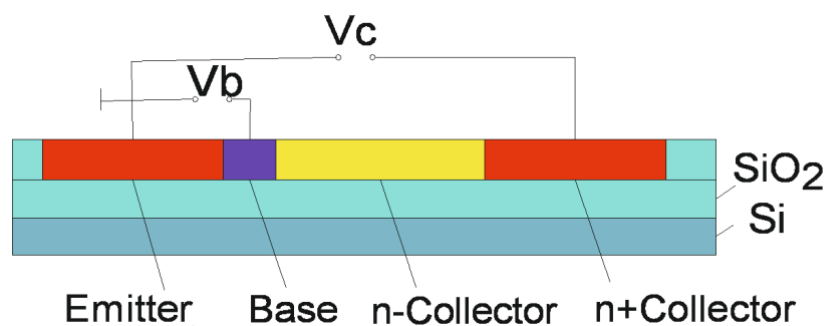


Рис. 4.6 – Функциональная схема включения БТ с общей базой

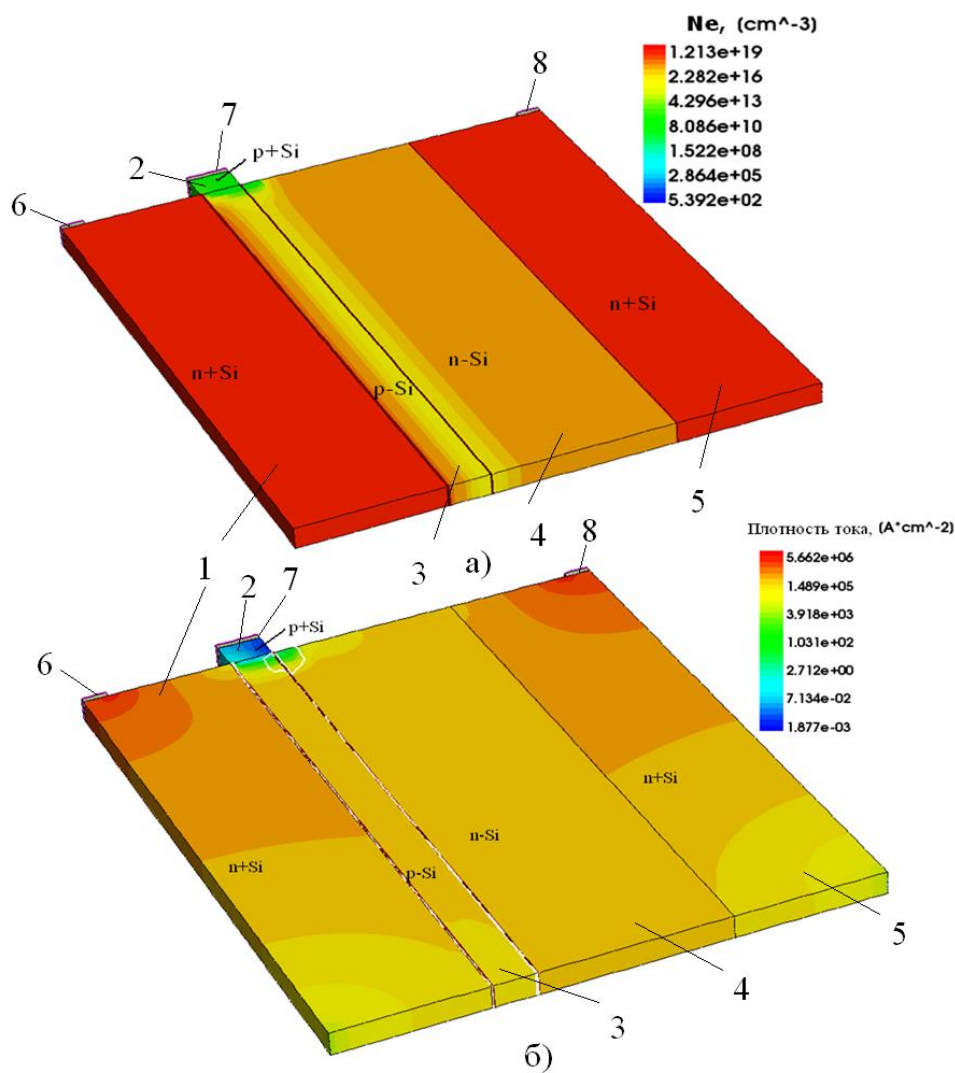


Рис. 4.7 – Характеристики в трехмерной модели оригинального транзистора, где: а) распределение концентрации электронов; б) распределение плотности тока: 1 – область эмиттера; 2 – область пассивной базы; 3 – область активной базы; 4 – область слаболегированного коллектора; 5 – область

сильнолегированного коллектора; 6 – силицидированный контакт к эмиттеру; 7 – силицидированный контакт к базе; 8 – силицидированный контакт к коллектору

4.3 Калибровка гамма-воздействия

Для калибровки гамма-воздействия были выбраны МОПТ с длиной затвора 100 нм, изготовленные на структуре КНИ.

4.3.1 Результаты численного моделирования

Посредством численного моделирования была разработана модель n-канального МОПТ с длиной затвора 100 нм и шириной 1 мкм, откалиброванная по экспериментально полученным следующим электрическим характеристикам изготовленного транзистора: пороговое напряжение, ток утечки «исток–сток», стационарная дрейфовая скорость электронов. На рис. 4.8 приведено рассчитанное распределение примеси в транзисторной структуре, где переходом от желтого до красного цвета показано распределение примеси доноров, а от голубого до синего – примеси акцепторов.

Как видно из рис. 4.8, эффективная длина канала в открытом состоянии транзистора равна 0,085 мкм. Так как особый интерес представляет область канала и подзатворного диэлектрика, приведенные далее распределения исследованных характеристик будут представлены для этих областей, при этом расчет проводился для полной структуры транзистора. На рис. 4.9 – 4.11 приведены распределения таких зависимостей, как дрейфовая скорость электронов, напряженность электрического поля, концентрация и энергия электронов в области канала МОПТ при напряжении на истоке (U_s) 0, стоке (U_d) 1,2 В, на затворе (U_g) 0,55 В.

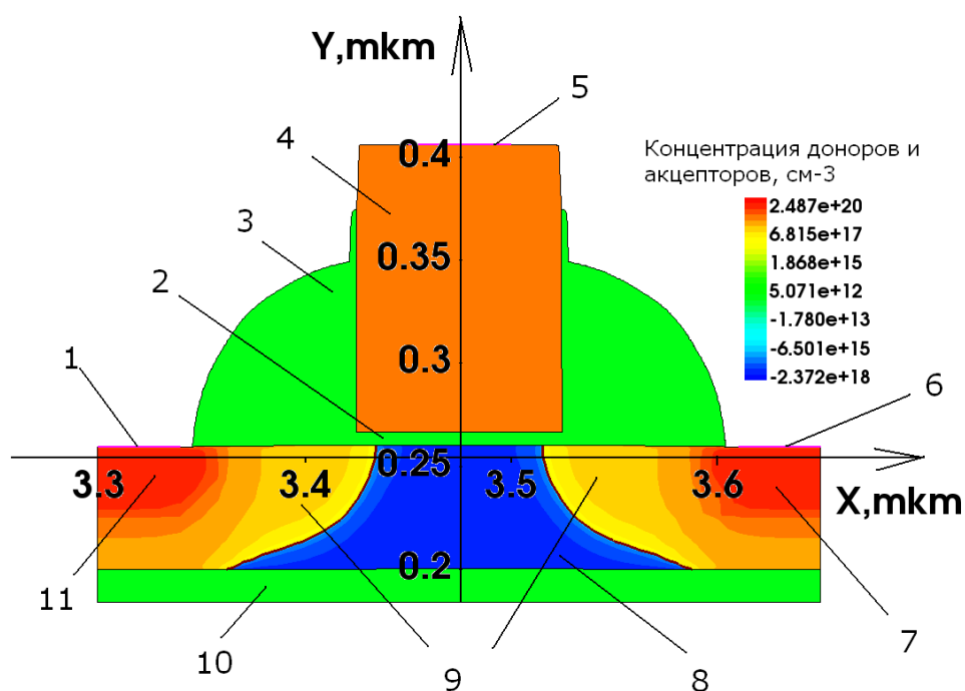


Рис. 4.8 – Двумерное распределение концентрации носителей зарядов, где красный и желтый цвет соответствует распределению концентрации доноров, голубой и синий соответствует распределению концентрации акцепторов: 1 – контакт к истоку транзистора; 2 – подзатворный диэлектрик; 3 – спейсеры; 4 – легированный поликремниевый затвор; 5 – силицидированный контакт к затвору; 6 – силицидированный контакт к стоку; 7 – сильнолегированная область стока; 8 – область кармана; 9 – слаболегированные области стока и истока; 10 – захороненный оксид структуры КНИ; 11 – сильнолегированный исток транзистора

Для оценки эффективной глубины канала у 2D-модели транзистора в открытом состоянии с помощью численного моделирования было получено распределение плотности тока в направлении параллельном оси Y (рис. 4.9). При расчете объемных характеристик посредством 2D численного моделирования третий (вдоль оси Z, рис. 4.11a) геометрический размер рассчитываемой структуры был принят равным 1 мкм.

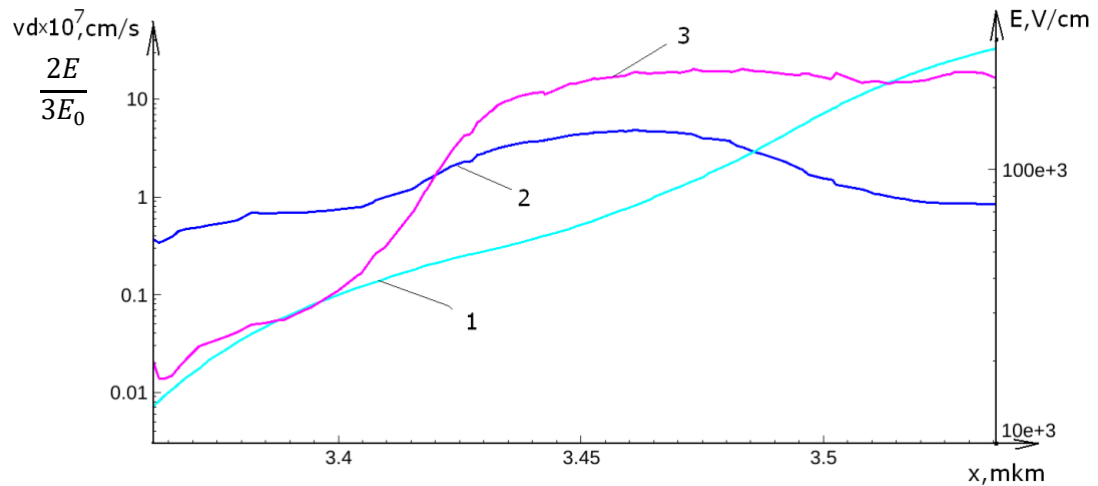
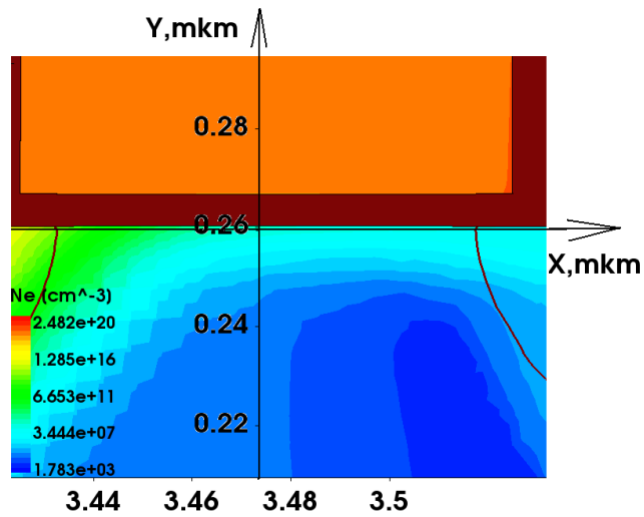
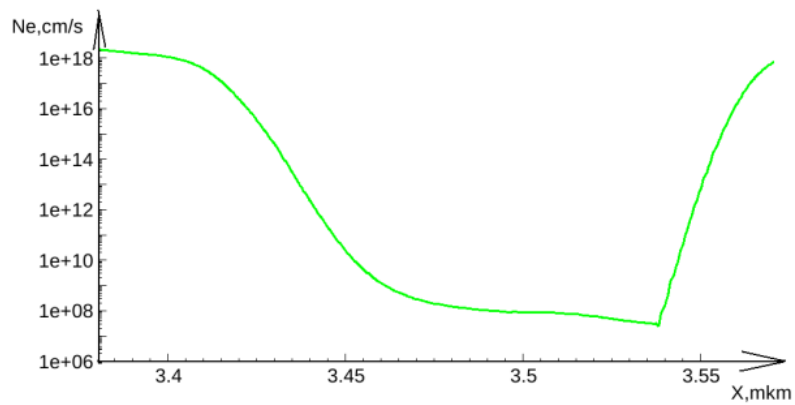


Рис. 4.9 – Распределения характеристик в канале исследуемого транзистора в сечении вдоль оси X при $Y = 0,25$ мкм, полученные при $U_s = 0$; $U_d = 1,2$ В; $U_g = 0,55$ В: 1 – распределение энергии электронов $\frac{2E}{3E_0}$ при $T=300$ К, $E_0 = \frac{3kT_0}{2}$; 2 – распределение дрейфовой скорости электронов; 3 – распределение напряженности электрического поля

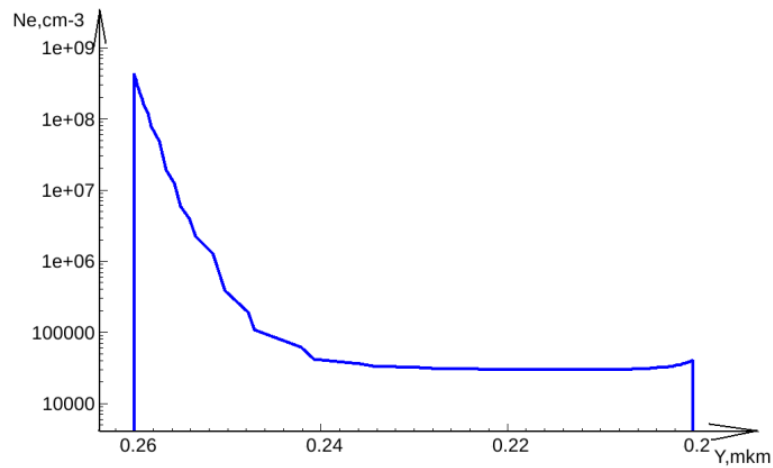
Как видно из рис. 4.9, на кривой 2 распределения дрейфовой скорости в области канала транзистора наблюдается увеличение скорости носителей заряда в начальный момент до $4,8 \cdot 10^7$ см/с. Это результат эффекта «всплеска» скорости носителей заряда.



а)

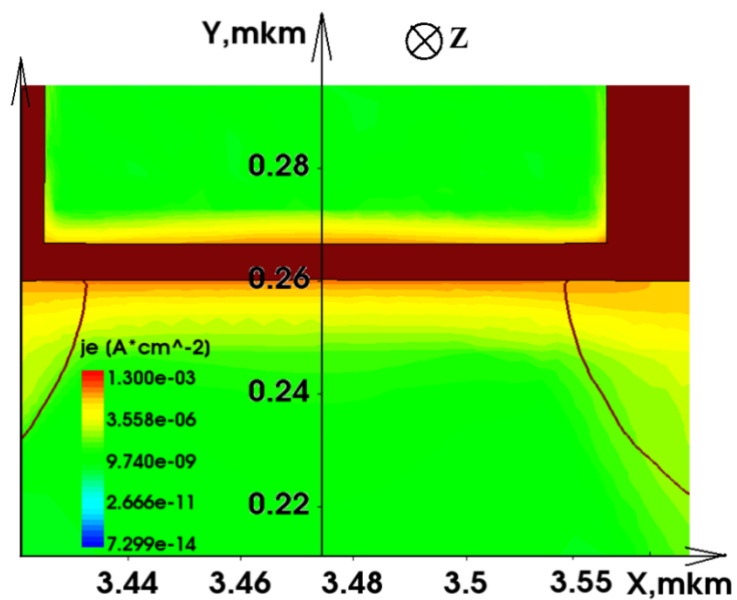


б)

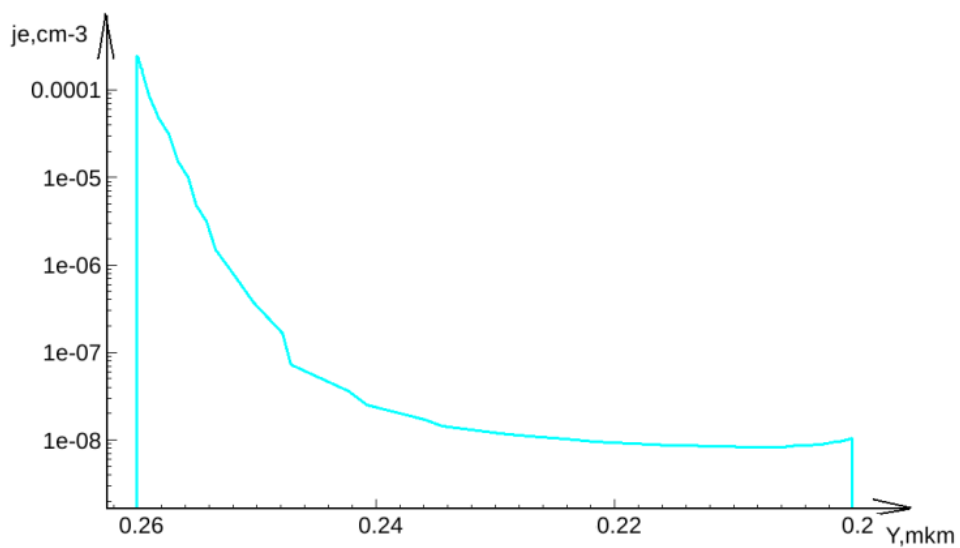


в)

Рис. 4.10 – Распределение концентрации электронов p-канального транзистора: а) в сечении области канала транзистора; б) в сечении вдоль оси X структуры рис. 4.3.1.3 а; в) в сечении вдоль оси Y структуры рис. 4.3.1.3а



a)



б)

Рис. 4.11 – Распределение плотности тока электронов n-канального транзистора: а) в сечении области канала транзистора; б) в сечении вдоль оси Y структуры рис. 4.3.1.4а

Средней дрейфовой скоростью по ансамблю в канале транзистора будем считать скорость, которая меньше максимальной в два раза. Таким образом, средняя скорость по ансамблю в канале (рис. 4.9), полученная посредством численного моделирования, соответствует значению средней дрейфовой скорости по ансамблю, рассчитанной аналитически с использованием экспериментально полученных данных с учетом коррекции концентрации носителей в канале. Это подтверждает соответствие разработанной математической модели транзистора параметрам изготовленного образца.

В транзисторах на основе КНИ структур считается, что каналом является область от подзатворного диэлектрика до захороненного оксида [120]. Эффективной глубиной ($d_{эфф}$) канала будем называть глубину канала до значения, где плотность тока носителей заряда уменьшается в 2 раза. В данном случае она равна 3 нм. В табл. 4.1 приведены результаты расчета времени релаксации импульса и энергии посредством численного моделирования, где E – напряженность электрического поля вблизи подзатворного диэлектрика (рис. 4.9), μ_{max} – максимальное значение подвижности электронов в канале, N_{max} – максимальное значение концентрации электронов в канале транзистора (рис. 4.10), $d_{эфф}$ – эффективная глубина канала транзистора (рис. 4.11).

Табл. 4.1 – Характеристики исследуемого транзистора, рассчитанные посредством численного моделирования

$U_g, В$	$E, В/см$	$\mu_{max}, см^2/Вс$	$\bar{E} - E, эВ$	$\tau_p, с$	$\tau_E, с$	$N_{max}, см^{-3}$	$d_{эфф}, мкм$
0,55	$2,6 \cdot 10^5$	220	0,25	$5 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{18}$	0,003

4.3.2 Верификация приборных моделей по экспериментально полученным характеристикам КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм

На рис. 4.12 и 4.13 приведены температурные зависимости порогового напряжения и тока утечки транзисторов с разным типом проводимости и разной ширины. Экстракция характеристик проводилась из выходных и входных характеристик, измеренных экспериментально у изготовленных МОПТ.

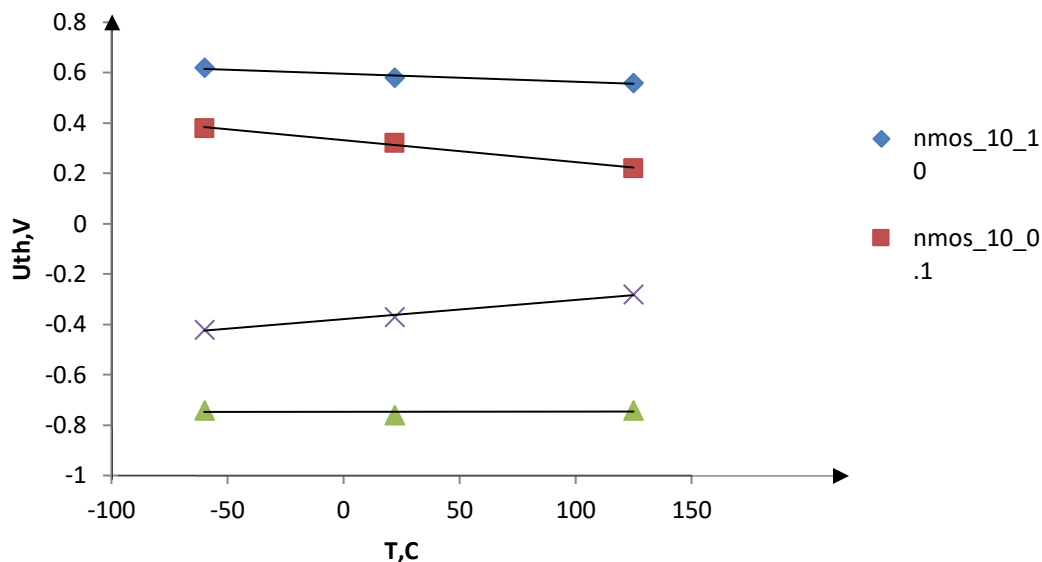


Рис. 4.12 – Зависимость порогового напряжения от температуры n-канального и p-канального транзистора при напряжении на стоке $U_d = 0,05$ В

Пороговое напряжение транзисторов с длиной канала 0,1 мкм ниже, чем у транзисторов с длиной канала 10 мкм (рис. 4.12). Это объясняется увеличением напряженности электрического поля с уменьшением длины канала, что является одним из причин проявлений короткоканальных эффектов у транзисторов с малой длиной канала. Увеличение температуры транзистора приводило к уменьшению порогового напряжения, что соответствует увеличению энергии основных носителей заряда.

На рис. 4.14 приведено одно из семейств выходных характеристик n-канального транзистора с длиной затвора 100 нм, полученное экспериментально у изготовленных ТС.

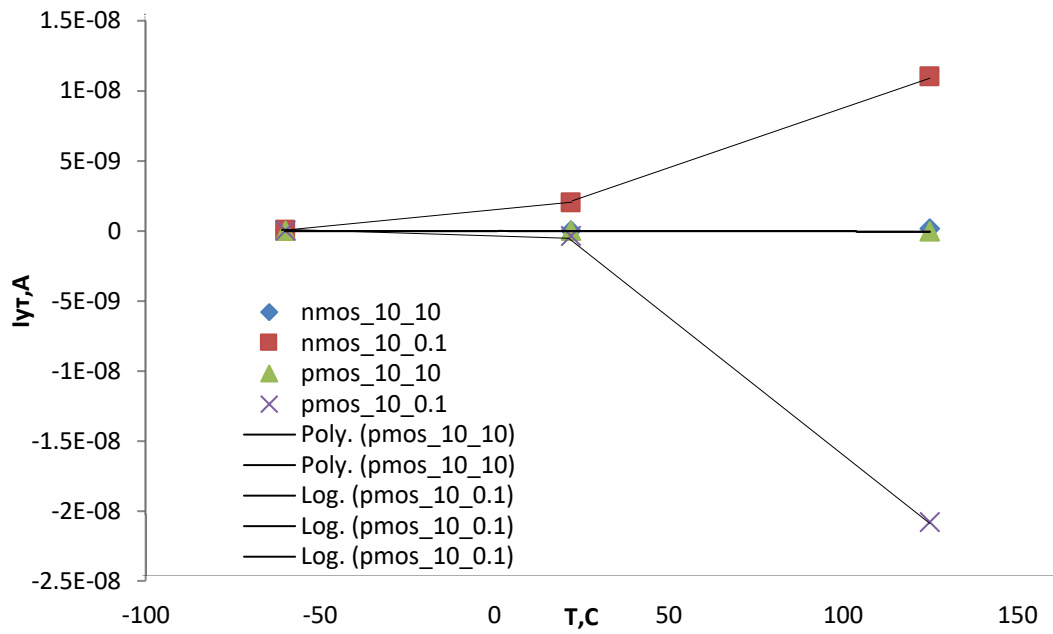


Рис. 4.13 – Зависимость тока утечки канала от температуры n-канального и p-канального транзисторов

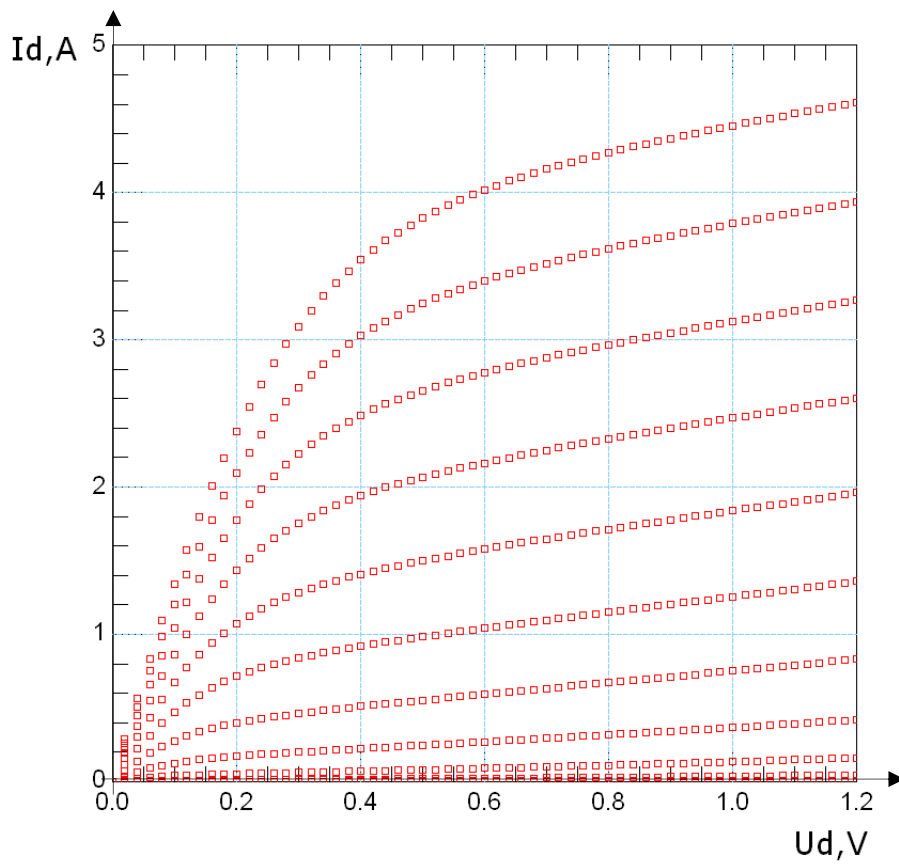


Рис. 4.13 – Семейство выходных характеристик n-канального МОПТ с длиной канала 100 нм. На затвор подавалось напряжение от 0 до 1,2 В с шагом 0,1 В

Так как на выходных характеристиках n-канального транзистора с длиной затвора 100 нм область насыщения имеет малый угол наклона относительно горизонтали, но не переходит в вертикальную кривую, то можно сделать вывод, что ударной ионизации не наблюдалось. Следовательно, происходила незначительная зарядка подзатворного оксида горячими носителями (или не происходила совсем).

Повышение температуры приводило к увеличению тока утечки транзисторов с длиной затвора 100 нм. Это объясняется короткоканальным эффектом. Характерно, что по сравнению с транзисторами с длиной затвора 100 нм, у транзисторов с длиной затвора 10 мкм ток утечки при изменении температуры меняется незначительно.

Таким образом, токи утечки транзисторов с длиной затвора 100 нм выше, чем у транзисторов аналогичного типа, но с длиной затвора 10 мкм. Данное явление связано с увеличением напряженности электрического поля при уменьшении длины канала транзистора [121].

4.4 Исследование влияния гамма-воздействия на токи утечки «исток-сток» КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм

На рис. 4.15 приведены экспериментально полученные зависимости значений плотности тока утечки МОПТ с длиной затвора 100 нм с разным типом проводимости и разной шириной транзистора: 0,26 мкм и 10 мкм.

В n-канальных транзисторах (карман легирован примесью p-типа) без гамма-воздействия плотность тока утечки больше, чем в p-канальных, что связано с бóльшим значением подвижности электронов, чем дырок. Транзисторы, шириной 10 мкм обладают большей плотностью тока до гамма-облучения, чем транзисторы, шириной 0,26 мкм, что связано с влиянием узкоканального эффекта [65].

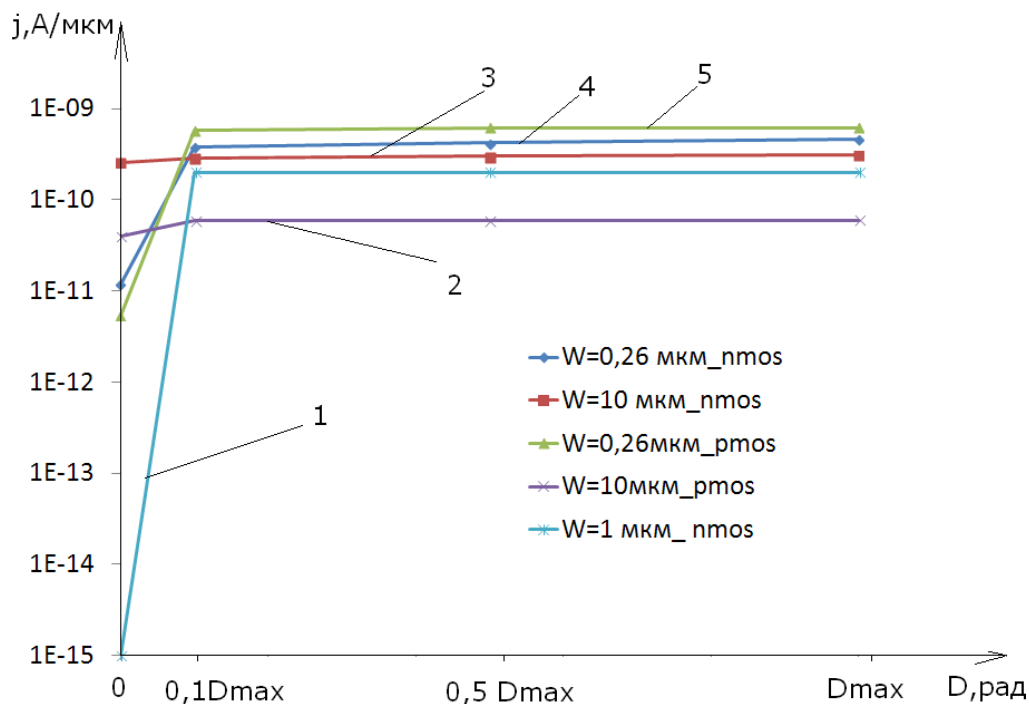


Рис. 4.15 – Зависимость плотности тока утечки «исток-сток» МОПТ с длиной затвора 100 нм и разной шириной от дозы гамма-облучения: 1 – результат численного моделирования n-well транзистора шириной 1 мкм; 2 – ширина транзистора p-well 10 мкм; 3 – ширина транзистора n-well 10 мкм; 4 – ширина транзистора n-well 0,26 мкм; 5 – ширина транзистора p-well 0,26 мкм. Зависимости 2-5 получены экспериментально

При гамма-облучении в оксиде кремния накапливаются положительные заряды. При этом, транзистор окружен оксидом кремния: снизу – захороненный оксид кремния, сбоку – щелевая изоляция, представляющая собой слой оксида кремния. Поэтому, на канал транзистора будут действовать не только заряды, образовавшиеся в подзатворном диэлектрике, но и в щелевой изоляции (сбоку) и захороненном оксиде (снизу). В узком транзисторе влияние боковых зарядов более заметно, чем в широких транзисторах. Поэтому, в исследуемых транзисторах n-типа, шириной 10 мкм плотность тока при гамма-облучении показывало максимальное значение (рис. 4.15).

При облучении р-канального транзистора плотность тока широкого транзистора меньше плотности тока узкого транзистора. Это связано с геометрическими размерами канала. Увеличение дозы облучения приводило к незначительному увеличению тока утечки, что свидетельствует о малой концентрации дефектов в переходном слое оксида кремния и о высоком качестве подзатворного оксида кремния. Таким образом, при дозе, равной $0,1 D_{\max}$, все дефекты оказываются положительно заряженными в результате гамма-воздействия. Это было подтверждено посредством численного моделирования. При облучении транзистора D_{\max} в подзатворном диэлектрике образовались положительные заряды с концентрацией 10^{12} см^{-2} . В захороненном оксиде кремния образовались положительные заряды с такой концентрацией от границы с приборным слоем кремния до глубины оксида порядка $0,1 \text{ мкм}$.

Время облучения транзистора, находящегося в рабочем состоянии, составляло 20 секунд. Наличие насыщения описываемой кривой физической величины – плотности тока (рис. 4.15) свидетельствует о том, что этого времени достаточно, чтобы произошел заряд всех имеющихся в подзатворном оксиде транзистора дефектных центров. Таким образом, увеличение времени облучения не приводит к существенному увеличению тока утечки транзистора.

Согласно формуле (2.13), наводимый потенциал подзатворного диэлектрика в транзисторе с шириной канала $0,26 \text{ мкм}$ примерно больше в 40 раз наводимого потенциала, создаваемого в аналогичном транзисторе с шириной канала 10 мкм . С помощью численного моделирования были рассчитаны параметры транзистора с длиной канала 100 нм , шириной канала 1 мкм . Согласно полученной структуре, в таком транзисторе длина паразитного канала составила $0,234 \text{ мкм}$. Согласно формуле 2.13, наводимый потенциал захороненного оксида, образованный вследствие гамма-облучения, в 10 раз больше наводимого потенциала подзатворного оксида кремния транзистора. Это справедливо при условии, что толщина переходного слоя оксида (дефектного) составляет не более 50 нм . Без гамма-воздействия для моделирования и расчета параметров транзистора оксид кремния принимался (считался) бездефектным.

При моделировании гамма-воздействия в переходном слое оксида кремния задавалась концентрация дефектов 10^{12} см^{-2} , соответствующая оксиду, полученному методом термического окисления в сухом кислороде [122]. Полученный профиль распределения положительных зарядов в оксиде кремния показал полное заполнение имеющихся дефектов уже при дозе $0,1 D_{\text{max}}$.

В работе [123] зависимость тока утечки от дозы гамма-облучения тоже выходит на насыщение, но при больших значениях дозы. Это связано с тем, что в работе [124] исследуются характеристики транзисторов с большим значением длины затвора (в $6 \div 12$ раз). В технологии изготовления ИС с проектными нормами $0,6 \div 1,2 \text{ мкм}$ используется подзатворный диэлектрик толщиной $\sim 20 \div 30 \text{ нм}$, это значение значительно меньше толщины переходного слоя термического оксида ($50 \div 70 \text{ нм}$), тем самым увеличивая количество дефектов в оксиде кремния и значение дозы облучения, при котором все эти центры будут заняты положительными зарядами.

Посредством численного моделирования было показано, что даже при максимальной дозе облучения n-канального транзистора, паразитный транзистор (транзистор, канал которого образуется вблизи захороненного оксида кремния) закрыт при напряжении на стоке $1,2 \text{ В}$.

4.5 Ток утечки через подзатворный диэлектрик в КНИ МОПТ с длиной канала до 100 нм

4.5.1 Экспериментально полученные результаты без учета гамма-воздействия

В табл. 4.2 приведены экспериментально полученные значения тока утечки через подзатворный диэлектрик для изготовленных МОПТ с разным геометрическим соотношением W/L (W – ширина и L – длина канала транзистора).

Табл. 4.2 – Значения тока утечки через подзатворный диэлектрик в зависимости от длины канала и температуры. W – ширина, L – длина канала транзистора

Тип транзистора	Ток утечки через подзатворный диэлектрик, нА			
	n-канальный транзистор		p-канальный транзистор	
W/L	10/10	10/0,1	10/10	10/0,1
Температура, °C				
+125	80,3	85,2	15,7	20,99
+85	70	74	15	20
-20	50	61	13	10,9
-60	47	51	8,5	10,23

Ток утечки n-канальных транзисторов в 4-5 раз превосходил ток p-канальных транзисторов вследствие отличия толщины подзатворного диэлектрика, обусловленной разницей скорости роста оксида кремния, легированном разным типом примеси [64], а также вследствие разницы длин волн де Бройля и масс электронов и дырок. При увеличении температуры с 173 до 373 К плотность тока, согласно формуле (1.4), должна увеличиться в 4 раза. Экспериментально полученные значения показывали увеличение в 2 раза. Для анализа данного результата было проведено численное моделирование транзисторной структуры, аналогичной изготовленной.

При приложении напряжения на затвор транзистора трапециевидная энергетическая зонная диаграмма диэлектрика может принять вид треугольный. В этом случае, туннельный ток, текущий через такой треугольный энергетический барьер, обусловлен, в основном, механизмом Фаулера-Нордгейма.

В [66] авторами показано, что в транзисторных структурах при приложении напряжения до 3,5 В на затвор транзистора и при толщине подзатворного диэлектрика менее 4,7 нм доминирующую роль играет прямое туннелирование, а туннелирование по Фаулеру-Нордгейму носит второстепенный характер и вклад его незначителен. Автором [124] показано, что в МОПТ с толщиной подзатворного диэлектрика менее 3 нм при напряженности

электрического поля 8 МВ/см, ток Фаулера-Нордгейма составляет $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ А/см². Поэтому далее этот ток не учитывался.

Для расчета тока утечки через подзатворный диэлектрик, определяемого механизмом полевого туннелирования и термоэлектронной эмиссии носителей заряда использовалась модель Шенка. Данная модель используется для оксидов, тоньше 3 нм и полей выше 6 МВ/см. Такая модель учитывает квантовомеханическое туннелирование через трапециевидный барьер и учитывает прямое туннелирование. Также эта модель учитывает уменьшение туннельного барьера вследствие создания зеркального заряда.

Увеличение температуры сказывается только на эмиссии Шоттки (термоэлектронной эмиссии). Для определения вклада полевого туннелирования носителей заряда через подзатворный диэлектрик в ток утечки затвора при численном моделировании не учитывался разогрев электронов (увеличение температуры), а учитывалось только увеличение скорости электронов вследствие влияния электрического поля.

Для численного расчета эмиссии Пула-Френкеля на границе раздела Si/SiO₂ были размещены дефекты с концентрацией 10^{17} см⁻³ (для учета гамма-воздействия). Введение дефектов на границу раздела оксид кремния/ кремний дефектов концентрацией 10^{17} см⁻³ приводило к изменению энергетического барьера на этой границе и уровня Ферми.

При гамма-облучении в оксиде кремния образуются свободные электроны и положительно заряженные ионы. В результате влияния электрического поля быстрые электроны утекают, тяжелые ионы также диффундируют, но более медленно. При передвижении положительно заряженные ионы могут быть захвачены существующими дефектами в оксиде кремния, образованными вследствие разницы постоянных решеток кремния и оксида кремния. Таким образом, при гамма-облучении происходит накопление положительного заряда в оксиде кремния вблизи границы Si/SiO₂.

4.5.2 Результаты, полученные посредством численного моделирования без учета гамма-воздействия

Увеличение температуры приводит к увеличению тока утечки через диэлектрик только благодаря механизму термоэлектронной эмиссии [65, 125]. Дефектность подзатворного диэлектрика приводит к появлению утечки тока, определяемого механизмом Пула-Френкеля. Для появления полевого туннелирования носителей заряда, необходимы достаточные значения скорости носителей заряда, напряженности электрического поля и толщины диэлектрика.

В работе [122] авторы исследовали туннелирование носителей заряда в МОПТ с толщиной диэлектрика 20 Å. Приведена зонная диаграмма, где напряжение подавалось не только на затвор, но и на исток транзистора. При напряжении затвор-исток, превышающем пороговое напряжение, валентная зона кремниевого кармана структуры выше зоны проводимости затвора, что приводило к туннелированию электронов через тонкий подзатворный диэлектрик. Аналогичное явление происходило и в рабочем режиме исследуемых транзисторов.

Для определения вклада туннельной составляющей в ток утечки через диэлектрик были получены распределение поля (рис. 4.16), плотности тока (рис. 4.17) и дрейфовой скорости (рис. 4.18) в подзатворном диэлектрике и канале транзистора, перпендикулярные границе раздела Si/SiO₂ при $U_s=0$ В, $U_g=0,55$ В, $U_d=1,2$ В.

Из рис.4.16 следует, что максимальная напряженность электрического поля вдоль оси Oу наблюдается в подзатворном диэлектрике и достигает $1,59 \cdot 10^6$ В/см, чего достаточно для туннелирования сквозь узкие потенциальные барьеры на границе с диэлектриком [122]. Для определения области утечки тока из канала в поликремниевый затвор, посредством численного моделирования с использованием модели Шенка было рассчитано распределение плотности тока в 2D сечении исследуемого транзистора, направленного вдоль оси OY (рис. 4.17).

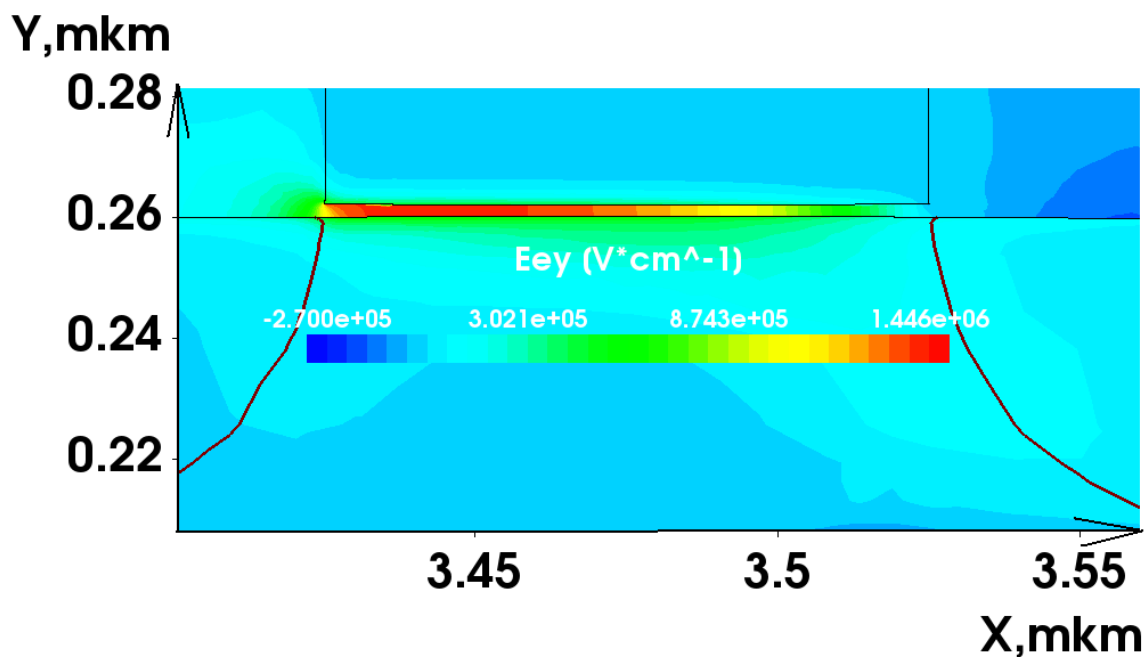


Рис. 4.16 – Распределение напряженности электрического поля, сонаправленной с осью OY, в области канала транзистора при $U_s = 0$ В, $U_g = 0,55$ В, $U_d = 1,2$ В

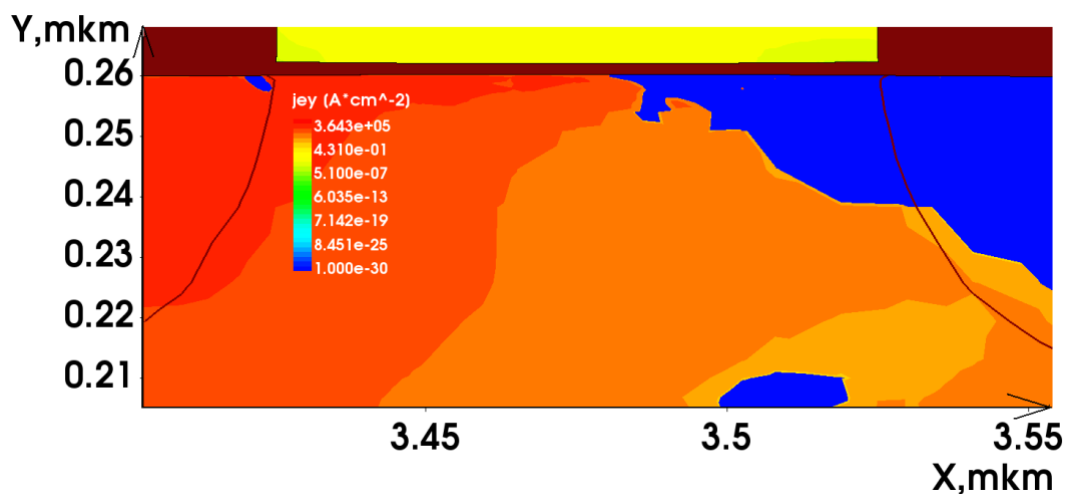


Рис. 4.17 – Распределение плотности тока электронов p-канального транзистора, сонаправленного с осью OY, при $U_s = 0$, $U_d = 0,05$ В, $U_g = 1,2$ В

Таким образом, ток утечки через подзатворный диэлектрик (в затворе) течет неравномерно с явным максимум в центре затвора, вследствие увеличения толщины подзатворного диэлектрика вблизи истока и стока, связанное с повторением операций окисления в маршруте изготовления транзистора после

формирования подзатворного оксида. Плотность тока в затворе вблизи с границей с подзатворном диэлектриком, составляет $0,4 \text{ А/см}^2$. Для определения длины волны электронов, было получено распределение дрейфовой скорости электронов в транзисторной структуре, сонаправленной с осью ОУ (на рис. 4.18 приведена область канала) при $U_s = 0$, $U_d = 0,05 \text{ В}$, $U_g = 1,2 \text{ В}$.

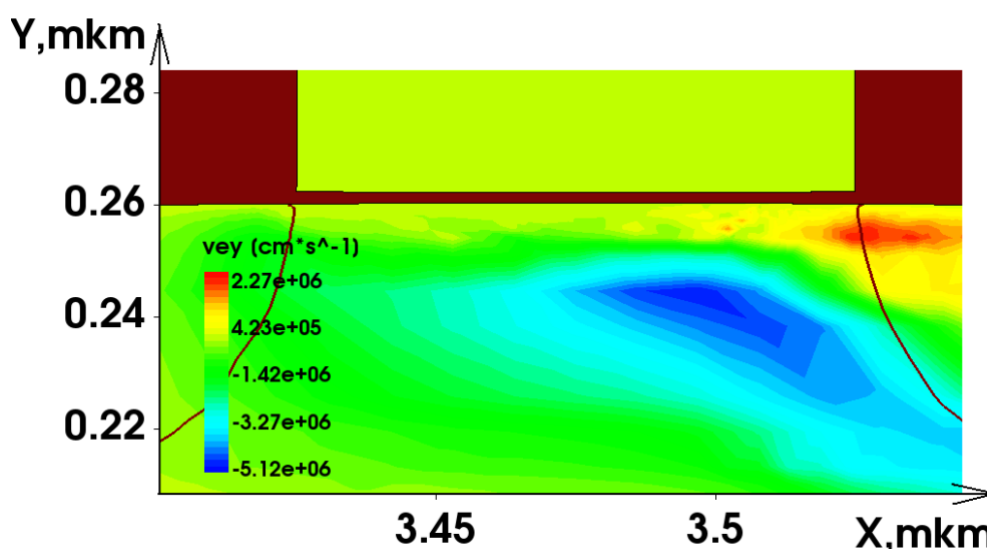


Рис. 4.18 – Распределение скорости электронов, сонаправленной с осью ОУ, в области канала транзистора при $U_s = 0 \text{ В}$, $U_g = 0,55 \text{ В}$, $U_d = 1,2 \text{ В}$

Так как вся кинетическая энергия электрона перешла в энергию туннелирования, то при скорости электрона $2 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, движущегося вдоль оси Оу, длина волны составляет 36 нм. Таким образом, полученная длина волны электрона в области с максимальным значением дрейфовой скорости, превосходит толщину подзатворного диэлектрика. Поэтому часть электронов из области канала попадают в затвор посредством прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик. Что подтверждается авторами [66]. Прямое туннелирование является одним из механизмов переноса носителей заряда присутствующих в транзисторных структурах с толщиной диэлектрика 18 \AA . Для определения вклада эмиссии Пула-Френкеля провели исследования характеристик транзисторов при гамма-облучении.

4.5.3 Влияние гамма-воздействия на характеристики КНИ МОПТ

Экспериментально полученные результаты гамма-воздействия на ток утечки исследуемых транзисторов приведены в табл. 4.3

Табл. 4.3 – Значения тока утечки через подзатворный диэлектрик при разных значениях дозы гамма-облучения

Доза гамма-облучения	Ток утечки, А							
	n-канальный				р-канальный			
	W=0.26 L=0.1	W=0.26 L=10	W= 10 L=0.1	W=10 L=10	W=0.26 L=0.24	W=0.26 L=10	W=10 L=0.1	W=10 L=10
D = 0	5,2e-9	5,4e-9	53,6e-9	50e-9	-0,73e-9	-0,75e-9	-9,2e-9	-8,7e-9
D = 0,1 D _{max}	5,4e-9	5,5e-9	53,7e-9	50,5e-9	-0,9e-9	-0,92e-9	-9,4e-9	-8,9 e-9
D = 0,5 D _{max}	5,4e-9	5,54e-9	53,7e-9	50,5e-9	-0,9e-9	-0,92e-9	-9,4e-9	-8,9e-9
D = D _{max}	5,3e-9	5,51e-9	53,7e-9	50,5e-9	-0,91e-9	-0,93 e-9	-9,4 e-9	-8,9 e-9

Увеличение ширины транзистора в 50 раз приводит к уменьшению плотности тока через затвор в 3,7 раз. Что свидетельствует о том, что туннелирование носителей заряда носит локальный характер. Увеличение дозы гамма- облучения приведет к увеличению концентрации положительных зарядов, захваченных на дефектах в оксиде кремния. В исследуемой транзисторной структуре подзатворный слой оксида кремния был образован методом термического окисления в диффузионной печи. Этот метод окисления обеспечивает минимальное значение дефектности получаемого слоя [79], что минимизирует концентрацию дефектов в оксиде. При определенном значении дозы облучения все дефектные уровни заняты положительными зарядами и дальнейшее увеличение дозы облучения не приводит к изменению характеристик транзистора.

Положительные заряды, образованные вследствие гамма-облучения и захваченные на дефектах оксида кремния приводят к уменьшению потенциального барьера кармана транзистора. Согласно формуле (6), описывающей туннельную эмиссию, уменьшение потенциального барьера приведет к экспоненциальному росту плотности тока носителей заряда.

Описанные выше факторы привели к ограничению (выходу на насыщение) туннельного тока через подзатворный диэлектрик. Знак тока показывает на его направление, например, для n-канального транзистора положительные значения тока указывает, что электроны туннелируют из валентной зоны кармана транзистора в его затвор.

Такое поведение, с одной стороны, связано с наличием дефектных (донорных) уровней в запрещенной зоне диэлектрика, с другой стороны, влиянием положительных зарядов на изгиб энергетических зон вблизи его границ. При положительном напряжении на затворе заряды при гамма-облучении образовывались вблизи границы Si/SiO₂ и наблюдался сдвиг напряжения плоских зон в сторону отрицательных напряжений, при отрицательном – вблизи границы поликремний/SiO₂ [75]. Вследствие этого n-канальные транзисторы менее чувствительны к туннельным утечкам через подзатворный диэлектрик, чем p-канальные транзисторы. Например, для транзистора шириной канала 10 мкм и длиной канала 0,1 мкм характерны следующие значения тока утечки без гамма-воздействия: для n-канального – 53,6 нА, для p-канального – 9,2 нА (табл. 4.3).

Результат гамма-облучения – образование дефектных уровней в запрещенной зоне оксида кремния. Рост тока утечки через подзатворный диэлектрик при облучении связан с эмиссией Пула-Френкеля [65, 126, 127]. Увеличение дозы облучения исследуемых транзисторов привело к незначительному увеличению тока утечки через подзатворный диэлектрик (табл. 4.3) вне зависимости от длины и ширины канала транзистора. Таким образом, плотность тока Пула-Френкеля равна 0,01 А/см², то есть значительно меньше туннельного тока, полученного численным моделированием. Результатом численного моделирования стала плотность тока утечки через подзатворный диэлектрик, определяемая эмиссией Пула-Френкеля, равная 3·10⁻⁵ А/см².

Так как ток, экспериментально получаемый при нагревании, – результат суперпозиции двух механизмов переноса: туннельного и автоэлектронной

эмиссии (так как ток Пула-Френкеля пренебрежимо мал), при учете степенной зависимости (формула 1.4) для n-канального транзистора с $W/L=10/0,1$ получаем, что вклад туннельного тока составляет 40,4 нА или плотность тока 4 А/см^2 . Также аналитические модели не учитывают, что при увеличении температуры электроны из кармана могут перейти на акцепторный уровень в оксиде кремния и там задержаться, если энергии недостаточно для дальнейшего туннелирования в затвор. Приложенное положительное напряжение не будет давать вернуться электронам в карман транзистора. Таким образом, накопленные на ловушках электроны приведут к уменьшению потенциального барьера в кармане транзистора. В табл. 4.4 приведены теоретические [127-130], экспериментальные и расчетные данные тока утечек, обусловленные разными механизмами формирования тока в МОПТ.

Табл. 4.4 – Значения плотности тока утечки в зависимости от механизма переноса носителей заряда и способа получения [79, 129]

Механизм эмиссии	Теоретические данные, А/см^2	Экспериментальные данные, А/см^2	Расчетные данные, А/см^2
Термоэлектронная	-	1	0,001
Туннельная	3	4,12	0,4
Пула-Френкеля	$<10^{-6}$	0,01	0,00003

Теоретические данные приведены для транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика более 24 \AA , что превосходит толщину оксида исследуемых нами транзисторов. Экспериментальные данные были получены для МОПТ с подзатворным диэлектриком толщиной 18 \AA , шириной транзистора 10 мкм , длиной канала $0,1 \text{ мкм}$. Эти значения учитывают полный спектр эффектов, присущих реальным структурам, включающий дефектность оксида кремния, границ и самих кремниевых и поликремниевых слоев, неравномерность подзатворного диэлектрика и т.д. Таким образом, полученные посредством численного моделирования значения далеки от значений,

полученных экспериментально, вследствие отсутствия учета всех видов зарядов и явлений, характерных для МОПТ.

Максимальное значение плотности тока утечки, определяемое механизмом термоэлектронной эмиссии, указывает на дефектность структуры и недостаточно широкую запрещенную зону диэлектрика. Для решения данной проблемы в подобных исследуемых структурах рекомендуется использовать диэлектрики с более широкой запрещенной зоной, например Si_3N_4 , Al_2O_3 и др.

Таким образом, были исследованы экспериментально и посредством численного моделирования МОПТ с минимальной проектной нормой 100 нм, определено влияние геометрии транзистора на их характеристики. Показано, что основным механизмом переноса носителей заряда через подзатворный диэлектрик является прямое туннелирование. Была проведена калибровка гамма-воздействия и моделей туннелирования.

4.6 Характеристики биполярного транзистора

Для БТ с боковой геометрией контакта сопротивление активной базы зависит от ее ширины. По величине тока коллектора и коэффициента передачи тока базы, был определен оптимальный размер области активной базы. В соответствии с результатами моделирования взаимосвязанных эффектов обеднения области базы при приложении напряжения на ее контакт и изменения сопротивления этой базы была определена оптимальная ширина базы без учета и с учетом воздействия ионизирующего излучения. В табл. 4.5 представлены результаты моделирования в 2D приближении характеристик n-p-n БТ с различной шириной базы при напряжении на базе $U_b=0,7$ В и напряжении на коллекторе $U_c=3,3$ В, до и после воздействия ионизирующего гамма излучения при наведенной плотности поверхностных состояний $N_s = 10^{12}$ см⁻². Хорошо прослеживается зависимость параметров транзисторов от размера области активной базы. Из табл. 4.5 следует, что транзисторы с шириной базы менее 5 мкм имеют низкие коэффициенты усиления и отказывают при воздействии

ионизирующего излучения. При увеличении ширины базы до 10 мкм, заметно снижение коллекторных токов, обусловленное ростом ее сопротивления. Наилучшие характеристики наблюдались у транзисторов с шириной базы $5 \div 7$ мкм. Следует отметить, что конструкция транзистора с периферийной пассивной базой допускает выполнение топологии в виде ячеистой структуры при необходимости увеличения его мощности.

Табл. 4.5 – Параметры БТ: ток коллектора I_c , базовый ток I_b , коэффициент передачи тока базы β , до и после воздействия ионизирующего излучения

W, мкм	До облучения			После облучения		
	I_c , А	I_b , А	β	I_c , А	I_b , А	β
0.2	$4.6 \cdot 10^{-7}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$	6.7	отказ	отказ	отказ
3	$6.3 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	19	отказ	отказ	отказ
5	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-7}$	~90	$7.8 \cdot 10^{-4}$	$8.6 \cdot 10^{-6}$	~90
7	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-7}$	~85	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$7.8 \cdot 10^{-6}$	~85
10	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	~85	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-6}$	~85

Параметры транзисторов зависят от уровня легирования его активных областей. Оптимальные концентрации примеси в эмиттере, базе и коллекторе для транзисторов с периферийным контактом к базе определялись по величине коллекторного тока и коэффициента передачи тока базы. При расчетах варьировались уровни концентрации примеси в одной из трех активных областей транзистора. В табл. 4.6 представлены результаты моделирования в 3D квазигидродинамическом приближении характеристик транзисторов при различных значениях концентрации примеси в сильнолегированных областях эмиттера и коллектора ($N_{e,c(n+)}$), области активной базы (N_b) и низколегированной области коллектора ($N_{c(n-)}$) (напряжение на базе $U_b=0,7$ В, напряжение коллектора $U_c=3,3$ В).

Табл. 4.6 – Параметры БТ: ток коллектора I_c , базовый ток I_b , коэффициент передачи тока базы β , в зависимости от уровня легирования активных областей

N п/п	N_{e,c (n+)}, см⁻³	N_b, см⁻³	N_{c(n-)}, см⁻³	I_c, А	I_b, А	β
1	1×10 ¹⁹	8·10 ¹⁶	1×10 ¹⁷	1,4·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁷	125
2	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁷	1×10 ¹⁷	1,027·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁷	89
3	1×10 ¹⁹	2×10 ¹⁷	1×10 ¹⁷	5,02·10 ⁻⁶	1,1·10 ⁻⁶	46
4	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁷	2×10 ¹⁷	1,3·10 ⁻⁵	3,1·10 ⁻⁷	41
5	1×10 ²⁰	1×10 ¹⁷	1×10 ¹⁷	1,4·10 ⁻⁵	2,1·10 ⁻⁷	65

Из табл. 4.6 следует, что на величину коэффициента передачи тока базы оказывают влияние уровни концентрации примеси всех трех активных областей транзистора. Снижение уровня легирования активной базы приводило к увеличению β . Однако при этом падает напряжение пробоя транзисторов даже при относительно малых дозах облучения. При увеличении концентрации примеси в сильнолегированных областях эмиттера и коллектора, роста коэффициента передачи тока базы не наблюдается. Его величина сохраняется на уровне средних значений. К оптимальной можно отнести концентрацию примеси в области n+эмиттера-коллектора на уровне $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при концентрации примеси в активной базе $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Для подтверждения результатов, полученных посредством моделирования, были изготовлены биполярные транзисторы с шириной базы 0,35 мкм, концентрацией примеси в базе $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, длиной слаболегированной области коллектора 0,7 мкм и концентрацией примеси $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Концентрация примеси фосфора в областях эмиттера и сильнолегированного коллектора равнялась $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Зависимость тока коллектора (I_c) от напряжения на коллекторе (U_c) при разном токе на базе (I_b) такого транзистора приведены на рис. 4.19.

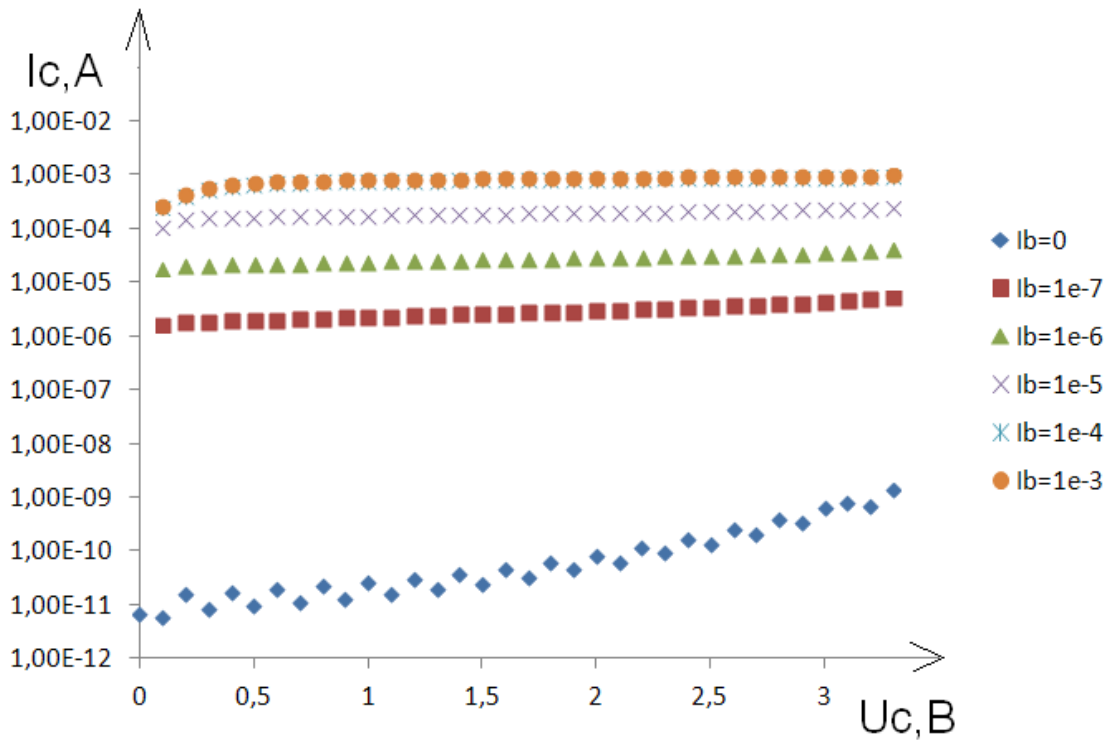


Рис. 4.19 – Зависимость тока коллектора БТ от напряжения на коллекторе при разном токе базы

Из рис. 4.19 следует, что при нулевом напряжении на базе БТ ток стока при напряжении питания на коллекторе не превышает значения 1 нА. Для исследования усилительных свойств изготовленного БТ были получены зависимости коэффициента усиления по току (α) от напряжения на коллекторе при разном токе на базе (рис. 4.20).

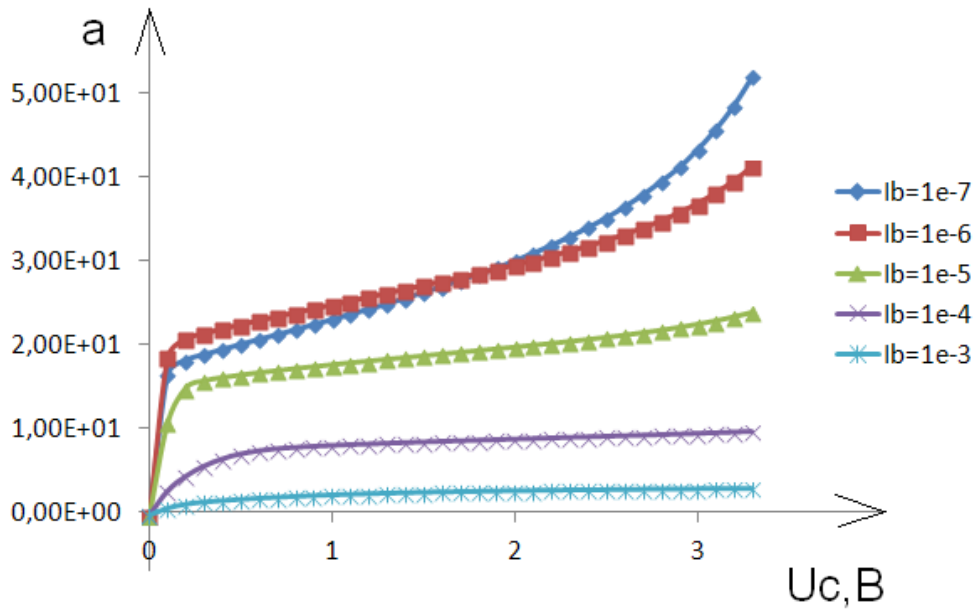


Рис. 4.20 – Зависимость коэффициента усиления по току БТ от напряжения на коллекторе при разном токе на базе транзистора

Следует отметить, что полученные результаты совпадают с рассчитанными результатами (табл. 4.6). Сравнение параметров транзисторов с верхним и боковым базовым контактом показывает значительные преимущества последних. Характеристики двух типов транзисторов до и после воздействия ионизирующего излучения в зависимости от уровня наведенной плотности поверхностных состояний при напряжении на базе $U_b = 0,7$ В и напряжении коллектора $U_c = 3,3$ В представлены в табл. 4.7. Моделирование выполнено в 3D квазигидродинамическом приближении. На кремниевую подложку при расчетах подавался отрицательный потенциал ($U_{sub} = -3.3$ В).

Табл. 4.7 – Параметры БТ с боковым и верхним контактом к базе

Тип базового контакта	Параметры транзисторов	До облучения	После воздействия гамма-излучения* (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, A	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$7.8 \cdot 10^{-4}$
	I_b, A	$5.0 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$5.13 \cdot 10^{-8}$	$9.1 \cdot 10^{-6}$
	β	~ 54	~ 55	~ 56	~ 85
С верхним контактом	I_c, A	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	отказ
	I_b, A	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	отказ
	β	13	4.9	1.9	отказ

* – без учета влияния нейтронного излучения

Сравнивались характеристики БТ с аналогичной геометрией и равными концентрациями примеси в активных областях структур. При расчетах использовались полученные ранее оптимальные концентрации примеси в области эмиттера, базы и коллектора. Как видно из табл. 4.7, латеральные транзисторы с «традиционным» верхним контактом к области активной базы имеют значительно меньшую величину коэффициента передачи тока базы, при этом после облучения при наведенной плотности поверхностных состояний $N_s = 10^{12} \text{см}^{-2}$ у данных БТ наблюдается отказ функционирования. Воздействие ионизирующего излучения на БТ с периферийным контактом к области активной базы приводит к росту величины коллекторных и базовых токов, что обусловлено влиянием связанных положительных зарядов в диэлектриках. Однако катастрофических отказов работы транзисторов отмечено не было. При облучении БТ сохраняли высокие уровни коэффициента передачи тока базы. Рост коллекторных и базовых токов БТ при облучении в основном определяется паразитными каналами утечек. Существенно меньший вклад вносят токи рекомбинации носителей заряда на границе раздела с диэлектриком.

По своему характеру уровни рекомбинационных базовых токов для двух типов БТ существенно различаются. Расположение базового контакта сверху над областью активной базы приводит к снижению коэффициента передачи тока базы БТ ввиду высокого уровня инжекции основных носителей заряда из области

активной базы в эмиттер, а также увеличенном значении тока базы. Конструктивный вариант БТ с областью пассивной базы на периферии активной (с боку), позволяет организовать эффективный транспорт носителей заряда от эмиттера к коллектору за счет уменьшения тока базы по сравнению с «традиционной» конструкцией БТ. Приложение высокого напряжения на базу оригинального транзистора не приводило к ее полному обеднению, движение носителей заряда в базе принимало трехмерный характер. Таким образом, конструкция БТ с областью пассивной базы на периферии активной позволяет значительно улучшить его характеристики и обеспечить достижение высокого уровня стойкости к ионизирующему излучению.

Был проведен сравнительный анализ значения плотностей базовых и коллекторных токов были в результате расчетов в 2D и 3D приближении. Результаты анализа показывают необходимость учета трехмерных эффектов. Используемые на практике транзисторы с верхним контактом к области активной базы обладают близкой к 2D симметрией в распределении токов. Транзисторы с боковым контактом к области активной базы такой симметрии не имеют, поэтому наиболее точные результаты получены в 3D приближении. Т.к. градиенты распределения поля в активной базе транзисторов различной геометрии по направлению отличаются, также отличаются распределения плотности базовых и коллекторных токов, и коэффициент передачи тока базы.

Изменения параметров транзисторов в изолированных диэлектриком карманах представлены как результат преобладающего воздействия гамма-излучения без учета влияния эквивалентного уровня быстрых нейтронов. Известно, что воздействие нейтронов приводит к эффектам смещения и снижению коэффициента передачи тока базы транзисторов [63]. Следует отметить, что показаны активные режимы работы транзисторов, т.к. при этом результаты моделирования и измерений параметров тестовых структур обычно различаются в пределах 10-15%. В области микрорежимов значения параметров при моделировании необходимо анализировать отдельно, т.к. они могут отличаться на порядок величины от результатов измерений.

Рассматривалось также воздействие потока быстрых нейтронов спектра деления со средней энергией ~ 2 МэВ на БТ с боковым контактом к базе. Воздействие нейтронов на структуру полупроводника сопровождается образованием радиационных дефектов, включая точечные: вакансии и междоузельные атомы, а также скопления точечных дефектов в виде стабильных во времени комплексов. Дефектообразование в объеме кристалла приводит к изменению параметров полупроводников. Изменяется время жизни, концентрация и подвижность носителей заряда. Наиболее чувствительным к радиационным воздействиям параметром является время жизни τ носителей заряда. Оценку зависимости τ от потока Φ воздействующих на материал радиационных частиц (нейтронов) выполнялось с использованием полуэмпирического выражения [131]:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + k_{\tau}\Phi, \quad (4.1)$$

где τ_0 – исходное время жизни носителей заряда, τ_{Φ} – время жизни носителей заряда после облучения кристалла интегральным потоком нейтронов Φ , k_{τ} – коэффициент радиационного изменения времени жизни.

В работе [132] показано, что наибольшее влияние ионизирующее излучение (нейтроны) оказывает на время жизни неравновесных носителей заряда, а изменением концентрации носителей можно пренебречь. Изменение эффективной концентрации типозадающей примеси с облучением можно также считать эффектом низкого порядка малости на фоне изменения времени жизни. Изменение эффективной концентрации необходимо учитывать при достаточно низком уровне легирования активной базы (менее 10^{16}см^{-3}). Уровень концентрации примеси в базе рассматриваемой модели БТ составлял 10^{17}см^{-3} .

Моделировалось изменение коэффициента передачи тока базы транзисторов β в зависимости от времени жизни носителей заряда τ . Значения времени жизни носителей рассчитывались в соответствии с величиной флюенса нейтронов. Моделирование выполняли с учетом процессов генерации-рекомбинации носителей заряда по модели Шокли-Рида-Холла на глубоких

уровнях дефектов. Рассматривалось сечение структуры транзисторов вблизи области пассивной базы. Моделирование выполнялось в 2D квазигидродинамическом приближении. Расчеты проводились при напряжении питания на базе 0,7 В, напряжении на коллекторе 3,3 В. На подложку подавалось отрицательное напряжения смещения 3,3 В. В табл. 4.8 представлены значения времени жизни носителей заряда в базе транзистора τ и соответствующие им значения тока коллектора I_c , тока базы I_b и коэффициента передачи тока базы β (для моделирования воздействия различной величины флюенса нейтронов).

Табл. 4.8 – Параметры БТ в зависимости от времени жизни носителей заряда в активной области базы

№ п/п	τ , с (в базе)	I_c , А	I_b , А	β
1	4,54e-7	2,15e-6	5,808e-8	37
2	4,538e-7	2,149e-6	5,826e-8	36
3	4,531e-7	2,131e-6	6,135e-8	34
4	4,2e-7	7,411e-7	5,866e-7	1,2

В табл. 4.8 в первой строке показаны исходные параметры транзистора без воздействия потока быстрых нейтронов. Далее представлены результаты расчета параметров при постепенном увеличении флюенса нейтронов. Как видно из табл. 4.8, параметры транзистора практически не изменяются до максимальной величины флюенса. При высоких значениях флюенса идет резкая деградация характеристик с увеличением тока коллектора, базы и падением коэффициента усиления. Следует отметить, что в табл. 4.8 представлены средние значения времени жизни носителей заряда. На рис. 4.21 показано распределение времени жизни электронов в активной области базы (область базы, где происходит регенерация электронов и дырок) БТ по сечению от эмиттерного к коллекторному p-n переходу вблизи контакта к пассивной базе.

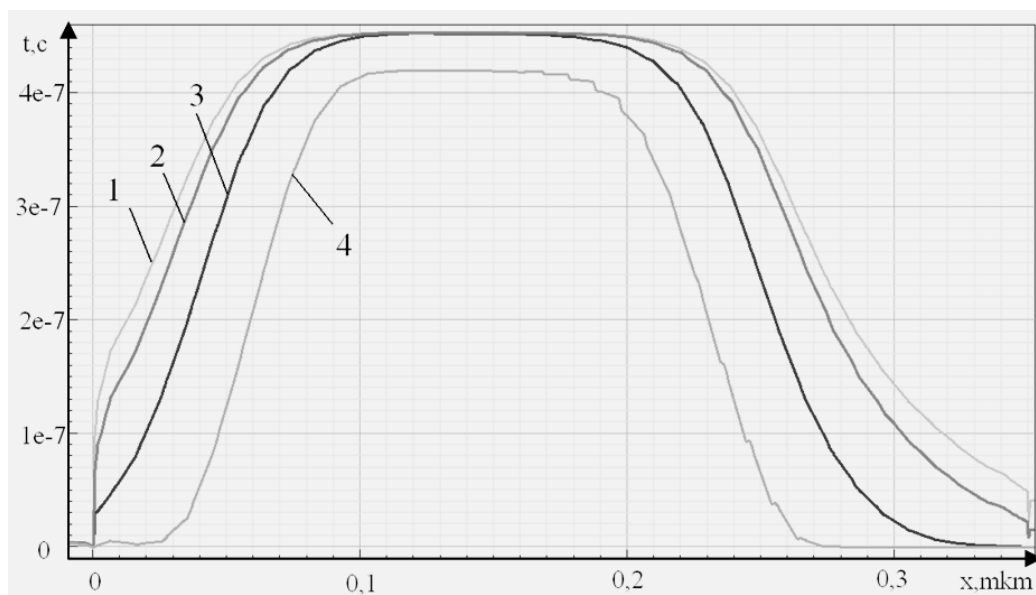


Рис. 4.21 – Время жизни электронов в активной области базы транзистора. Номера кривых соответствуют номерам в табл. 4.8

Из рис. 4.21 видно, что величина τ выходит на плато и сохраняет постоянное значение в области активной базы с резким снижением значений в области объемного заряда эмиттерного и коллекторного p-n переходов. Таким образом, с увеличением флюенса нейтронов возрастает интенсивность процессов генерации-рекомбинации носителей заряда на глубоких центрах рекомбинации в области p-n переходов.

Зная коэффициент k_t [117], было оценено значение флюенса нейтронов для 4 варианта (с минимальным временем жизни электронов, табл. 4.8), равное $8,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В соответствии с выражением 4.1, при флюенсе $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ время жизни носителей в таких транзисторах уменьшится до $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, что является недопустимым. Таким образом, была разработана конструкция и технология изготовления биполярного транзистора на структуре КНИ, совместимая с технологией изготовления интегральных схем и МОПТ с двухслойным поликремниевым затвором в том числе, обеспечивающая стойкость к радиационному воздействию.

4.7 Выводы к Главе 4

Посредством моделирования была разработана новая конструкция биполярного транзистора на КНИ с приборным слоем толщиной 0,2 мкм. За счет бокового расположения контакта к базе в биполярном транзисторе удалось снизить паразитную инжекцию носителей заряда из контакта в базу и подавить паразитную рекомбинацию, что позволило увеличить коэффициент усиления и выходную мощность ИС. Для подтверждения рассчитанных характеристик биполярный транзистор был изготовлен и исследован. Биполярный КНИ-транзистор новой конструкции является радиационнотойким с высоким статическим коэффициентом усиления β (до гамма-облучения $\beta \cong 54$, после облучения $\beta \cong 85$). Этот результат является практически значимым.

5 СТАБИЛИТРОН С УПРАВЛЯЮЩИМ КОНТАКТОМ НА СТРУКТУРЕ КНИ

Ошибка! Закладка не определена.

5.1 Физико-топологическая модель стабилитрона с управляющим контактом

В работе предложено конструктивно-технологическое исполнение стабилитрона, рабочим напряжением которого можно управлять посредством приложения напряжения на дополнительный контакт (далее управляющий контакт), соединенный с нижним слоем вертикального р-п перехода, где верхний слой является частью стабилитрона.

Разработанный стабилитрон обладает следующими достоинствами:

1. Высокой стойкостью к нейтронному воздействию, обусловленной применением структур КНИ.
2. Технология его изготовления совместима с классическим маршрутом изготовления ИС с субмикронными проектными нормами (не требуется дооснащения).
3. Площадь стабилитрона, занимаемая на кристалле, меньше, чем у известных функциональных аналогов.
4. Возможность управления характеристиками стабилитрона в процессе эксплуатации делает его универсальным для широкого спектра применений.

На рис. 5.1 приведено схематическое изображение конструкции предложенного стабилитрона.

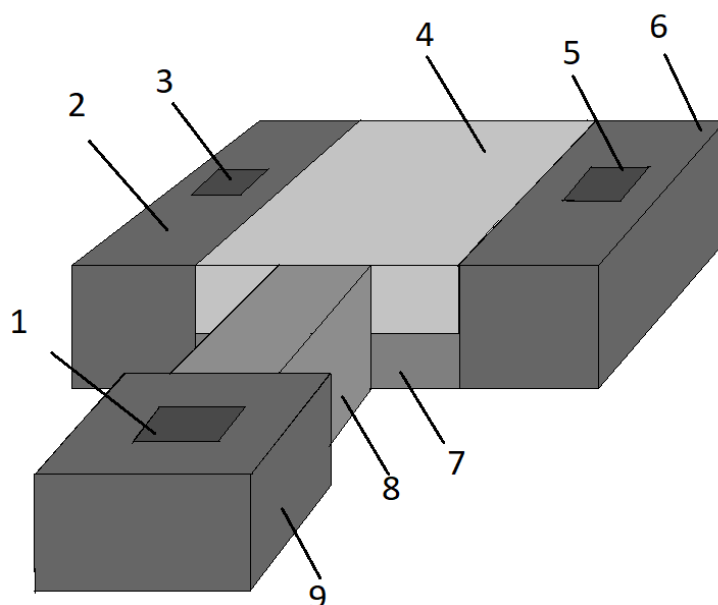


Рис. 5.1 – Схематическое изображение конструкции управляемого стабилитрона: 1 – силицидированный контакт к управляемому контакту; 2 – сильнолегированный анод стабилитрона; 3 – силицидированный контакт к аноду стабилитрона; 4 – слаболегированный анод (для стабилитрона pnp - типа) или катод (для npn - типа); 5 – силицидированный контакт к катоду стабилитрона; 6 – сильнолегированный катод стабилитрона; 7 – нижний слой горизонтального р-п перехода; 8 – легированный слой кремний, соединяющий управляющий контакт и нижний слой горизонтального р-п перехода; 9 – сильнолегированная область управляющего контакта

Изменение рабочего напряжения осуществляется изменением концентрации носителей заряда в верхнем слое горизонтального р-п перехода. Это осуществляется посредством подачи напряжения на управляющий контакт, что приводит к изменению области пространственного заряда горизонтального р-п перехода. На рис. 5.2 приведена двухмерная модель конструкции стабилитрона, полученная посредством численного моделирования.

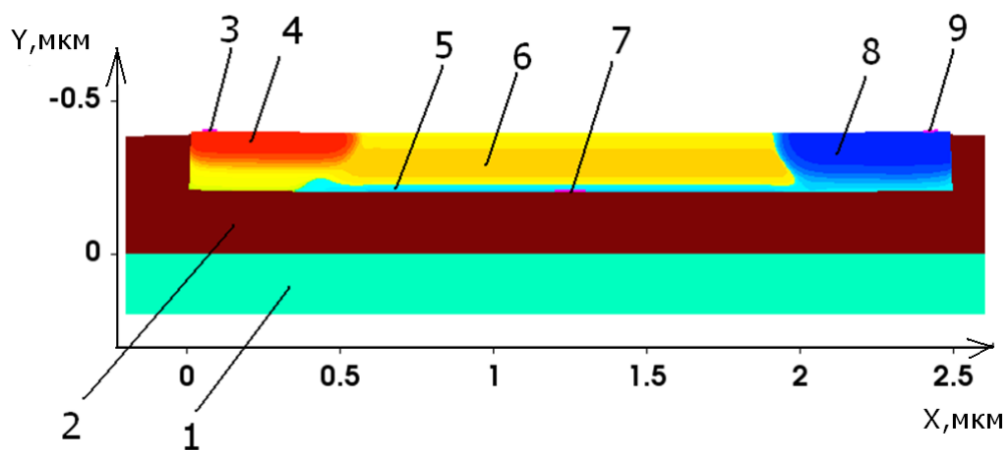
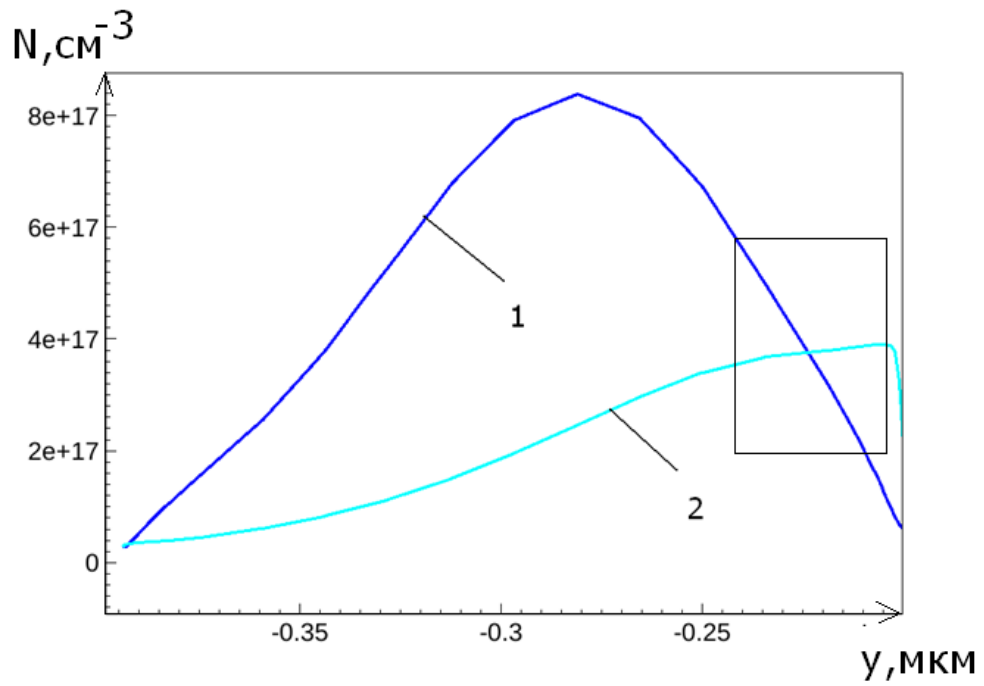
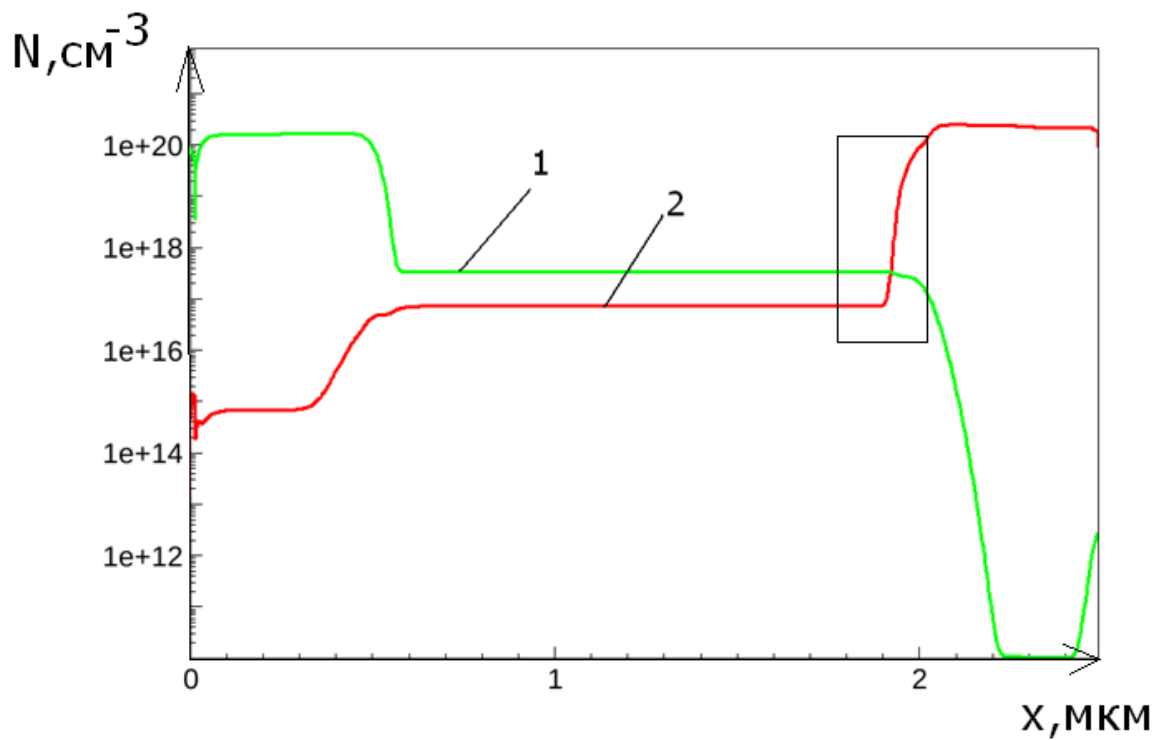


Рис. 5.2 – Двухмерная модель конструкции исследуемого стабилизатора pnp-типа, где коллаж отображает степень легирования примесью областей (красный и желтый цвет соответствует примесь фосфора, синий и голубой соответствуют примеси бора): 1 – кремниевый нижний слой структуры КНИ; 2 – захороненный оксид кремния; 3 – силицидированный контакт к катоду стабилизатора; 4 – сильнолегированный катод стабилизатора; 5 – нижний слой горизонтального р-п перехода средней области стабилизатора; 6 – верхний слой горизонтального р-п перехода средней области стабилизатора; 7 – контакт к нижнему слою р-п перехода 5; 8 – сильнолегированный анод стабилизатора; 9 – силицидированный контакт к аноду стабилизатора

На рис. 5.3 приведены профили распределения примеси бора и фосфора вдоль соответствующих осей. Черными прямоугольниками на рис. 5.3 выделены области р-п переходов.



а)



б)

Рис. 5.3 – Профиль распределения примеси в стабилитроне npp-типа, где а) вдоль оси OY при $x = 1,2$ мкм, б) вдоль оси OX при $y = -0,35$ мкм.

1 – распределение фосфора; 2 – распределение бора

5.2 Характеристики стабилитрона с управляющим контактом

Рассмотрим поведение р-n перехода при приложении напряжения. При приложении обратного смещения на р-n переход, область пространственного заряда (ОПЗ) расширяется с d_1 до d_2 (рис. 5.4). При этом уровни зон проводимости и валентной зоны изменяют свое положение [63, 133, 134].

Приложение обратного смещения на р-n переход средней области стабилитрона (рис 5.3 а) приведет к изменению концентрации носителей заряда в области б рис. 5.2. Что, в свою очередь, приведет к изменению напряжения пробоя стабилитрона (р-n переход на рис. 5.2 б). Таким образом, посредством приложенного напряжения можно управлять концентрацией носителей заряда областей р-n перехода и, как следствие, рабочим напряжением стабилитрона.

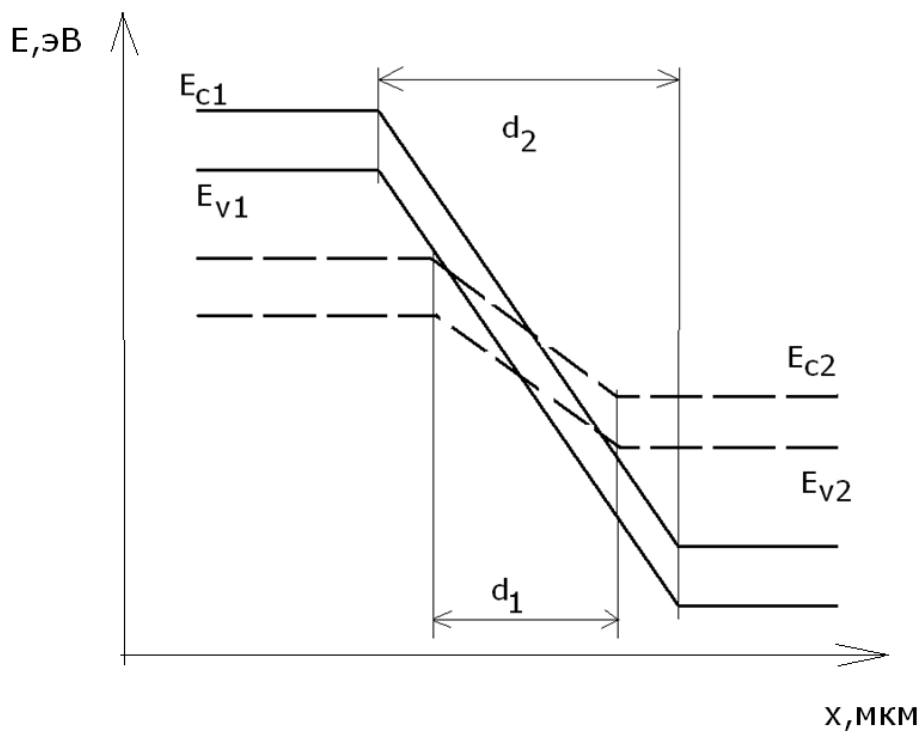


Рис. 5.4 – Энергетической зонная диаграмма р-n перехода стабилитрона при прямом (прерывистая линия) и обратном (сплошная линия) смещении

Рассмотрим изменение характеристик стабилитрона при приложении напряжения на примере стабилитрона npr-типа. При подаче отрицательного

напряжения на анод p-n перехода, область пространственного заряда диода расширится, что приведет к увеличению концентрации носителей и уменьшению толщин анода и катода p-n перехода, расположенного вертикально. Так как катод p-n перехода также является частью стабилитрона, результатом такого воздействия будет уменьшение напряжения пробоя стабилитрона.

На рис. 5.5 приведены вольтамперные характеристики описанного выше стабилитрона npr-типа, сформированного на структуре КНИ с толщиной приборного слоя 0,2 мкм, и рассчитанные посредством численного моделирования после проведения калибровки моделей по результатам экспериментально полученных данных на производственной линии. При приложении на анод p-n перехода средней области стабилитрона напряжения -0,5 В, напряжение пробоя на обратной ветви стабилитрона уменьшается на 0,28 В (кривая а на рис. 5.5) по сравнению с нулевым напряжением на контакте к средней области (кривая б на рис. 5.5).

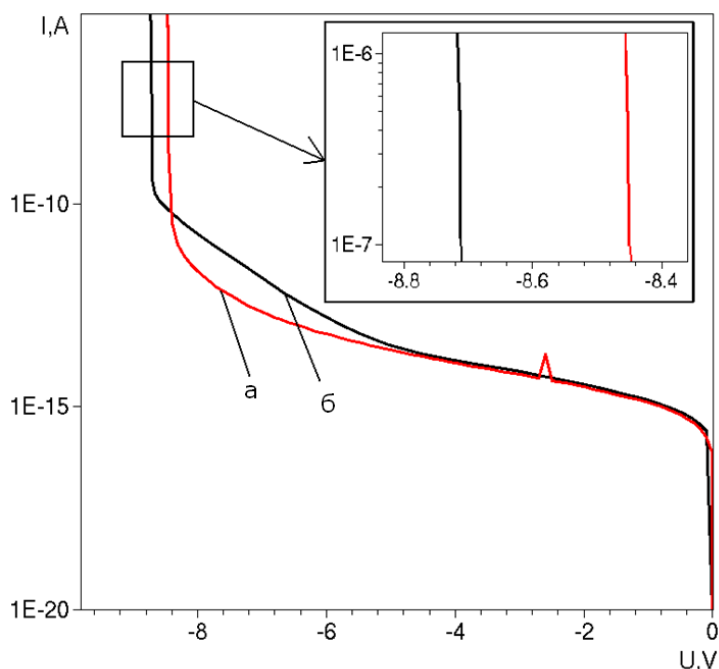


Рис. 5.5 – Вольтамперные характеристики стабилитрона npr-типа, где: а) напряжение на управляющем контакте - 0,5 В; б) напряжение на управляющем контакте 0 В

Таким образом, приложение напряжения на контакт, соединенный с нижней частью диода средней области стабилитрона, позволяет корректировать напряжение его пробоя в процессе эксплуатации с учетом фактического ухода параметров стабилитрона в условиях воздействия внешних факторов (например, температуры, гамма-облучения и т.п.). Рабочее напряжение предложенного стабилитрона задается посредством выбора дозы легирования средней области, его коррекция в процессе работы осуществляется путем подачи управляющего напряжения. Для исследования возможности стабилизации рабочего напряжения при гамма-воздействии были рассчитаны характеристики стабилитрона ррп-типа, изображенного на рис. 5.6

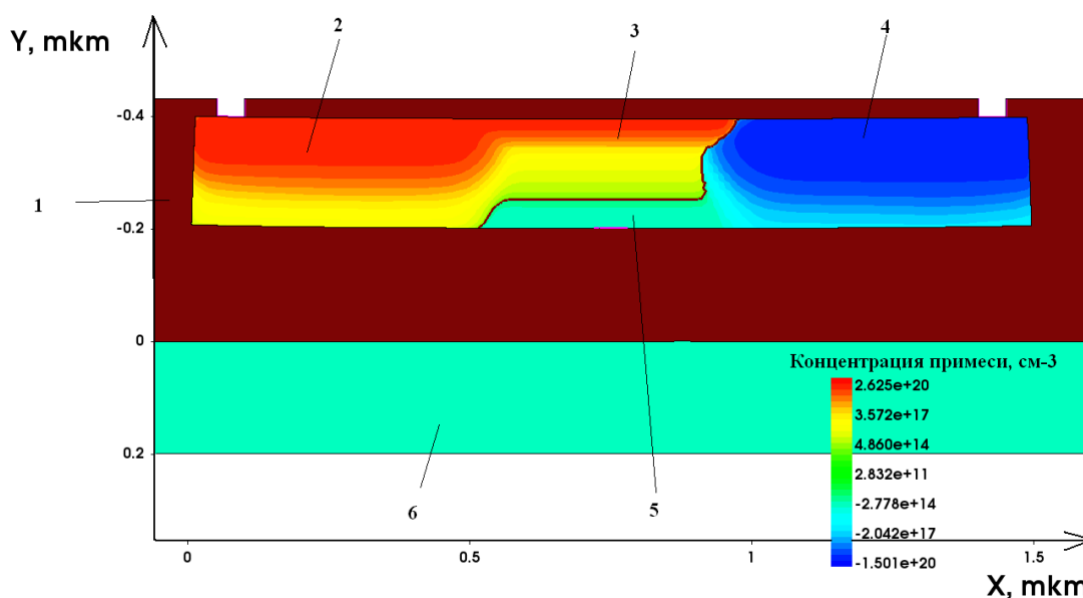


Рис. 5.6 – Расчетная структура стабилитрона с управляющим контактом: 1 – изолирующий слой оксида кремния; 2 – катод стабилитрона; 3 – средняя область стабилитрона; 4 – анод стабилитрона; 5 – область управляющего контакта; 6 – кремниевая подложка структуры КНИ

Далее было исследовано изменение формы ВАХ стабилитрона до гамма-воздействия и после гамма-воздействия при нулевом напряжении на управляющем контакте (рис. 5.7, кривые 1 и 2). Гамма-воздействие привело к сдвигу рабочего напряжения стабилитрона более, чем на 2 В. Посредством

приложения напряжения $-0,7$ В на управляющий контакт стабилитрона с учетом гамма воздействия удалось сдвинуть ВАХ (рис. 5.7, кривая 3) так, что рабочее напряжение стабилитрона стало равно рабочему напряжению до гамма-воздействия.

Таким образом, была предложена структура оригинального стабилитрона с управляющим контактом, позволяющая компенсировать влияние внешнего воздействия на характеристики стабилитрона посредством подачи соответствующего напряжения на управляющий контакт. Разработанная технология изготовления такого стабилитрона совместима с технологией изготовления классических интегральных схем и предложенным выше оригинальных элементов в том числе. По приведенному материалу был получен патент [13].

Следует отметить, что концентрации примеси в областях р-п перехода средней области стабилитронов (рис. 5.1.2 и 5.2.3) отличаются. Поэтому влияние приложенного напряжения на управляющие контакты этих структур приводят к разному результату.

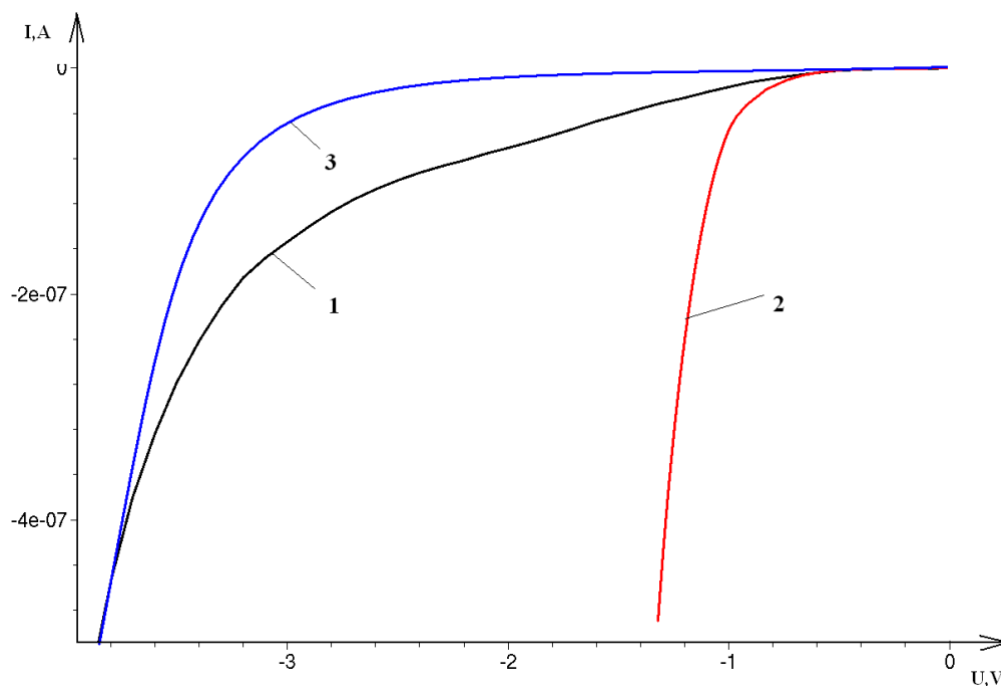


Рис. 5.7 – ВАХ стабилитрона: 1 – до гамма-воздействия при нулевом напряжении на управляющем контакте; 2 – после гамма-воздействия при нулевом напряжении на управляющем контакте; 3 – после гамма-воздействия при напряжении $-0,7$ В на управляющем контакте.

нулевом напряжении на управляющем контакте; 3 – после гамма воздействия при напряжении на управляющем контакте равном - 0,7 В

5.3 Технология изготовления стабилитрона с управляемым рабочим напряжением

В ходе выполнения работы решалась задача создания стабилитрона (как топологического элемента ИС) с возможностью управления рабочим напряжением, минимальной занимаемой площадью на кристалле, а также обладающего стойкостью к ионизирующему излучению.

Для решения данной задачи были разработаны конструкция оригинального стабилитрона (описанная ранее) и следующий крупноблочный маршрут его изготовления, совместимый со стандартным КМОП КНИ маршрутом:

1. формирование глобальных знаков совмещения;
2. формирование активной области стабилитрона;
3. формирование щелевой изоляции;
4. формирование управляющего контакта;
5. формирование средней области стабилитрона;
6. формирование высоколегированных областей анода и катода стабилитрона и части управляющего контакта;
7. формирование маски для силицида;
8. формирование силицидированных контактов.

Следует отметить, что активация примеси в средней области, аноде и катоде стабилитрона могут проводиться совместно (за одну операцию высокотемпературного отжига). Формирование управляющего контакта совмещается с формированием карманов транзистора стандартного маршрута изготовления ИС. Активация примеси рекомендуется проводить за одну операцию.

Формирование маски силицида совмещается с блоком формирования высокоомных областей стандартного маршрута изготовления ИС. Таким

образом, разработанный маршрут полностью интегрируется в КМОП-технологический процесс.

5.4 Выводы к главе 5

Впервые разработана конструкция нового типа управляемого стабилитрона, сформированного на КНИ с приборным слоем 0,2 мкм. Особенностью такого устройства является формирование дополнительного контакта к его средней области, представляющей собой горизонтальный р-п переход. Приложение напряжения на дополнительный контакт позволяетратно изменять рабочее напряжение устройства (1.8 ÷ 2.2 раза) вследствие изменения ОПЗ горизонтального р-п перехода. Такая конструкция позволяет управлять параметрами стабилитрона в процессе эксплуатации. Этот результат является практически значимым.

Заключение

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 двухслойный 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 [14].

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 «Базака-Э-Питание», в комплексном проекте. Разработанная технология позволила изготавливать радиационностойкие аналоговые [15].

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-

n 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

- В изданиях 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, 2019. – Том 53. – №10. – 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, 2021. – Том 55. – №.10. –С. 916 – 921.
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.

- В изданиях 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, 2020/ – №. 3 (258). – С. 34 – 42.
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, 2020. – №12. – 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., 2021. – №.2 (262). – 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., 2022. – №.1 (264). – 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.Н. Кузнецов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2021 г. – №.4 (263). – С. 31 – 38.

9. Шоболова Т.А. // Исследование влияния гамма-воздействия на токи утечки транзисторов с проектными нормами 100 нм / Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов, А.В. Боряков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2022г. – № 2 (265). – С. 10 – 17.

- патенты:

10. Пат. 2739861 Российская Федерация, МПК H01L 29/78, H01L 21/20. Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке / Т.А. Шоболова, А.С. Мокеев, – №2020110949. Бюл. № 1. – 4 с.:ил.

11. Пат. 2758413 Российская Федерация, МПК H01L 29/78. Способ изготовления транзистора с зависимым контактом к подложке / Т.А. Шоболова и др., – №2021102956. Бюл. № 31. – 3 с.: ил.

12. Пат. 2767597 Российская Федерация, МПК H01L 21/265, H01L 29/73. Латеральный биполярный транзистор на структурах «кремний на изоляторе» и способ его изготовления/ Т.А. Шоболова, С.В. Оболенский, Ю.А. Кабальнов, – №2021114552. Бюл. № 8. – 11 с.: ил.

13. Пат. 2783629 Российская Федерация, МПУ H01L29/00 Стабилитрон на структуре «кремний на изоляторе» / Т.А. Шоболова и др. – №2021035094. Бюл. №32 – 3 с.: ил.

Список справок об исполнении изобретений по теме диссертации

14. Справка об исполнении изобретений по патенту №2739861 от 29.12.2020 «Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке».

15. Справка об использовании изобретений по патенту №2804506 от 06.10.2023 «Способ изготовления латерального биполярного транзистора с изолированным затвором на структуре «кремний на изоляторе».

Список литературы

16. Пат. 2722859 Российская Федерация, СПК H01L/283 Способ формирования структуры полевого силового радиационно-стойкого тренч-транзистора / Ю. А. Романов, А. Н. Рябев – №2019132021. Бюл. № 16. – 4 с.: ил.
17. Пат. 2785122 Российская Федерация, МПК H01L 21/00. Способ изготовления радиационно-стойкого полупроводникового прибора / А. Г. Мустафаев и др. – № 2021132809/ Бюл. № 21. – 4 с.: ил.
18. Пат. 2434312 Российская Федерация, МПК H01L 21/8238. Способ изготовления радиационно-стойкой БИС / С. А. Цыбин и др. – № 2010105757/28. Бюл. № 32. – 7 л.: ил.
19. Пат. 2601251 Российская Федерация, МПК H01L/105. КМОП КНИ интегральная ИС с повышенной радиационной стойкостью (варианты) / А. С. Лушников и др. – № 2015135753/28. Бюл. № 30.– 10 с.: ил.
20. Пат. 2320049 Российская Федерация, МПК H01L 21/8238. Способ увеличения радиационной стойкости элементов КМОП-схем на КНИ подложке/ Е. В. Кузнецов и др. – № 2003118286/28. Бюл. № 8. – 6 с.: ил.
21. Пат. 2024107 Российская Федерация, МПК H01L 21/335. Способ изготовления МОПТ/ И. В. Белоусов. – №5012066/25. – 8 с.: ил.
22. Пат. 2245589 Российская Федерация, МПК H01L 29/417. Устройство полевого МОП-транзистора и способ его изготовления / Д. П. Снайдер – №2002118823/28. Бюл. № 3. – 13 с.
23. Пат. 1240295 СССР, МПК H01L 21/82. Способ создания радиационно-стойких МОП-структур / Н. В. Румак – №3806225/25. Бюл. №17 – 1 с.
24. Пат. 2105382 Российская Федерация, МПК H01L 21/8238. Способ изготовления МДП ИС / Б. А. Бабаев и др. – № 95113934/25. – 6 с.: ил.
25. Пат. 2474919 Российская Федерация, МПК H01L 21/8238. Способ получения локальных низкоомных областей силицида титана в интегральных схемах/ С. И. Бабкин и др. – №2011130940/28. Бюл. №4. – 4 с.: ил.

26. Пат. 1800501 СССР, МПК H01L 21/263. Способ изготовления биполярных транзисторов / Н. Ф. Голубев и др. – №4934488. Бюл. №9.– 3 с.
27. Пат. 2351036 Российская Федерация, МПК H01L 21/331. Способ изготовления биполярного транзистора/ А. Н. Сауров и др. – №2007134272/28. Бюл. №9. – 8 с.: ил.
28. Пат. 2262774 Российская Федерация, МПК H01L 21/331. Способ изготовления биполярного транзистора/ Е. С. Горнев и др. – №2002105963/28. – 8 с.: ил.
29. Пат. 2099814 Российская Федерация, МПК H01L 21/331. Способ изготовления биполярного транзистора/ М. И. Лукаевич – № 95111284/25. – 5 с.: ил.
30. Пат. 2279733 Российская Федерация, МПК H01L 29/73. Структура биполярного транзистора с эмиттером субмикронных размеров / А. Н. Долгов и др. – № 2003115007/28. Бюл. № 19. – 9 с.: ил.
31. Пат. 2298256 Российская Федерация, МПК H01L 29/68. Стабилитрон с регулировкой рабочего тока/ А. Ф. Баранецкий – № 2005119228/28. Бюл. № 12. – 3 с.: ил.
32. Пат. 2307386 Российская Федерация, МПК G05F 1/56. Управляемый источник опорного напряжения/ Н.Н. Прокопенко, А. С. Будяков, С. В. Крюков –№ 2006108708/09. Бюл. № 27. – 4 с.: ил.
33. Пат. 252409 СССР, МПК H02M 1/569. Стабилизирующий выпрямитель на кремниевых управляемых диодах/ В. Б. Мараховский, А. А. Гитович, Е. А. Каневский – № 1183434/26-9. Бюл. № 29. – 2 с.: ил.
34. Иванова Н. Ю. Электрорадиоэлементы: учеб.пособие / Н. Ю. Иванова, И. Э. Комарова, И. Б. Бондаренко. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 94 с.
35. Пат. 4419681 США, H01L 27/70. A Zener diode/ А. Schmitz –№188198. – 3 с.

36. Третьяков С. Д. Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие / С. Д. Третьяков. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 102 с.
37. Шелохвостов В. П. Проектирование интегральных ИС: учебное пособие / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышов. – 2-е изд., стер. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2008. – 208 с.
38. Ануфриев Л. П. Технология интегральной электроники: учебное пособие по дисциплине «Конструирование и технология изделий интегральной электроники» для студентов специальностей «Проектирование и производство РЭС» и «Электронно-оптические системы и технологии» / Л. П. Ануфриев, С. В. Бордусов, Л. И. Гурский и др. – Минск: «Интегралполиграф», 2009. – 379 с.
39. Иванов Д. А., Садыков М. Ф. Разработка электронных элементов систем контроля: учеб. пособие / Д. А. Иванов, М. Ф. Садыков. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. – 132 с.
40. Свистова Т. В. Основы микроэлектроники: учебное пособие / Т. В. Свистова – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 149 с.
41. Dziejczak A. Passive components and passive integrated circuits – state of the art / A. Dziejczak, L. J. Golonka // Conference: Proc. 8th Int. Conf. Mixed Design of Integrated circuits and systems, 2001, p. 395-400.
42. Дунаев С. Д. Электроника, микроэлектроника и автоматика: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / С. Д. Дунаев. – М.: Маршрут, 2003. – 336 с.
43. Norquist D. L. DOD command, and communications (C3) modernization strategy / D. L. Norquist // Fully networked, Enabling globally integrated operations, Ensuring a more lethal joint force, 2020 – 38 p.
44. Holbrook D. Government support of the semiconductor industry: diverse approaches and information flows / D. Holbrook // Business and economic history, 1995. – Vol. 24 – № 2. – P. 133 – 165.

45. Noyce R. N. Integrated circuits in military equipment / R. N. Noyce // IEE spectrum, 1964. – P.71-72.
46. Asher N. J. The role of department of defense in development of integrated circuits / N. J. Asher, L. D. Strom // Contract DAHC15 73 C 200, 1977. – 109 p.
47. Kharat D.K. Present and futuristic military application of nanodevices / D. K. Kharat, M. Harries, D. Praveenkumar // Synthesis and reactivity in inorganic metal-organic and nano-metal chemistry, 2006. – № 36 (2). – P.231 –235.
48. Коршунов Ф. П. Влияние гамма-излучения на параметры различных транзисторов МОП-структур – элементов интегральных схем / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, А. И. Белоус, С. В. Шведов, С. Б. Ластовский, В. И. Кульгачев // Доклады БГУИР, №1(17), 2007 – С. 67 – 72.
49. Веденин С. Радиационно-стойкая элементная база производства АО «ПКК Миландр» / С. Веденин, Д. Демидов, А. Макаров, А. Однолько, С. Шумилин // Компоненты и технологии. – 2018. – №5. – С. 84 – 88.
50. Таперо К. И. Эффекты низкоинтенсивного облучения в приборах и интегральных схемах на базе кремния / К. И. Таперо // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 2016. – Т.19. – №1. – С. 5 – 21.
51. Kalashnikov V.D. The influence of high ionizing dose rate on CMOS IC radiation hardness used in da-ta transmission elements / V. D. Kalashnikov, A. Yu. Eporov, A. V. Sogoyan, A. V. Ulanova // Bezopasnost informacionnyh technology, 2020. – №27(3). – P. 98 – 103.
52. Dubey A. Investigation of total ionizing dose effect on SOI tunnel FET / A. Dubey, M. Gupta // Superlattices and microstructures, 2019. – Vol. 133.
53. Li Z. Comparison of total ionizing dose effect in 22-nm and 28-nm FD SOI technologies / Z. Li, Ch. J. Elash, L. Chen, J. Xing, Z. Yang, Sh. Shi // Electronics, 2022. – P. 1-11.
54. Chatzikyriakou E. Total ionizing dose hardened and mitigation strategies in deep submicrometer CMOS and beyond / E. Chatzikyriakou, K. Morgan, C. H. Kees de Groot // IEEE transactions on electron devices, 2018. – P. 1-12.

55. Коняхин В. Микросхема защиты от тиристорного эффекта / В. Коняхин, Р. Федоров // Наноиндустрия, 2016. – №7 (69). – С. 32 – 41.
56. Пат. 2727332 Российская Федерация, МПК H01L21 21/8238. Способ повышения радиационной стойкости микросхем статических ОЗУ на структурах «кремний на сапфире» / Ю. А. Кабальнов – №2019145456. Бюл. № 21 – 7 с.: ил.
57. Попов В. П. Свойства структур и приборов на кремний-на-изоляторе / В. П. Попов, А. И. Антонова, А. А. Французов и др. // Физика и техника полупроводников, 2001. – Том 35. – Вып.9. – С. 1075 – 1083.
58. Пат. 2643938 Российская Федерация, МПК H01L 21/8238. Способ изготовления высокотемпературных КМОП КНИ интегральных схем / А. С. Бенедиктов, Н. А. Шелепин, П. В. Игнатов – №2016150880. Бюл. № 4. – 9 с.: ил.
59. Маллер Р. Элементы интегральных схем: учебник / Р. Маллер, Т. М. Кейминс. – М: Мир, 1989. – 630 с.
60. Ribeiro A. Demonstration of 4x4-port universal linear circuit / A. Ribeiro, A. Ruocco, L. Vanacker, W. Bogaerts // Optical society of America, 2016. – Vol.3. – No.12. – P.1348 – 1357.
61. Cong G. Arbitrary reconfiguration of universal silicon photonic circuits by bacteria foraging algorithm to achieve reconfigurable photonic digital-to-analog conversion / G. Cong, N. Yamamoto, T. Ioune, M. Okano, Y. Maegami, K. Yamada // Optics Express, 2019. – Vol.27. – No.18/2. – P. 24914 – 24922.
62. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: учебник / С. Зи – Кн.1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. –М.: Мир, 1984. – 456 с.
63. Петров Б. К. Электрические параметры нано-МОП транзисторов: учеб. пособие для вузов / Б. К. Петров, В. В. Воробьев. – Министерство образование и науки РФ ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. – 61 с.
64. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: учебник / С. Зи – Кн.2. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. –М.: Мир, 1984. – 456 с.

65. Красников Г. Я., Конструктивно – технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: учеб. пособие / Г. Я. Красников. – 1 часть. – М.:2002. – 416 с.
66. Yeo Y. MOSFET gate leakage modeling and selection guide for alternative gate dielectrics based on leakage considerations / Y. Yeo, King T. Liu, Ch. Hu // IEEE Transactions on electron devices, 2003. – No.50 (4). – P.1027 – 1035.
67. Пастухов П. Быстродействующие ОЗУ – проблемы создания / П. Пастухов, П. Леонов // Электроника, Микропроцессоры и микроконтроллеры, 2015. – №5 (145). – С. 80 – 89.
68. Денисенко В. Новые физические эффекты в нанометровых МОП-транзисторах / В. Денисенко // Компоненты и технологии, 2009. – №12. – С. 157 – 162.
69. Писаренко Н. С. Деграция характеристик МОП-структур в условиях накопления заряда в подзатворном диэлектрике на основе двуокиси кремний / Н. С. Писаренко // 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2020. – С. 31.
70. Сивченко А. С. Определение основных параметров надежности КМОП процесса полупроводниковой фабрики / А. С. Сивченко, Е. В. Кузнецов // Электронные компоненты, 2018. – № 10. – С. 8 – 13.
71. Solodukha V. A. Reliability express control of the gate dielectric of semiconductor devices / V. A. Solodukha, G. G. Chigir, V. A. Pilipenko, V. A Filipenya // Devices and methods of measurements, 2018. – No 9(4). – P. 308 – 313.
72. Markov S. Gate leakage variability in nano-CMOS transistor / S. Markov // Department of electronics and electrical engineering, University of Glasgow, 2009. – 161 p.
73. Fu C. H. A low gate leakage current and small equivalent oxide thickness MOSFET with Ti/HfO₂ high-k gate dielectric / C. H. Fu, K. S. Chang-Liao, Y. A. Chang, Y. Y. Hsu, T. H. Tzeng, T. K. Wang, D. W. Heh, P. Y. Gu, M. J. Tsai // Microelectronic engineering, 2011 – Vol.88. – Issue 7. – P. 1309 – 1311.

74. Солодуха В. А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных полевых MOSFET транзисторов / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Доклады БГУИР, 2018 г. – №5 (115). – С. 99 – 103.

75. Панкратов Е. Л. О способе увеличения интеграции элементов в схеме приемного компаратора/ Е. Л. Панкратов // Радиоэлектроника, 2019 г. – №1. – С. 1684-1719.

76. Аноприенко А. Я. Закономерности развития компьютерных технологий и обобщенный закон Мура / А. Я. Аноприенко // Вестник донецкого национального технического университета, 2016. – С. 3 –17.

77. Бадаев А. С. Современные технологические процессы изготовления биполярных и полевых структур: учеб. пособие / А. С. Бадаев, Ю. С. Балашов. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012 г. – 314 с.

78. Денисенко В. Новые физические эффекты в нанометровых МОП-транзисторах/ В. Денисенко // Компоненты и технологии, 2009. – № 12. – С.157 – 162.

79. Дурнаков А. А. Физические основы микро- и наноэлектроники: учеб. пособие/ А. А. Дурнаков. – Мин-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 247 с.

80. Тихомиров П. Моделирование деградации и обратимых отказов полупроводниковых с использованием TCAD Sentaurus / П. Тихомиров, П. Пфеффли, Р. Боргес // Электроника, 2015. – №10 (00150). – С. 142 – 149.

81. Строгонов А. В. Проектирование топологии КМОП заказных БИС: учеб. пособие. Ч.1 / А. В. Строгонов. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2004. – 251 с.

82. Шумилин С. Радиационно-стойкие микросхемы от компании «Миландр» / С. Шумилин, П. Леонов // Компоненты и технологии, 2015. – №7. – С. 76 – 79.

83. Строганов А. В. Проектирование топологии КМОП заказных БИС / А.В. Строганов // Компоненты и технологии, 2007 г. – №3. – С. 156 – 160.

84. Строганов А.В. Учет резистивно-емкостных эффектов при проектировании цифровых БИС по субмикронным проектным нормам / А. В. Строганов, С. Цыбин // Компоненты и технологии, 2010. – № 9. – С. 141 – 144.
85. Легостаев Н. С. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов, П. Е. Троян. – Томск: Эль контент, 2011. – 244 с.
86. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие для вузов / В. И. Гаман – Томск: Издательство Томского университета, 1989. – 347 с.
87. Pat. 9748369 USA, H01L 29/735, H01L 29/66. Lateral bipolar junction transistor (BJT) on a silicon-on-insulator (SOI) substrate / Liu Qing, – №20160380087. – 4 p.
88. Hammd O. Thin film silicon-on-insulator of bipolar junction transistor: process fabrication and characterization technology / O. Hammd, S. Othman, A. I. Kamarul // International journal of engineering science and technology, 2010. – №2 (5). – P.1037 – 1046.
89. Balakrishnan K., Bedell S. W., Hashemi P., Hekmatshoartabari B., Reznicek A. Superlattice lateral bipolar junction transistor // патент США №9666669 опубли. 30.05.2017г.
90. Пат. 2108640 Российская Федерация, МПК H01L 29/72. Биполярный транзистор интегральной схемы / Сауров А. Н. – №97103813/25. – 4 с.: ил.
91. Sun I-Shan M. A RF lateral BJT on SOI for realization of RF SOI-BiCMOS technology / M. Sun I-Shan, W.T. Ng, H. Mochizuki, K. Kanekiyo, T. Kobayashi, M. Toita, H. Ishikawa, S. Tamura, K. Takasuka // IEEE, Conference: Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2006 – P. 50 – 53.
92. Кулаков В. М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники: учеб. пособие. Под ред. Е. А. Ладыгина / В. М. Кулаков, В. И. Шаховцов, Е. А. Ладыгин. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
93. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие / А. И. Лебедев. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.

94. Парфенов В.В. Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие / В. В. Парфенов, Р. Х. Закиров, Н.В. Болтакова. – Казань, 2004. – 56 с.

95. Пат. 176988 Российская Федерация, МПК H01L 29/88. Стабилитрон / А. Л. Якимаха – № 4104604/24-07. Бюл. № 5. – 2 с.: ил.

96. Пат. 191748, Российская Федерация, МПК G05F 1/567. Компенсационный стабилизатор постоянного напряжения / С. Н. Бондарь, М. С. Жаворонкова – №2018147829. Бюл. № 28. – 3 с.: ил.

97. Пат. 1188824 СССР, МПК H02H 3/20, H02H 7/12. Устройство для защиты от перенапряжений электропотребителя / А. Д. Абельсон, А. И. Евтодьева, Н. М. Казакова и др. – №3706136. Бюл. № 40 – с. 2: ил.

98. Пат. 165163 Российская Федерация МПК G05F 1/56. Стабилизатор постоянного напряжения / С. Н. Бондарь, М. С. Жаворонкова – № 2015157223/08. – 5 с.: ил.

99. Пат. 830369 СССР МПК G05F 3/08, H02H 3/20. Ограничитель постоянного напряжения / А. И. Селиванов, В. А. Логинов – №2798881. – 2 с.: ил.

100. Тип-348 контроль электрофизических параметров тестовых элементов СБИС, филиал ФГУП РЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Россия, Нижний Новгород, Бокс №486, 603952.

101. 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, 2022. – Вып.1 (264). – С. 31 – 38.

102. Фадеев А. В. Модель термического окисления кремния / А. В. Фадеев, Ю. Н. Девятко // Журнал технической физики, 2019. – Том 89. – Вып. 4. – С. 620 – 626.

103. 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, 2021. – Вып. 4 (263). – С. 31 – 38.

104. Norquist D. L. DOD command, and communications (C3) modernization strategy / D. L. Norquist // Fully networked, Enabling globally integrated operations, Ensuring a more lethal joint force, 2020. – P. 38.

105. Петросянц К. О. TCAD-моделирование дозовых радиационных эффектов в суб-100-нм high-k МОП-транзисторных структурах / К. О. Петросянц, Д. А. Попов, Д. В. Быков // Электроника, 2017. – Т. 22. – № 6. – С. 569 – 581.

106. Таперо К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения: учеб. пособие / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М. – 2009. – 244 с.

107. Александров О. В. Модель термического окисления кремния на фронте объемной реакции / О. В. Александров, А. И. Дусь // Физика и техника полупроводников, 2008. – Том 42. – Вып. 11. – С. 1400 – 1406.

108. Неизвестный И. Г. Формирование нанокристаллов кремния в гетероструктурах Si – SiO₂ – α -Si – SiO₂ при высокотемпературных отжигах / И. Г. Неизвестный, В. А. Володин, Г. Н. Камаев, С. Г. Черкова, С. В. Усенков, Н. Л. Щварц // Эксперименты и моделирование, Автометрия, 2016. – Т. 52. – №5. – С. 84 – 96.

109. Белоус А. И. Космическая электроника: учеб. пособие. Книга 2 / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – Москва: Техносфера, 2015. – 488 с.

110. Шоболова Т. А. Исследование влияния гамма-воздействия на токи утечки транзисторов с проектными нормами 100 нм / Т. А. Шоболова, В. В. Гасенин, С. В. Оболенский, Е. Л. Шоболов, А. В. Боряков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2022. – Вып. 2 (265). – С. 10 – 17.

111. Пат. 6960810 USA, H01L 27/01. Self-aligned body tie for a partially depleted SOI device structure / P. Fechner, – №20030222313. – 4 p.

112. Асламазов Л. Напряженность, напряжение, потенциал / Л. Асламазов // Квант, 1978. – №5. – С. 38 – 43.

113. 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, 2020. – Вып. 3 (258). – С. 34 – 42.

114. Пат. 6154091 USA, H01L 25/00. SOI sense amplifier with body contact structure / J. P. Pennings, G. E. Smith, M. H. Wood, – №09/324498 – 3 p.

115. Шоболова Т. А. Кремниевый металл-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, 2021. – Т. 55. – Вып.10. – С. 916 – 921.

116. Пат. 2758413 Российская Федерация, МПК H01L 29/78. Способ изготовления транзистора с зависимым контактом к подложке / Т. А. Шоболова и др., – №2021102956. Бюл. № 31. – 3 с.: ил.

117. 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 2020. – №12. – С. 239 – 241.

118. Пат. 2739861 Российская Федерация, МПК H01L 29/78, H01L 21/20. Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке / Т. А. Шоболова, А. С. Мокеев, – №2020110949. Бюл. № 1. – 4 с.:ил.

119. Колосницын Б. С., Мощные и СВЧ полупроводниковые приборы: учеб. пособие / Б. С. Колосницын. – Минск: БГУИР, 2008. – 151 с.

120. 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. – Вып.7. – С. 693 – 699.

121. Пожела Ю. К. Физика быстродействующих транзисторов: монография / Ю. К. Пожела. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – 261 с.

122. Богатырев Ю. В. Влияние гамма-излучения на МОП/КНИ-транзисторы / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, С. А. Сорока, С. В. Шведов, Д. А. Огородников // Доклады БГУИР, 2016. – №3 (97). – С. 75 – 80.

123. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники: учебное пособие / Г. И. Зебрев. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.

124. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: учеб. пособие / В. А. Гуртов. – Москва, 2005. – 492 с.

125. Першенков В. С. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС: учеб. пособие / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.

126. Heigl A. Correction to the Schenk model of Band-to-Band tunneling in silicon applied to the simulation of nanowire tunneling transistors / A. Heigl, A. Schenk, G. Wachutka // 2009 13TH International workshop on computational electronics, 2009. – P. 1 – 4.

127. Солдусова Е. О. Исследование зависимости токов утечки от напряженности полевого транзистора / Е. О. Солдусова // Молодой ученый, 2021. – №3(345). – С. 10 – 13.

128. Андреев Д. В. Исследование процессов генерации и эволюции центров захвата носителей в диэлектрических пленках МДП-структур / Д. В. Андреев, А. А. Столяров, А. В. Романов // Наука и образование, – 2011. – №11.– С. 29–34.

129. Пирс К. Технология СБИС: кн.1, пер. с англ. под ред. С. Зи. / К. Пирс, А. Адамс, Дж. Цай и др. – М.:Мир, 1986. – 404 с.

130. Пат. 2006881 Российская Федерация, МПК G01T 3/08 Способ определения флюенса нейтронов / А. И. Кириллов, А. Е. Ходоков – №4929481.25. – 6 с.: ил. Вологдин Э. Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов: учеб. пособие / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М.: Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. Московский государственный институт электроники и математики, 2000. – 102 с.

131. Покотило Ю. М. Радиационная стойкость кремниевых детекторов излучения / Ю. М. Покотило, А. Н. Петух, А. В. Гиро и др // Сборник трудов, 13 Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Секция 2. Радиационные эффекты в твердом теле, 2019. – С.166–168.

132. Григорьев Л. В. Кремниевая фотоника: Курс лекций (часть 1) / Л. В. Григорьев. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 94 с.

133. Obreja V. Experiments on behavior of power silicon pn junctions under reverse bias voltage at high temperature / V. Obreja, C. Codreanu, K. Nuttall, O. Buiu // Conference: Thermal and mechanical simulation and experiments in microelectronics and Microsystems, 2004.– P. 185 – 190.

134. Пат. 2783629 Российская Федерация, МПУ H01L29/00 Стабилитрон на структуре «кремний на изоляторе» / Т. А. Шоболова и др. – №2021035094. Бюл. №32 – 3 с.: ил.

НИТО
95-29-2120
№195-9529-2120/85
от 08.02.2022

Начальнику управления
интеллектуальной собственности и
научно-технической информации
В.Е. Миронову

Справка об исполнении изобретений

«Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке»

По патенту № 2739861 от 29.12.2020

В период с 12.01.2021 по 10.12.2021 подразделением 195-29-2120 в рамках темы 06845 были проведены:

- работы по совершенствованию топологии и технологии маршрута изготовления транзистора с зависимым контактом;
- работы по численному моделированию предложенной структуры.

При проведении данных работ использовались транзисторы, способ изготовления описан в патенте № 2739861 от 29.12.2020 «Способ изготовления транзистора с независимым контактом к подложке».

Результаты, полученные при использовании способа, были применены при изготовлении микросхем на КНИ по МСЛ №315 от 02.08.2021.



Зам. начальника НИО

Начальник НИО

Начальник НИТО 2120

И.М. Агарков

Е.Л. Шоболов

НИТО
95-29-2120
№195-9529-2120/1134
от 23.10.2024

Начальнику управления
интеллектуальной собственности и
научно-технической информации
В.Е. Миронову

Справка об исполнении изобретения

«Латеральный биполярный транзистор на структурах «Кремний на изоляторе» и способ его изготовления» патент № 2783629 от 15.11.2022

В период с 10.01.2023 по 23.10.2024 подразделением 195-29-2120 в рамках темы «Базука –Э – Питание» и комплексного проекта «Комплекс-В» были проведены следующие работы:

- разработка топологии и технологии изготовления БТ;
- расчет посредством численного моделирования предложенной структуры;
- совместно с ПТО 95-29-2110 изготовление макетных образцов;
- исследование ЭФП БТ.

При проведении данных работ использовались биполярные транзисторы, способ изготовления которых описан в патенте № 2767597 от 21.05.2021 «Латеральный биполярный транзистор на структурах «Кремний на изоляторе» и способ его изготовления».

Результаты, полученные при использовании способа, были применены при изготовлении микросхем на КНИ по МСЛ №333 от 31.08.2022, № 195-95-29-2110-11_60-14072 от 19.09.2023, № 195-95-29-2110-11_60-16115 от 29.11.2023, № 195-95-29-2110-11_60-14799 от 17.01.2024, № 195-95-29-2110-11_60-147712 от 14.10.2024, № 195-95-29-2110-11_60-19116 от 14.10.2024

Зам. начальника МВЦ

Начальник НПО

Начальник НИТО 2120



И.М. Агарков

Е.Л. Шоболов