

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ПРИБОРОВ»

На правах рукописи



СИДЕЛЕВ Алексей Владимирович

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ
P-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Таперо Константин Иванович

Лыткарино 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и специальных терминов	6
ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. ДЕТЕКТОРЫ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ	20
1.1 Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения и их классификация	20
1.2 Применение полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения	29
1.3 Применение и преимущества детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов.....	31
1.4 Принцип работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МОП-транзистора.....	35
1.5 Особенности работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МНОП-транзистора...	43
1.6 Характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов	51
1.7 Выводы к главе 1	54
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ	56
2.1 Определение требований к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МНОП-транзисторов для различных применений.....	56

2.2 Выбор конструкции МНОП-транзистора для использования в качестве чувствительного элемента детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения	57
2.3 Физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора...	60
2.4 Валидация физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора.....	64
2.5 Оптимизационные расчеты и выбор толщины подзатворных диэлектриков р-канальных МНОП-транзисторов для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения	69
2.6 Выводы к главе 2	80
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ Р-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ	82
3.1 Исследование возможности создания р-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции	82
3.2 Разработка топологии кристаллов р-канальных МНОП-транзисторов.....	92
3.3 Разработка технологического маршрута изготовления р-канальных МНОП-транзисторов.....	102
3.4 Приборно-технологическое моделирование р-канальных МНОП-транзисторов.....	107

3.5 Выбор типа корпуса для детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов	110
3.6 Изготовление детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов.....	113
3.7 Выводы к главе 3	117
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ Р-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ.....	119
4.1 Выбор рабочего тока для измерения информативного параметра детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора.....	120
4.2 Исследование радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора при облучении в режиме с постоянным током стока	124
4.3 Исследование зависимости радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе	128
4.4 Исследование зависимости радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора от полярности напряжения на затворе.....	131
4.5 Результаты измерения радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными	

элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, изготовленных в соответствии с требуемыми характеристиками	136
4.6 Выводы к главе 4	143
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ (ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ).....	146
5.1 Дозиметр для работы с детекторами поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов	146
5.2 Применение детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний	151
5.3 Применение детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов в <i>in vivo</i> дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ	153
5.4 Выводы к главе 5	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
Благодарности.....	160
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	161
Публикации автора по теме диссертации.....	174
Приложение 1	179
Приложение 2	181
Приложение 3	182
Приложение 4	183
Приложение 5	185

Список сокращений и специальных терминов

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ИИ – ионизирующее излучение

ИЛ – ионное легирование

КА – космический аппарат

КМОП-технология – технология производства интегральных микросхем на основе n-канальных и p-канальных МОП-транзисторов

МДП-транзистор (МДПТ) – транзистор со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник»

МОП-транзистор (МОПТ) – транзистор со структурой «металл – диоксид кремния – полупроводник»

МНОП-транзистор (МНОПТ) – транзистор со структурой «металл – нитрид кремния – диоксид кремния - полупроводник»

МЭМС – микроэлектромеханическая система

НИР – научно-исследовательская работа

НЭМС – наноэлектромеханическая система

ОИАЭ – объект использования атомной энергии

ОКР – опытно-конструкторская работа

ОПЗ – область пространственного заряда

ПНЧ – преобразователь напряжение-частота

ПФЛ – проекционная фотолитография

ПХТ – плазмохимическое травление

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

ЧЭ – чувствительный элемент

n-МОПТ – n-канальный МОП-транзистор

p-МОПТ – p-канальный МОП-транзистор

p-МНОПТ – p-канальный МНОП-транзистор

in vivo – на живом организме

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы диссертации

В настоящее время в науке и технике применяется множество детекторов ионизирующего излучения (ИИ), имеющих не только различное назначение, но и различные конструкции, материалы чувствительного элемента (ЧЭ) и принципы работы. Особым классом выделяются детекторы ИИ с полупроводниковыми ЧЭ, разрабатываемыми на основе не только простых, как кремний, германий, алмаз (модификация углерода), но и сложных полупроводниковых материалах, таких как: арсенид галлия, карбид кремния, теллурид кадмия, диоксид титана и других полупроводниках. Рассматривая самый распространенный и технологичный полупроводниковый материал – кремний (Si), необходимо отметить, что только на его основе разрабатываются и изготавливаются целые классы детекторов ИИ, различающиеся следующими характеристиками:

- конструкция чувствительного элемента (резисторная, диодная, транзисторная);
- информативный параметр (напряжение, ток);
- тип регистрируемого излучения (альфа-, бета-, гамма-, нейтронное излучение и др.);
- температурный режим применения (охлаждаемые и неохлаждаемые);
- способность различать энергию и интегральные потоки (спектрометрические и несспектрометрические);
- технология изготовления (поверхностно-барьерные, диффузионные с p-n-переходом, диффузионно-дрейфовые и др.);
- возможность регистрации координаты (некоординатный, стриповый или однокоординатный, пиксельный или координатно-чувствительный);
- другие характеристики.

К настоящему моменту в мире проблематикой разработки и создания полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения занимается достаточно большое количество научных групп и за несколько десятилетий было создано

огромное многообразие детекторов. Автором данной диссертации с 2008 года проводились работы по созданию и исследованию детекторов ионизирующего излучения на основе различных полупроводниковых материалов для разнообразных применений, что отражено в списке публикаций по теме диссертации. На основании ранее проведенных исследований был сделан вывод, что для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в различных радиационных условиях наиболее оптимальным решением является применение полупроводниковых детекторов с чувствительными элементами на основе транзисторов со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП-транзистор).

Использование детекторов ИИ с ЧЭ на основе МДП-транзисторов для измерения поглощенной дозы обусловлено целым рядом преимуществ, таких как: простота аппаратуры считывания значений информативного параметра (информативный параметр – напряжение, пропорциональное поглощенной дозе ИИ), относительная простота изготовления и низкая стоимость чувствительного элемента, малый размер чувствительного элемента, возможность измерения поглощенной дозы ИИ в режиме «online», возможность применения в условиях воздействия ИИ со смешанным составом, определение дозы, поглощенной непосредственно в полупроводниковом кристалле ЧЭ с учетом влияния защитного действия всех имеющихся конструктивных элементов, низкое энергопотребление.

Наиболее широко детекторы ИИ с ЧЭ на основе МДП-транзисторов применяются для контроля дозовых нагрузок на борту космических аппаратов. Аналогичные детекторы ионизирующего излучения применяются в ядерной медицине для контроля поглощенной дозы, получаемой пациентом во время сеансов лучевой терапии, так называемой *in vivo* дозиметрии, что дословно переводится, как измерение дозы на живом организме (теле человека). Детекторы, разрабатываемые для данных задач, могут существенно отличаться в части требований, предъявляемых к их радиационной чувствительности и диапазону измеряемых значений поглощенной дозы. В абсолютном большинстве случаев в качестве чувствительных элементов применяются р-канальные МОП-транзисторы

(p-МОПТ) с диоксидом кремния (SiO_2) в качестве подзатворного диэлектрика. Применение детекторов с ЧЭ на основе p-МОПТ также достаточно распространено для контроля поглощенной дозы ИИ в радиационных экспериментах и испытаниях. Во многом это обусловлено возможностью применения серийно выпускаемых МОП-транзисторов (как дискретных, так и транзисторов из состава КМОП интегральных схем), что существенно упрощает разработку дозиметрической системы. Однако передовые решения, обладающие превосходством по своим характеристикам, в первую очередь, по радиационной чувствительности, рабочему диапазону и точности измерения поглощенной дозы, как правило, получаются в случае использования специально разработанных под планируемые задачи ЧЭ.

Несмотря на свое широкое распространение, а также на перечисленные выше достоинства, детекторы ИИ с ЧЭ на основе p-МОПТ обладают рядом недостатков, к основным из которых можно отнести:

- низкую радиационную чувствительность в режиме измерения информативного параметра (отрицательное напряжение на затворе), для увеличения которой требуется переключаться из режима измерения информативного параметра в режим накопления заряда (положительное напряжение на затворе) и обратно, что приводит к сильному дрейфу информативного параметра и, как следствие, росту погрешности измерения поглощенной дозы;

- фединг (эффект отжига), приводящий к изменению информативного параметра при длительной эксплуатации, например, на борту космического аппарата, и росту погрешности определения поглощенной дозы ИИ;

- нелинейность калибровочной кривой: зависимость порогового напряжения от поглощенной дозы ИИ имеет нелинейный характер, что приводит к увеличению погрешности в измерении дозы.

Известно, что в качестве подзатворного диэлектрика при разработке и изготовлении МДП-транзисторов используется не только диоксид кремния, но и различные диэлектрические материалы, включая их комбинации. Интересной особенностью обладают транзисторы со структурой «металл – нитрид кремния –

диоксид кремния – полупроводник» (МНОП-транзисторы, МНОПТ), где в качестве подзатворного диэлектрика используется комбинация диоксида кремния и нитрида кремния (Si_3N_4): граница раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ является областью захвата заряда, на которой накапливается как положительный, так и отрицательный заряд. За счет данного свойства границы раздела диэлектриков МНОПТ, в частности, используют в качестве ячейки энергонезависимой флеш-памяти, а при использовании в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ можно получить чувствительные элементы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с ЧЭ на основе p-МОПТ, таких, как:

- более высокая радиационная чувствительность при отрицательном напряжении на затворе в режиме измерения информативного параметра и режиме накопления заряда;
- линейность калибровочной кривой, приводящая к уменьшению погрешности измерения поглощенной дозы ИИ;
- отсутствие фединга, что дает возможность хранить информацию о поглощенной дозе ионизирующего излучения более 5 лет, и отсутствие зависимости от рабочей температуры непосредственно при измерениях дозы;
- отсутствие зависимости от мощности дозы ионизирующего излучения.

Как уже упоминалось выше, специфика конкретных условий применения, как правило, характеризуется своими требованиями к параметрам ЧЭ детекторов, применяемых для измерения поглощенной дозы ИИ. Причем стремление улучшить какие-то конкретные характеристики во время разработки ЧЭ часто упирается в существующие противоречия. Например, попытки повысить радиационную чувствительность ЧЭ на основе p-МОПТ, определяемую как изменение информативного параметра, приходящееся на единицу поглощенной дозы, за счет увеличения толщины подзатворного SiO_2 приводят к существенному сокращению рабочего диапазона измеряемых доз вследствие нелинейности дозовой зависимости информативного параметра, а кроме этого, такие попытки упираются в технологические ограничения по максимальной толщине подзатворных SiO_2 в составе транзисторов. При повышении чувствительности детектора с ЧЭ на основе

p-MOПT за счет выбора электрического режима (облучение транзистора в закрытом состоянии при подаче на затвор положительного напряжения; измерение информативного параметра в открытом состоянии транзистора – на затворе отрицательное напряжение) повышается погрешность измерения поглощенной дозы, связанная с дрейфом информативного параметра при переключениях режимов работы транзистора. Увеличение планируемого срока эксплуатации ЧЭ в условиях воздействия ИИ всегда приводит к необходимости учета влияния эффектов отжига на погрешность измерения поглощенной дозы. Исходя из этого, можно заключить, что существует важная и актуальная **научно-техническая задача**, требующая своего решения: разработка в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для широкого спектра условий применения. Тематика исследований и разработок в рамках настоящей диссертации направлена на решение данной научно-технической задачи, и поэтому является актуальной. В ходе исследований за основу был выбран технологический вариант ЧЭ на основе p-канальных МНОП-транзисторов (p-MНОПТ), учитывая уже отмеченный ранее целый ряд преимуществ данного конструктивно-технологического варианта.

Целью диссертации является разработка и научное обоснование конструкции затворных систем и режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе p-канальных МНОП-транзисторов для различных применений.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие **задачи**:

- определить требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для применения в *in vivo* дозиметрии, в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (РЭА КА) и на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ;

- разработать физическую модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ;
- провести расчет конструкции диэлектрических слоев подзатворного диэлектрика, состоящего из Si_3N_4 и SiO_2 , для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для каждого из применений;
- разработать топологию р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;
- разработать технологию изготовления р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с различными толщинами диэлектрических слоев;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от режимов работы при облучении;
- разработать схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см.
2. Показано, что нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела

$\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

3. Показано, что радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе вначале растет вследствие увеличения выхода заряда, связанного с ростом напряженности электрического поля в SiO_2 , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в SiO_2 и(или) в Si_3N_4 .

4. Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si .

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны новые детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для различных применений, позволяющие получать наиболее точные значения измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения в режиме реального времени за счет высокой радиационной чувствительности и проводить измерения в широком диапазоне доз;

- определены оптимальные конструкции затворных систем и режимы работы р-МНОПТ, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения для различного применения, позволяющие получать наиболее достоверные данные в требуемых условиях применения;

- в рамках единой конструктивно-технологической концепции изготовлены два типа детекторов поглощенной дозы ИИ с высокой радиационной чувствительностью и широким диапазоном измеряемых доз с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих четыре варианта толщины подзатворных Si_3N_4 и SiO_2 , охватывающие широкий спектр условий применения, что позволило значительно унифицировать дозиметры для работы с детекторами данного типа, а также технологию изготовления детекторов;

- определены оптимальные электрические режимы работы детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от требований и условий применения, что позволяет получать наилучшие характеристики детекторов;

- разработаны и изготовлены дозиметры, работающие с детекторами поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, для применения в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний, а также применения в *in vivo* дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ, что дало возможность скорейшему внедрению разработанных детекторов в промышленность.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается их внедрением в промышленность при выполнении ряда НИР и ОКР в АО «НИИП», АО «Российские космические системы», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», а также в учебный процесс подготовки студентов по направлению «Электроника и нанoeлектроника» в НИТУ МИСИС и учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» по дисциплинам: «Инструментальные средства информационных систем», «Программирование на языке VHDL и проектирование микроэлектронных устройств» и «Алгоритмы проектирования микроэлектронных устройств». В приложении к диссертации представлены акты внедрения от следующих организаций:

- АО «НИИП» (приложение 1);
- НИТУ МИСИС (приложение 2);

- ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» (приложение 3);
- АО «Российские космические системы» (приложение 4);
- ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» (приложение 5).

Методология и методы исследования

В рамках данной диссертации изначально был проведен детальный анализ и классификация полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, включая области их применения, входе которого был сделан вывод, что для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в различных радиационных условиях наиболее оптимальным решением является применение полупроводниковых детекторов с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов и наиболее подходящим является р-МНОПТ. Для прогнозирования радиационного отклика детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ была разработана физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора. Проведенное исследование возможности создания р-МНОПТ для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с различными толщинами подзатворных диэлектриков Si_3N_4 / SiO_2 и требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции показало возможность создания таких транзисторов. Для создания р-МНОПТ с необходимыми затворными системами была разработана топология кристаллов транзисторов, разработан технологический маршрут их изготовления и проведено приборно-технологическое моделирование. На изготовленных детекторах поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ были измерены электрические характеристики, а также исследованы радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз в зависимости от конструкции затворной системы и режима работы детектора во время облучения, которые показали высокую степень совпадения с расчетами.

Основным методом исследования детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ являлось измерение их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и измерение

информативного параметра детекторов в различных электрических схемах работы при воздействии ионизирующего излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см.

2. Эффект нелинейности дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока, являющийся следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

3. Зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе во время воздействия ионизирующего излучения, имеющая немонотонный характер с выраженным максимумом.

4. Радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора, характеризуемая близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра, определяемые захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ при отрицательном напряжении на затворе, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si .

5. Конструкции затворных систем р-канальных МНОП-транзисторов, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения и режимы работы детекторов для получения необходимой радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз при заданных условиях применения.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной обработкой экспериментальных данных, использованием общепринятых или применяемых в АО «НИИП» методик исследований, использованием аттестованного и поверенного оборудования и приборов, а также согласованностью результатов моделирования и экспериментальных исследований, и соответствием результатов данной диссертации исследованиям, проведенным другими учеными.

Апробация работы. Основные результаты по теме диссертации докладывались на:

- 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2021» в 2021 году;
- Научно-технической конференции «Ядерное приборостроение. Актуальные вопросы разработки, производства, эксплуатации. Метрология ионизирующих излучений» в 2021 году;
- 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022» в 2022 году;
- Научно-технической конференции «Ядерное приборостроение: история, современность, перспективы» в 2022 году;
- 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023» в 2023 году;
- 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024» в 2024 году;
- 28-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2025» в 2025 году.

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, определении цели и постановке задач данной диссертации, разработке программ и

методик исследований радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в разном конструктивно-технологическом исполнении и различных условиях эксплуатации, обсуждении полученных экспериментальных данных с научным руководителем и главным научным сотрудником АО «НИИП». При непосредственном участии автора была разработана физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ. Лично автором были проведены расчеты, выбраны толщины подзатворных диэлектриков р-МНОПТ, а также обоснованы режимы работы для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ для широкого спектра применения. Автором самостоятельно было проведено расчетное исследование возможности изготовления р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ и разработан технологический маршрут изготовления р-МНОПТ. Под руководством научного руководителя и участии главного научного сотрудника АО «НИИП» были подготовлены основные публикации и доклады на конференциях по теме диссертационной работы.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств по следующим пунктам:

1. Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин.

2. Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

3. Исследование и разработка схмотехнических основ создания, конструкций и методов совершенствования изделий по п. 1.

4. Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1.

5. Исследование, проектирование и моделирование изделий, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 9 научных работах: 7 из них в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science, а также в 20 тезисах докладов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 186 страниц, содержит 77 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 100 наименований.

ГЛАВА 1. ДЕТЕКТОРЫ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

1.1 Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения и их классификация

С момента своего существования человек познает природу, сущность природных явлений и пытается получить ответы на множество вопросов. Ответы на вопросы находятся посредством проведения научных экспериментов в которых используются совершенно различные приборы, регистрирующие те или иные характеристики. Общедоступными приборами для регистрации являются чувствительные органы человека, но на данный момент наука шагнула так глубоко, что применение таких «приборов» уже давно не отвечает требованиям проводимых экспериментов. Для многих экспериментов и исследований в настоящее время требуется большое количество разнообразных приборов и детекторов для проведения измерений или регистрации каких-либо событий. Для изучения как микроструктур, так и структуры вселенной, а также объяснения различных эффектов, происходящих в материалах, веществах и аппаратуре в космическом пространстве необходимо уметь регистрировать ионизирующее излучение [1]. Ионизирующее излучение – поток заряженных элементарных частиц (электроны, протоны, нейтроны), атомных ядер (тяжелые заряженные частицы) или фотонов (рентгеновские и гамма-кванты), способных ионизировать вещество, а также вторичных частиц или квантов, являющихся следствием ядерных превращений при взаимодействии первичных частиц с веществом. Источники ионизирующих излучений могут быть как природными, так и искусственными [2].

Для решения задач по регистрации широкого диапазона энергий ионизирующих излучений: от 10^{-5} эВ фонового излучения космического пространства до 10^{20} эВ космического излучения высоких энергий, на протяжении

многих десятилетий создаются детекторы, с помощью которых можно измерять такие характеристики ионизирующего излучения, как энергия, время, скорость, импульс, доза и пр. [1, 3]. Детектор ионизирующего излучения – это прибор, преобразующий энергию ионизирующего излучения в другой вид энергии, удобный для регистрации и/или дальнейшего преобразования с целью измерения какой-либо характеристики воздействующего на детектор излучения. Детектор ИИ состоит главным образом из чувствительного элемента, основанного на определенном веществе или материале, в котором и происходит преобразование энергии. ЧЭ может как всем своим объемом, так и только частью своего объема преобразовывать энергию ИИ в полезный выходной сигнал, поэтому объем чувствительного элемента (или детектора) в котором происходит преобразование энергии ионизирующего излучения, приводящее к появлению полезного выходного сигнала, называется чувствительной областью [3].

Основными видами детекторов ионизирующего излучения являются [1, 4]:

1. Ионизационная камера, представляющая собой газовый детектор, способный измерять ионизационные потери частицы или фотона, а также ее (его) энергию в случае, если частица или фотон полностью поглощаются в ионизационной камере. Стоит отметить, что в ионизационных камерах в качестве рабочей среды используется не только газ или газовая смесь, но также может использоваться жидкое или даже твердое вещество. Принцип работы ионизационной камеры состоит в следующем: при попадании ионизирующей частицы в рабочую среду камеры в ней образуются носители заряда (ионы и электроны), которые под действием электрического поля разделяются и создают электрический ток.

2. Детекторы на основе сцинтиллятора, состоящие в первую очередь из сцинтилляционного чувствительного элемента, который преобразует энергию ионизирующего излучения в видимый свет и передает его через какой-либо световод на фотодетектор (фотодиод, фототранзистор, фотоэлектронный умножитель или твердотельный фотоэлектронный умножитель), который в свою очередь преобразует видимый световой сигнал в электрический. На данный момент

используется большое количество различных сцинтилляционных материалов, которыми могут быть как неорганические кристаллы, так и органические соединения или газы.

3. Термолюминесцентные детекторы, использующиеся, как правило, при дозиметрии космического излучения и на установках, моделирующих данный вид излучения, а также для индивидуальной дозиметрии. Используются в качестве термолюминесцентных детекторов, в основном, кристаллы фторида лития (LiF) и фторида кальция (CaF_2) активированные марганцем и/или титаном. При нагревании термолюминесцентных кристаллов до температуры 400 °С поглощенная энергия высвобождается в виде фотонов светового излучения, которое пропорционально поглощенной дозе ионизирующего излучения.

4. Полупроводниковые детекторы, представляющие собой ионизационные камеры с полупроводниковым материалом в качестве чувствительной среды. Чувствительной средой данных детекторов служат не только простые полупроводниковые материалы, такие как германий, кремний, алмаз (модификация углерода), но и сложные полупроводниковые соединения: арсенид галлия, карбид кремния, теллурид кадмия, диоксид титана и другие [5 – 22].

Классификация детекторов ионизирующего излучения – задача довольно непростая, так как большое количество различных детекторов изначально классифицировалось по регистрируемому излучению и типу вещества, взаимодействующего с излучением, а далее, в связи получением новых материалов, развитии технологий и формулировании новых требований к детекторам их стали классифицировать по возможности регистрации координат (некоординатный, стриповый или однокоординатный, пиксельный или координатно-чувствительный), способности различать энергию (спектрометрические и неспектрометрические) и интегральные потоки излучения, по возможности измерения поглощенной дозы, по температурному режиму (охлаждаемые и неохлаждаемые), по технологии изготовления, по информативному параметру детектора, по скорости получения информации (немедленного и замедленного

действия), а также по наличию или отсутствию внутреннего усиления сигнала и другим признакам [1 – 22].

Далее приведена классификация полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения и их основные конструкции в зависимости от технологии изготовления.

1. Детектор с р-n переходом (рисунок 1). Изготавливают такой детектор по планарной технологии путем диффузии легирующей примеси высокой концентрации одного типа, как правило р-типа, в полупроводниковую подложку другого типа (n-типа), получая диод, база которого слабо легирована [5]. При приложении обратного смещения к такому детектору область пространственного заряда (ОПЗ) будет распространяться в основном в сторону слаболегированной базы и тем самым образовывать чувствительную область детектора. Заряд, образовавшийся в данной чувствительной области детектора при воздействии ионизирующего излучения, под действием приложенного электрического поля дрейфует к контактам детектора и определяет выходной сигнал.

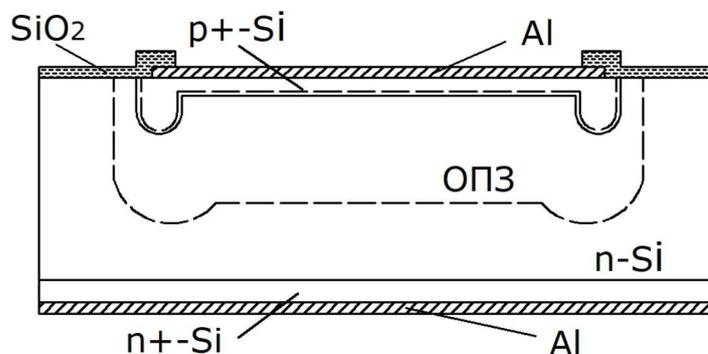


Рисунок 1 – Конструкция детектора с р-n переходом

2. Ионно-имплантированный детектор, представляющий собой такую же диодную структуру как у детектора с р-n переходом, за исключением того, что область с высокой концентрацией носителей заряда получена ионной имплантацией, а не диффузией [18]. Сильно легированная область детектора является нечувствительной к ионизирующему излучению в аспекте влияния на информативный параметр или сбора заряда, в отличие от области

пространственного заряда, образующей чувствительную область детектора в слаболегированном полупроводнике. Поэтому, что особенно важно для спектрометрических детекторов и для детекторов заряженных ионов или фотонного излучения с малыми энергиями, необходимо иметь как можно более тонкое входное окно (сильнолегированную область), чтобы большая часть радиационно-индуцированного заряда, наведенного ионизирующим излучением, образовывалась в чувствительной области детектора. К примеру, пробег альфа-частицы с энергией 3,5 МэВ в кремнии составляет ~ 15 мкм, а толщина входного окна ионно-имплантированного детектора может составлять величину порядка 0,08 мкм [13].

3. Поверхностно-барьерный детектор. Состоит такой детектор из слаболегированного или высокоомного полупроводника, с одной стороны которого сформирован барьер Шоттки (выпрямляющий контакт), а с другой омический контакт [14, 23, 24]. Если имеем полупроводник n-типа, то прикладывая отрицательный потенциал на барьерный контакт, область пространственного заряда начинает распространяться в слаболегированном полупроводнике, образуя чувствительную область детектора. По сути, детектор данной конструкции, является аналогом детектора с p-n переходом и изготавливался ранее, до широкого применения технологии ионной имплантации, для получения тонкого входного окна, так как толщина выпрямляющего контакта может быть создана значительно менее 1 мкм.

4. Диффузионно-дрейфовый или p-i-n детектор. Чувствительной областью кремниевого p-i-n детектора является i-область с концентрацией носителей заряда близкой к собственной $\sim 10^{14}$ см⁻³ (в реальности достичь полной компенсации не удастся), в которой образуется область пространственного заряда уже при малом обратном смещении. Достигается такая концентрация носителей заряда в i-области путем дрейфа ионов лития в кремнии p-типа проводимости: ионы лития под действием электрического поля, при приложении обратного смещения к структуре и при температуре порядка 100 °С, движутся из n-области, образованной диффузией лития, в p-область кремния по пути компенсируя исходную

акцепторную примесь бора [14]. На рисунке 2 изображено распределение ионов лития и напряженности электрического поля в идеальной p-i-n структуре. Хотелось бы отметить, что технология получения кремния и германия с собственным типом проводимости в мире на данный момент отсутствует, хотя серийно выпускаются кремниевые пластины с удельным сопротивлением 40 кОм·см и даже есть пластины с удельным сопротивлением порядка 100 кОм·см, но получение полупроводникового материала с таким удельным сопротивлением – очень дорогостоящий процесс.

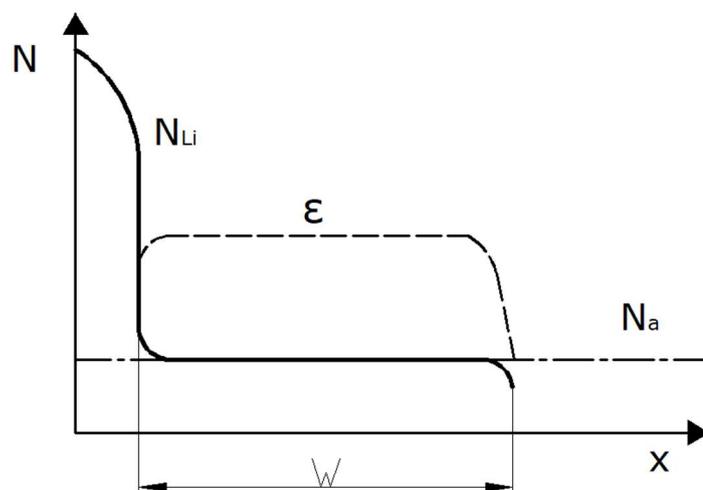


Рисунок 2 – Распределение ионов лития и напряженности электрического поля в идеальной p-i-n структуре

В мире хорошо известны диффузионно-дрейфовые детекторы на основе германия и кремния: германий-литиевые (Ge(Li)) и кремний-литиевые детекторы (Si(Li)), но так как литий очень подвижен в полупроводнике, то хранить Ge(Li) детекторы следует при низкой температуре порядка 77 К, Si(Li) детекторы можно хранить и при комнатной температуре. Детекторы такой конструкции создаются для получения большой чувствительной области и применяются для спектрометрии, где требуется высокое энергетическое разрешение, а также для регистрации ионизирующего излучения, имеющего малое сечение взаимодействия с кремнием и германием.

5. Детектор с меза-структурой представляет собой полупроводниковый детектор с p-n переходом или барьером Шоттки на краю чувствительной области которого методом химического или плазменного (ионно-химического) травления формируются канавки значительно глубже p-n перехода или барьера Шоттки, которые затем пассивируются диэлектрическим материалом [25, 26]. На рисунке 3 изображена конструкция полупроводникового детектора с меза-структурой. Предыдущие конструкции детекторов, рассмотренные выше, изготавливаются по планарной технологии и не предполагают технологических операций травления полупроводникового материала (за исключением p-i-n детекторов, торцы кристалла которого обтачиваются перед операцией дрейфа ионов лития для уменьшения поверхностного тока утечки по торцам кристалла и создания равномерного электрического поля в объеме детектора).

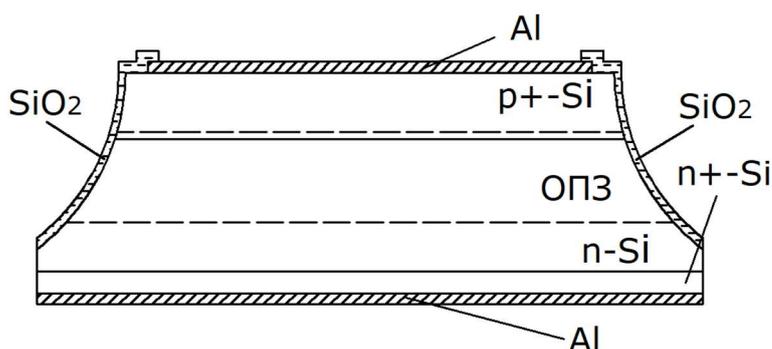


Рисунок 3 – Полупроводниковый детектор с меза-структурой

Обычно меза-структуры изготавливают в случаях, когда необходима небольшая площадь поверхности детектора и требуется приложение большого обратного напряжения, например, для регистрации импульсного гамма излучения с высокой плотностью потока фотонов. В конструкции детектора с меза-структурой удастся уйти от расположенных на поверхности лицевой области кристалла, изготовленного по планарной технологии, делительных и охранных колец, необходимых детектору для того, чтобы область пространственного заряда не выходила на поверхности слишком близко к контакту и тем самым не создавала на поверхности область с высокой напряженностью электрического поля, которая увеличивает вероятность электрического пробоя, а также для того, чтобы область

пространственного заряда не выходила на край кристалла (охранное кольцо ограничивает область пространственного заряда по периметру) для уменьшения токов утечки и уменьшения вероятности электрического пробоя.

6. Детектор на основе полуизолирующего полупроводникового материала. В предыдущих пунктах классификации рассматривались основы работы полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, имеющих р-n переход или барьер Шоттки, то есть в одном и другом случае чувствительной областью детектора является область пространственного заряда, образующаяся при подаче обратного смещения. Но, есть еще полуизолирующие полупроводниковые материалы с большим удельным сопротивлением. На такой полупроводник с двух сторон наносятся металлические контакты, между которыми подается напряжение для получения требуемой эффективности сбора заряда и весь объем полупроводникового материала между контактами является чувствительной областью. При использовании таких материалов нет необходимости создавать р-n переход или выпрямляющий контакт для получения чувствительной области и данный детектор можно с полной уверенностью называть твердотельной ионизационной камерой. Примерами таких полуизолирующих полупроводниковых материалов могут служить: GaAs, компенсированный хромом, с удельным сопротивлением до 10^9 Ом·см (GaAs(Cr)) [19, 20], тройное полупроводниковое соединение кадмий-цинк-теллур (CdZnTe или CZT) и алмаз. На рисунке 4 представлена конструкция детектора на основе полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного хромом.

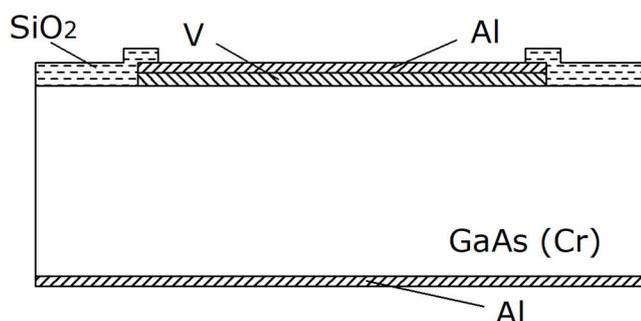


Рисунок 4 – Конструкция детектора на основе полуизолирующего GaAs (Cr)

7. Детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МДП-транзистора (МДПТ). Чувствительной областью такого детектора является подзатворный диэлектрик, накапливающий в себе радиационно-индуцированный заряд при воздействии на детектор ионизирующего излучения [27 – 31]. И несмотря на то, что чувствительной областью данного детектора является подзатворный диэлектрик, а не полупроводниковый материал, его в полной мере можно считать полупроводниковым детектором, так как изготавливается он по МОП-технологии на полупроводниковой подложке и подзатворный диэлектрик является неотъемлемой частью МДПТ. На рисунке 5 изображена конструкция детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МДП-транзистора, в частности МОП-транзистора (МОПТ).

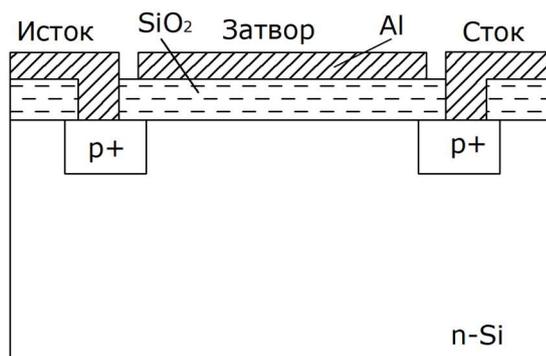


Рисунок 5 – Конструкция детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзистора

Следует отметить, что все остальные деления полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения на координатные, спектрометрические, охлаждаемые и пр. являются условностью, так как в зависимости от поставленной задачи перечисленные выше конструкции детекторов можно адаптировать под решение практически любых задач путем выбора полупроводникового материала, разработки необходимой топологии и изменения или применения нескольких технологий изготовления.

1.2 Применение полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения

Детекторы ионизирующего излучения имеют применение в различных областях науки и техники: от ядерной медицины до геофизики, а также промышленности [1].

В ядерной медицине полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения применяются, как в диагностических установках (томографах) [32, 33] для визуализации клинической картины, так и в терапевтических установках и приборах для контроля мощности дозы и поглощенной дозы ионизирующего излучения [34 – 36]. В связи со стремительным развитием полупроводниковой промышленности в диагностических медицинских установках, использующих рентгеновское излучение до 200 кэВ, все чаще применяются полупроводниковые координатные детекторы на основе CZT [37], ведутся исследования по применению координатных детекторов на основе GaAs(Cr) [38]. Выбор данных материалов связан с тем, что они имеют высокий атомный номер Z и поэтому гораздо эффективнее регистрируют гамма- и рентгеновское излучение по сравнению с кремнием. Сечение фотоэффекта σ_{ϕ} , преобладающего механизма поглощения в области малых энергий рентгеновского и гамма-излучения, резко зависит от среднего эффективного заряда вещества (атомного номера) Z : $\sigma_{\phi} \sim Z^5$ [39].

В терапевтических установках и приборах ядерной медицины, например, *in vivo* дозиметре, нашли свое применение полупроводниковые детекторы за счет своих малых размеров (чувствительный элемент представляет собой кристалл размером порядка 1×1 мм). Совместно с *in vivo* дозиметрами применяются, как правило, полупроводниковые детекторы с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов и диодов с p-n переходом [34, 35, 40 – 45].

Различные полупроводниковые детекторы активно применяются и в космической науке и технике. В данной области с помощью детекторов решаются задачи по изучению радиационной космической обстановки, так как для

применения различных приборов на борту космических аппаратов очень важно знать какой вид излучения и с какой энергией преобладает на той или иной орбите и в какое время. Используются в данном случае различные спектрометрические полупроводниковые детекторы, способные определять вид излучения и его энергию. Также очень важно для аппаратуры и космонавтов, пребывающих в космосе, знать поглощенную дозу ионизирующего излучения, поэтому на космических аппаратах используются дозиметры, работающие, как правило, с детекторами на основе МДП-транзисторов, так как они имеют малые размеры, не требуют большой мощности питания и могут быть легко интегрированы в бортовую аппаратуру [46 – 50].

Широкое применение получили полупроводниковые детекторы и в физике высоких энергий, где требуется регистрация различных видов излучений. Востребованными в этой области являются спектрометрические и координатные детекторы. Немалое количество различных полупроводниковых детекторов требуется для экспериментов на большом адронном коллайдере в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН). Применяемые в экспериментах детекторы могут, к примеру, отличаться своими размерами, которые могут достигать по площади нескольких квадратных метров [51 – 54].

Обширный спектр применения полупроводниковых детекторов и в геофизических исследованиях, где требуется регистрировать не только естественную радиоактивность, но и наведенную. Для поиска алмазов в кимберлитовой породе, например, используют метод меченных нейтронов, для реализации которого требуется знать координату попадания нейтрона, образованного в ходе реакции ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} = {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$, которая в свою очередь определяется по месту попадания в координатный детектор сопутствующей ему альфа-частицы (нейтрон и альфа-частица разлетаются под углом примерно 180 градусов) [55, 56].

В науке и промышленности полупроводниковые детекторы используются, например, в аналитических и исследовательских установках для детектирования

рентгеновского излучения. В таких установках используются двухкоординатные полупроводниковые детекторы, обладающие малыми габаритными размерами.

Как видно из данного раздела: полупроводниковые детекторы применяются во многих областях науки и техники, и их применение не может ограничиваться лишь областями, указанными выше. На данный момент хорошо заметна тенденция по вытеснению полупроводниковыми детекторами ионизирующего излучения других видов детекторов в совершенно различных областях науки и техники, где ранее не применялись полупроводниковые детекторы. Необходимо отметить, что есть и традиционные области применения полупроводниковых детекторов, где они изначально проявили свою эффективность. И к таким областям применения можно отнести космическую науку и технику, а также ядерную медицину, где себя зарекомендовали детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов.

1.3 Применение и преимущества детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов

Для дальнейшего подробного рассмотрения принципа работы и конструкций детекторов на основе МДП-транзисторов, необходимо отметить, что чувствительным элементом в данном случае является кремниевый кристалл с изготовленным на нем МДПТ, а чувствительной областью служит подзатворный диэлектрик. Детекторы с ЧЭ на основе МДПТ являются чувствительными ко всем типам ионизирующего излучения: электромагнитному (рентгеновскому, гамма-излучению), потокам частиц (бета-частиц, протонов, ионов, в том числе и альфа-частиц), но достаточно слабо взаимодействуют с нейтронным излучением.

Детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов известны достаточно давно [57 – 67]. Эффективность данных детекторов доказана их массовым применением в ядерной

медицине (*in vivo* дозиметрия, относительная дозиметрия), в космической технике для контроля дозовых нагрузок на радиоэлектронную аппаратуру на борту космических аппаратов при воздействии различных видов ионизирующего излучения космического пространства (в основном протонного и фотонного), а также в других областях науки и техники, где необходим контроль поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Длительная эксплуатация электронных устройств при воздействии ионизирующего излучения имеет важное техническое значение, особенно для космических аппаратов, которые подвергаются воздействию галактических и солнечных космических лучей, а также элементарных частиц радиационных поясов Земли. Решение данного вопроса предполагает наличие модели деградации электронных устройств при воздействии ионизирующего излучения, и начиная с 1970 года для определения дозовых нагрузок на РЭА КА началась разработка детекторов с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов [57 – 59]. Наиболее часто используемыми чувствительными элементами в таких детекторах являются МОП- и МНОП-транзисторы, с подзатворным диэлектриком из термического SiO_2 и термического SiO_2 с нанесенным на него сверху методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) Si_3N_4 , соответственно. Данные детекторы с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов используются на борту космических аппаратов из-за их малой потребляемой мощности, малых габаритных размеров, низкой стоимости и достаточно широкого диапазона измерения поглощенной дозы: от 10 рад до 500 крад [60 – 62]. Электрическая схема работы детектора с чувствительным элементом на основе МДП-транзистора для применения на борту космического аппарата подразумевает, что контакты затвора и стока соединены, также соединены контакты подложки и истока, между стоком (соединенным с затвором) и истоком (соединенным с подложкой) протекает рабочий ток, а информативным параметром является напряжение между затвором и истоком [63].

В настоящее время в лучевой терапии одним из основных инструментов гарантии качества является применение *in vivo* дозиметрии. Совместно с *in vivo*

дозиметрами в лучевой терапии применяются детекторы, в том числе и с чувствительными элементами на основе МДПТ, по тем же причинам, что и на космических аппаратах: в первую очередь – это малые размеры и малое энергопотребление [41 – 45]. Электрическая схема работы детектора, применяемая в *in vivo* дозиметрах может не отличаться от электрической схемы работы на космическом аппарате, но для увеличения чувствительности детектора может использоваться электрическая схема, когда на затвор во время облучения подается постоянное напряжение, а все остальные контакты объединены и находятся под нулевым потенциалом, а при считывании информативного параметра детектор переключается в схему работы, описанную выше [64].

На рисунке 6 изображена калибровочная зависимость изменения порогового напряжения (ΔV_{th}) от дозы для детектора поглощенной дозы ИИ излучения с ЧЭ на основе МОПТ, имеющего толщину подзатворного SiO_2 равную 400 нм. [65].

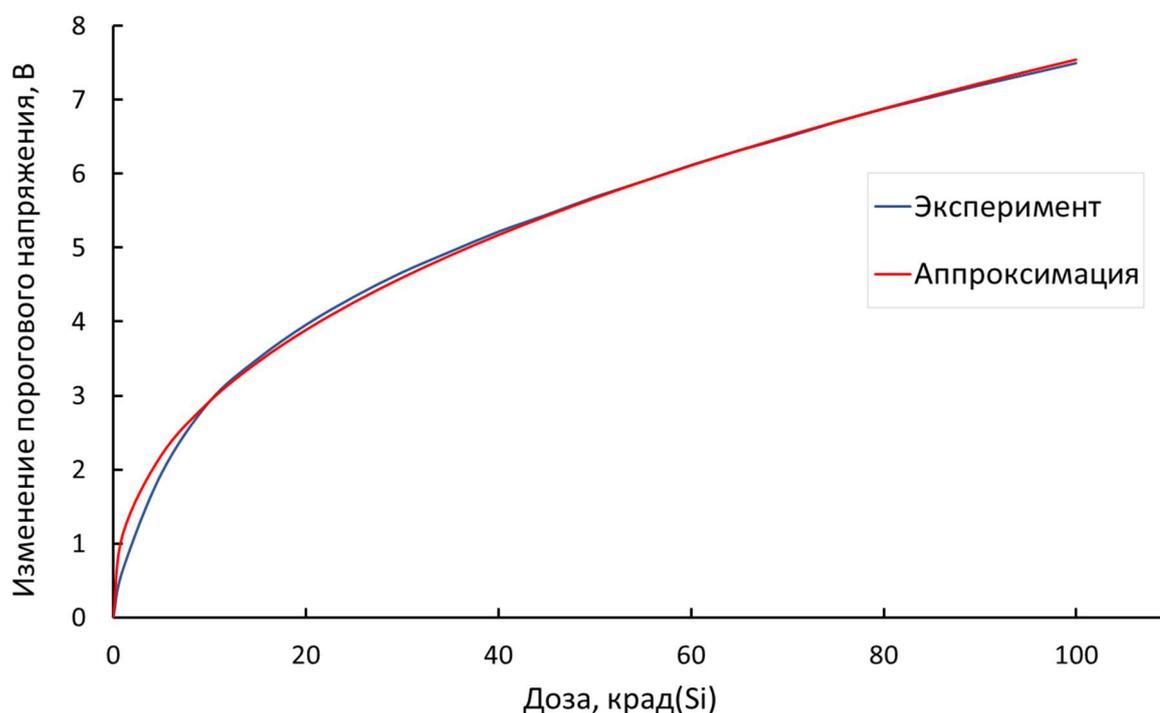


Рисунок 6 – Калибровочная зависимость детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ, имеющего толщину подзатворного SiO_2 равную 400 нм

Дозовая зависимость порогового напряжения была аппроксимирована выражением:

$$\Delta V_{th} = A \cdot D^B, \quad (1)$$

где D – поглощенная доза ионизирующего излучения, рад; A и B – параметры аппроксимации: $A = 0,06594$, $B = 0,41169$.

Преимуществами детекторов ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДПТ перед детекторами других видов являются:

- простота аппаратуры считывания значений информативного параметра (информативный параметр – напряжение, пропорциональное поглощенной дозе ИИ), где отсутствует необходимость интегрирования сигнала по времени;
- относительная простота изготовления и низкая стоимость чувствительного элемента (в ряде случаев в качестве ЧЭ могут применяться серийно выпускаемые изделия МОП- и КМОП-технологии), обусловленная малыми размерами чувствительных элементов, изготавливаемых партиями, состоящими из нескольких полупроводниковых пластин;
- малый размер чувствительного элемента, который может быть менее $1,0 \times 1,0$ мм;
- возможность измерения поглощенной дозы ИИ в режиме «online», что позволяет в любой момент времени оперативно отслеживать информацию о поглощенной дозе;
- возможность применения в условиях воздействия ИИ со смешанным составом, что важно, например, для применения на борту космических аппаратов;
- определение дозы, поглощенной непосредственно в полупроводниковом кристалле ЧЭ с учетом влияния защитного действия всех имеющихся конструктивных элементов, что, опять же, важно для космического применения, а также для задач дозиметрического сопровождения облучений, например, при радиационных испытаниях;

- низкое энергопотребление: потребление тока порядка десятков микроампер при напряжении в несколько вольт, что важно для условий автономного электропитания, а также при наличии ограничений по потребляемой мощности.

1.4 Принцип работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МОП-транзистора

Принцип работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МОП-транзистора, являющегося наиболее распространенным детектором на основе МДП-транзистора, заключается в том, что при воздействии ионизирующего излучения в слое подзатворного SiO_2 МОПТ образуются неравновесные электронно-дырочные пары, количество которых пропорционально поглощенной энергии ионизирующего излучения. Радиационно-индуцированные неравновесные носители заряда под действием электрического поля разделяются, избегая «родственной» рекомбинации, и выносятся из SiO_2 . Но, часть радиационно-индуцированного положительного заряда (дырки) в процессе переноса захватываются на дырочные ловушки, заряжая их положительно, что приводит к сдвигу сток-затворной (передаточной) вольт-амперной характеристики (ВАХ) детектора в сторону отрицательных напряжений. Напряжение между затвором и истоком (или величина порогового напряжения) при фиксированном значении тока стока, за счет вызванного облучением накопления положительного заряда в SiO_2 , является информативным параметром детектора. При этом величина изменения напряжения между затвором и истоком на единицу поглощенной дозы является характеристикой радиационной чувствительности детектора или просто чувствительностью. Захват дырок на ловушки в SiO_2 происходит в основном вблизи поверхности кремния и обуславливается тем, что в данной области вследствие диффузии кислорода из оксида к границе с кремнием и несоответствия решеток на границе присутствует

большое количество кислородных вакансий, которые могут выступать в роли дырочных ловушек [66]. На рисунке 7 продемонстрировано изменение сток-затворной вольт-амперной характеристики вследствие захвата положительного заряда в подзатворном SiO_2 при воздействии ионизирующего излучения на p- и n-канальный МОПТ [67].

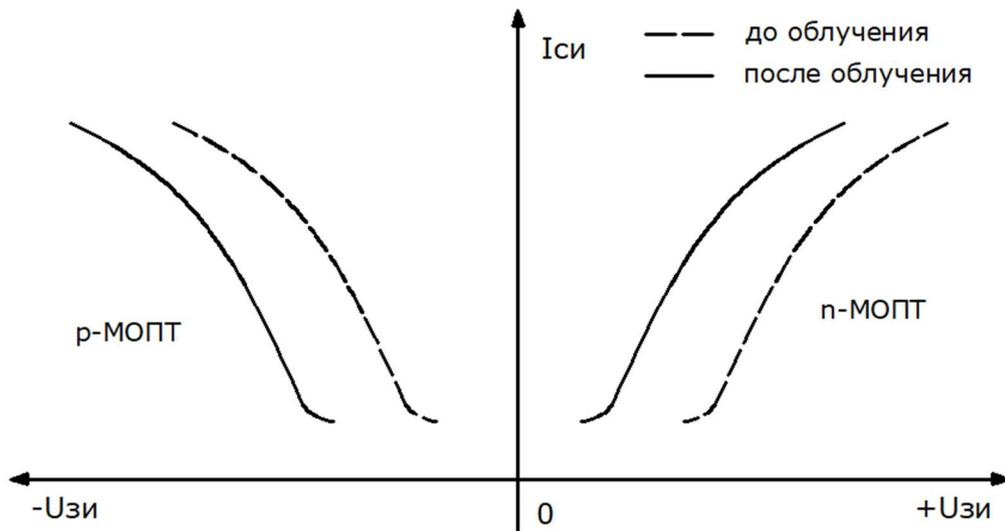


Рисунок 7 – Изменение сток-затворной вольт-амперной характеристики вследствие захвата положительного заряда в подзатворном SiO_2 при воздействии ИИ на p- и n-канальный МОПТ

Дополнительным фактором, влияющим на информативный параметр при облучении, является образование радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si . Механизм образования радиационно-индуцированных поверхностных состояний заключается в том, что при переносе дырок через SiO_2 или при их захвате на ловушки, высвобождаются ионы водорода, которые могут дрейфовать по направлению к границе раздела SiO_2 / Si . Водород и/или водородосодержащие радикалы являются одними из основных технологических примесей в термически выращенных на кремнии слоях SiO_2 . Ионы водорода, дошедшие до границы раздела SiO_2 / Si , реагируют с атомами кремния, пассивированными водородом, с образованием поверхностных состояний. В случае p-канального транзистора поверхностные состояния заряжены

преимущественно положительно и отрицательно в случае n-канального транзистора при условии приложения порогового напряжения. На рисунке 8 продемонстрирован сдвиг сток-затворной вольт-амперной характеристики p- и n-канальных МОПТ при воздействии ионизирующего излучения за счет накопления поверхностных состояний [67].

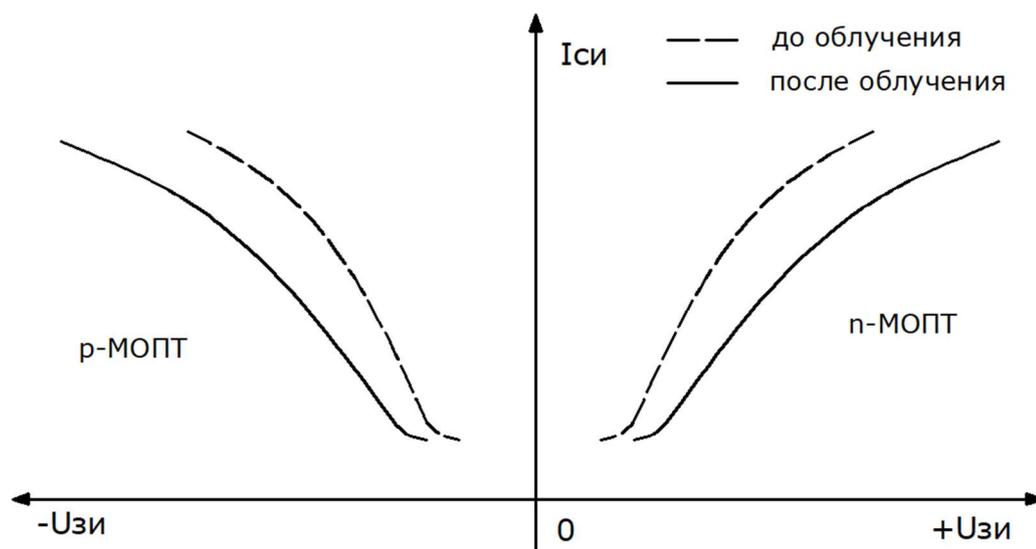


Рисунок 8 – Изменение сток-затворной вольт-амперной характеристики вследствие накопления поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si при воздействии ИИ на p- и n-канальный МОПТ

Как результат, величина и знак общего заряда, накопленного в МОПТ, будет определяться суммой заряда в SiO_2 и на границе SiO_2 / Si в случае, p-МОПТ, и разностью, в случае n-канального. Следует отметить, что при некоторых условиях облучения детекторов с чувствительными элементами на основе МОПТ вклад поверхностных состояний в изменение значения информативного параметра детектора может быть доминирующим. На рисунке 9 представлен разрез затворной системы p-МОПТ, отображающий накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном SiO_2 МОПТ при воздействии ионизирующего излучения.

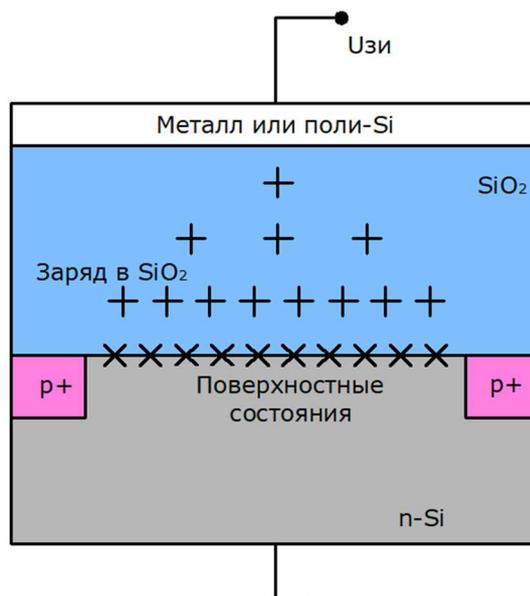


Рисунок 9 – Накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном SiO₂ p-MOПТ при воздействии ИИ

Резюмируя, можно сказать, что сдвиг сток-затворной вольт-амперной характеристики детектора: изменение его порогового напряжения (или напряжения между затвором и истоком) при заданном фиксированном рабочем токе, которое является информативным параметром детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МОПТ, происходит вследствие захвата на ловушки части радиационно-индуцированных дырок в процессе их переноса через SiO₂, а также образования радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO₂ / Si. При построении зависимости изменения информативного параметра (напряжения между затвором и истоком или порогового напряжения) или его изменения от поглощенной дозы ионизирующего излучения, радиационной чувствительностью будет являться абсолютное значение тангенса угла наклона кривой: абсолютное значение отношения изменения информативного параметра к изменению поглощенной дозы ионизирующего излучения. Поглощенная доза ионизирующего излучения измеряется в Гр (1 Гр = 1 Дж / кг), но также используется внесистемная единица измерения – рад, 1 Гр = 100 рад. Обычно указывается не только единица измерения

поглощенной дозы, но и вещество, в котором поглотилась энергия ионизирующего излучения.

Как известно [68, 69]: радиационная чувствительность детектора с ЧЭ на основе МОПТ зависит от толщины подзатворного SiO_2 и при увеличении толщины подзатворного диэлектрика увеличивается и радиационная чувствительность. Данное утверждение продемонстрировано на рисунке 10, где представлены зависимости изменения порогового напряжения детекторов с ЧЭ на основе р-МОПТ, имеющих толщины подзатворного SiO_2 равные 100 нм, 400 нм и 1,0 мкм от дозы гамма-излучения при подаче на затвор +5 В во время облучения [70].

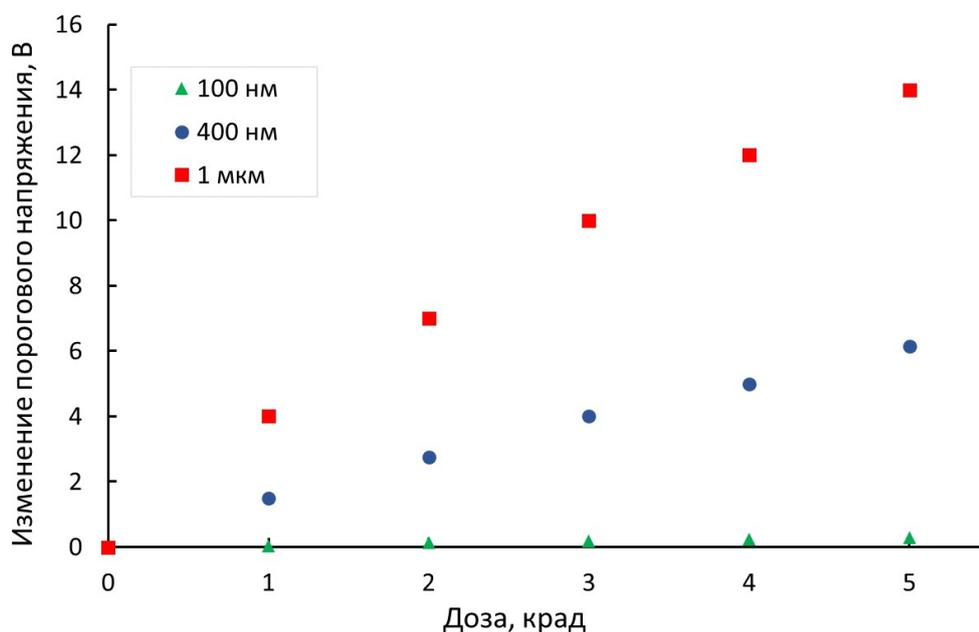


Рисунок 10 – Зависимость изменения порогового напряжения детекторов с ЧЭ на основе р-МОПТ, имеющих толщины подзатворного SiO_2 равные 100 нм, 400 нм и 1,0 мкм, от дозы гамма-излучения при подаче на затвор +5 В во время облучения

Радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ зависит не только от толщины SiO_2 , но и от величины напряженности электрического поля в SiO_2 во время облучения. Напряженность электрического поля влияет на выход радиационно-индуцированного заряда в процессе «родственной» рекомбинации (выход заряда увеличивается с увеличением напряженности электрического поля [71]) и на сечение захвата

положительного заряда ловушками в SiO_2 (сечение захвата уменьшается с увеличением напряженности электрического поля). Выходом заряда является отношение количества положительного заряда, избежавшего «родственную» рекомбинацию, к изначальному количеству радиационно-индуцированного положительного заряда. В свою очередь величина напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике зависит от величины приложенного к затвору напряжения, поверхностного потенциала на границе SiO_2 / Si , разности работ выхода между материалом затвора и полупроводниковой подложки и распределением захваченного положительного заряда в SiO_2 . На рисунке 11 приведены зависимости изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МОПТ, имеющих толщину подзатворного SiO_2 равную 100 нм, от дозы гамма-излучения при приложении на затвор различных положительных напряжений во время облучения [70].

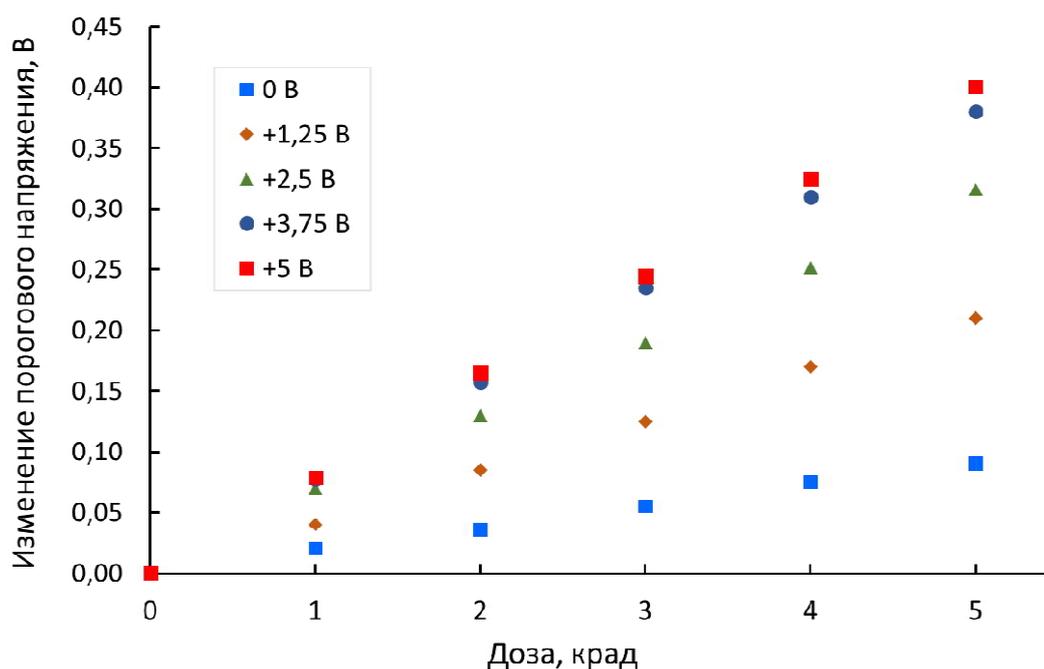


Рисунок 11 – Зависимость изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МОПТ с толщиной подзатворного SiO_2 равной 100 нм от дозы гамма-излучения при приложении на затвор различных положительных напряжений во время облучения

Из рисунка 11 видно, что при приложении + 5 В на затвор детектора во время облучения изменение порогового напряжения на рабочем токе, а соответственно, и чувствительность детектора выше, чем при меньших напряжениях, вплоть до 0 В. В данном случае при увеличении напряженности электрического поля еще не происходит значительного снижения сечения захвата дырок на ловушки и чувствительность определяется в основном выходом заряда.

На затвор детектора с чувствительным элементом на основе МОПТ во время облучения можно подавать не только положительное, но и отрицательное напряжение. При подаче отрицательного напряжения на затвор положительный радиационно-индуцированный заряд будет дрейфовать под действием электрического поля в сторону затвора и в этом случае чувствительность детектора будет меньше, чем при приложении на затвор постоянного положительного напряжения за счет меньшего количества захваченного на ловушки в SiO_2 положительного заряда, так как большая часть дырочных ловушек находится вблизи границы раздела SiO_2 / Si [72]. В подтверждение данного факта на рисунке 12 продемонстрирована зависимость изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МОПТ с толщиной подзатворного SiO_2 равной 400 нм от дозы гамма-излучения при приложении на затвор различных напряжений во время облучения.

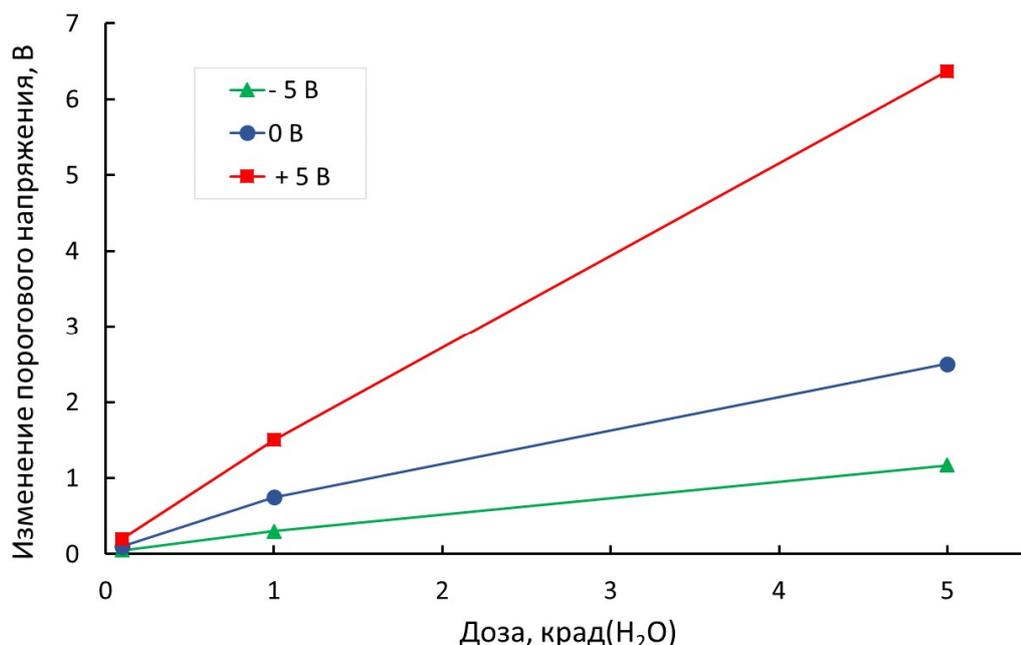


Рисунок 12 – Зависимость изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МОПТ с толщиной подзатворного SiO₂ равной 400 нм от дозы гамма-излучения при приложении на затвор различных напряжений во время облучения

Диапазон регистрируемых доз детекторами с чувствительными элементами на основе МОПТ, как правило, составляет три порядка. Минимальная регистрируемая доза ионизирующего излучения ограничивается собственными шумами транзистора и дрейфом порогового напряжения. Максимальная регистрируемая доза ионизирующего излучения ограничивается величиной напряженности электрического поля в SiO₂, равной электрической прочности, составляющей величину ≈ 5 МВ/см.

При использовании детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МОПТ необходимо учитывать тот факт, что они обладают эффектом фединга (отжига накопленного заряда), то есть в течение времени информативный параметр будет изменять свое значение без влияния каких-либо внешних факторов [70, 73]. На рисунке 13 продемонстрирована зависимость изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ, имеющих толщину подзатворного

SiO₂ равную 400 нм, от времени при температуре 25 °С после низкоинтенсивного облучения гамма-квантами ⁶⁰Со [73].

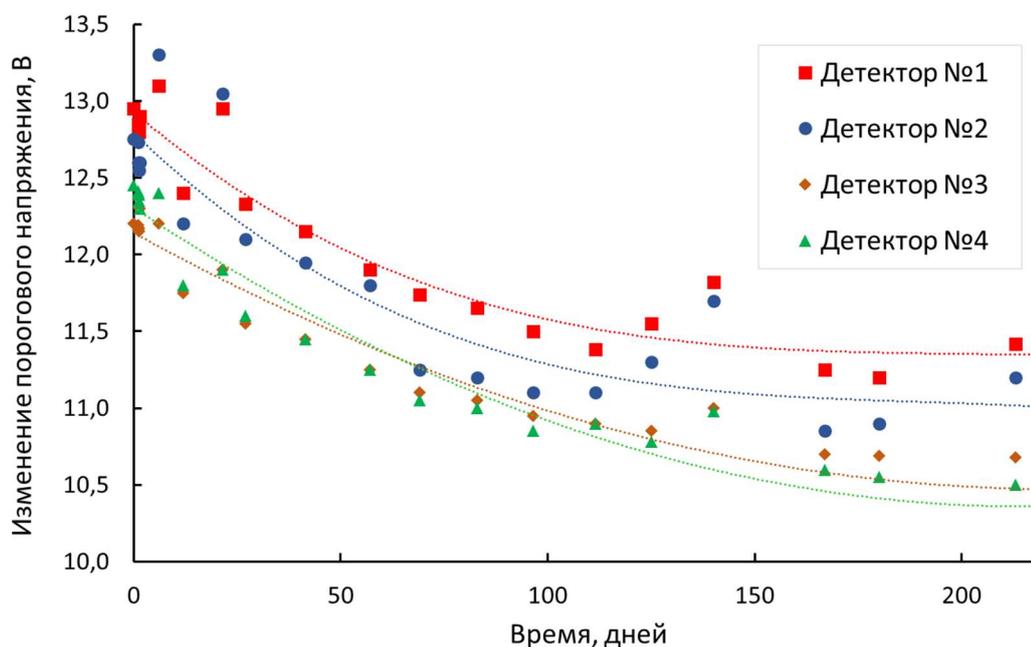


Рисунок 13 – Зависимость изменения порогового напряжения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ, имеющих толщину подзатворного SiO₂ равную 400 нм, от времени при температуре 25 °С после низкоинтенсивного облучения гамма-квантами ⁶⁰Со

1.5 Особенности работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МНОП-транзистора

Полупроводниковые планарные полевые транзисторы с затворной системой «металл – нитрид кремния – диоксид кремния – полупроводник» нашли свое применение в качестве ячейки энергонезависимых запоминающих устройств (например, флеш-памяти), где такая ячейка является хранителем одного бита информации [74]. Особенностью структуры МНОПТ, позволяющей выполнять данные функции, служит граница Si₃N₄ / SiO₂, также, как и сам Si₃N₄, способная

локализовывать и удерживать инжектированные на нее электроны и дырки порядка 10 лет при температурах до + 85 °С [75, 76].

МНОП-транзисторы, как и МОП-транзисторы применяются в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения [48]. Чувствительной областью МНОПТ, как и в случае МОПТ, является слой подзатворного SiO_2 в котором происходит разделение и перенос радиационно-индуцированных неравновесных носителей заряда под действием электрического поля. В слое Si_3N_4 неравновесные радиационно-индуцированные положительные и отрицательные носители заряда либо рекомбинируют между собой, либо, захватываясь на электронные и дырочные ловушки, остаются неподвижны даже в приложенном электрическом поле, компенсируя заряд друг друга и не давая никакого вклада в радиационную чувствительность детектора. Концентрация электронных и дырочных ловушек в Si_3N_4 составляет величину порядка $\approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [77].

Главным отличием детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОП-транзисторов от детекторов с ЧЭ на основе МОПТ является то, что граница $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ за счет большой концентрации ловушек позволяет захватывать 100 % носителей заряда обоих знаков, дошедших до этой границы, в то время, как в SiO_2 захватывается лишь часть положительного заряда, индуцированного в нем. Для эффективной работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ необходимо увеличить количество захваченного положительного заряда на границе раздела диэлектриков, обеспечив его перенос к границе путем приложения к затвору МНОПТ отрицательного напряжения, обеспечивающего соответствующее направление электрического поля. На рисунке 14 представлен разрез затворной системы р-МНОПТ, отображающий накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном Si_3N_4 и SiO_2 при воздействии ионизирующего излучения в режиме работы, обеспечивающим перенос положительного заряда к границе раздела диэлектриков.

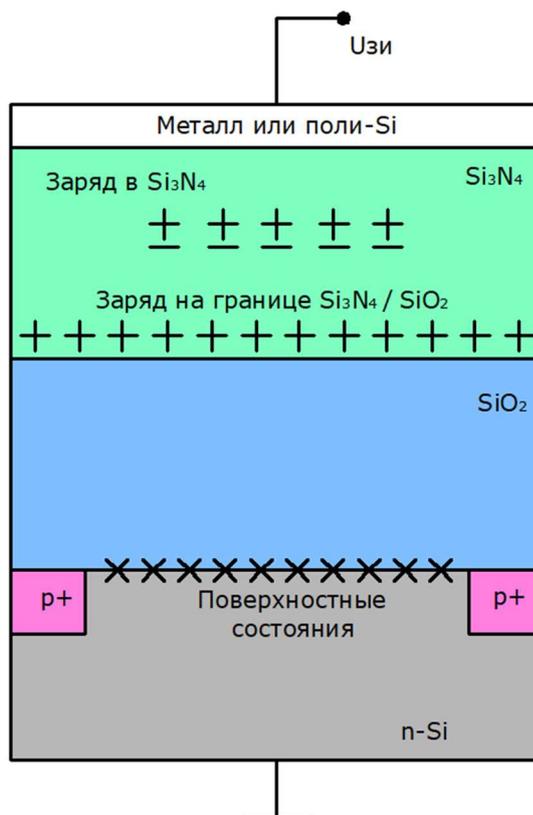


Рисунок 14 – Накопление радиационно-индуцированного заряда и поверхностных состояний в подзатворном Si_3N_4 и SiO_2 p-MHOPT при воздействии ионизирующего излучения в режиме работы, обеспечивающим перенос положительного заряда к границе раздела диэлектриков

Детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе MHOPT обладают теми же преимуществами перед детекторами других видов, что и детекторы с ЧЭ на основе MOPT, а также превосходят последние за счет наличия границы раздела Si_3N_4 и SiO_2 по следующим характеристикам [78]:

- более высокая радиационная чувствительность при отрицательном напряжении на затворе в режиме измерения информативного параметра и режиме накопления заряда при равных толщинах подзатворного SiO_2 , являющегося чувствительной областью детектора, за счет захвата 100 % носителей заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, избежавших «родственную» рекомбинацию и достигших данной границы;

- линейность калибровочной кривой, обеспечиваемая отсутствием фединга и возможностью работы в режиме с поддержанием постоянной напряженности поля в SiO_2 ;
- отсутствие фединга, за счет надежной изоляции границы $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ от токопроводящих металлических или поликремневых контактов в МНОПТ и достаточного удаления захваченного заряда от границы SiO_2 / Si ;
- отсутствие зависимости от мощности дозы ионизирующего излучения.

Для детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ минимальная регистрируемая доза ограничивается также собственными шумами и дрейфом порогового напряжения транзистора, как и в случае с ЧЭ на основе МОПТ. Диапазон измеряемых доз также составляет 3 порядка и ограничивается величиной напряженности электрического поля в SiO_2 , равной электрической прочности ≈ 5 МВ/см и(или) величиной напряженности электрического поля в Si_3N_4 , равной ≈ 2 МВ/см, при которой в Si_3N_4 начинает происходить перенос заряда за счет ионизации электрона из ловушки в зону проводимости с последующим захватом этого электрона другой ловушкой и так далее. На рисунке 15 изображена зависимость плотности тока от напряжения в стехиометрическом Si_3N_4 толщиной 100 нм для концентрации ловушек 10^{19} см^{-3} (1) и $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (2) [79].

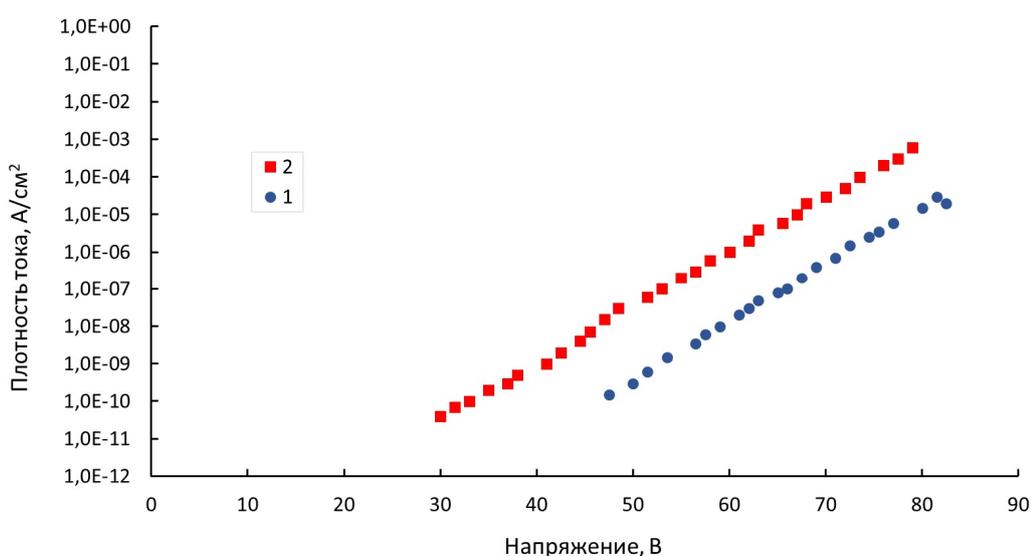


Рисунок 15 – Зависимость плотности тока от напряжения в стехиометрическом Si_3N_4 толщиной 100 нм для концентрации ловушек $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (1) и $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (2)

Из рисунка 15 видно, что для стехиометрического Si_3N_4 толщиной 100 нм с концентрацией ловушек $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ рост тока, обусловленный переносом заряда между ловушками, начинается при напряжении 30 В, что соответствует напряженности электрического поля 3 МВ/см, в то время, как для Si_3N_4 с концентрацией ловушек $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ рост тока начинается при напряжении более 40 В, что соответствует напряженности электрического поля более 4 МВ/см.

Чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ не зависит от мощности дозы ионизирующего излучения, что продемонстрировано на рисунке 16 [48]. На рисунке 16 изображена зависимость изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 60$ нм, от дозы гамма-излучения при приложении минус 5 В на затвор во время облучения мощностями дозы от 0,002 до 50 рад(Si)/с.

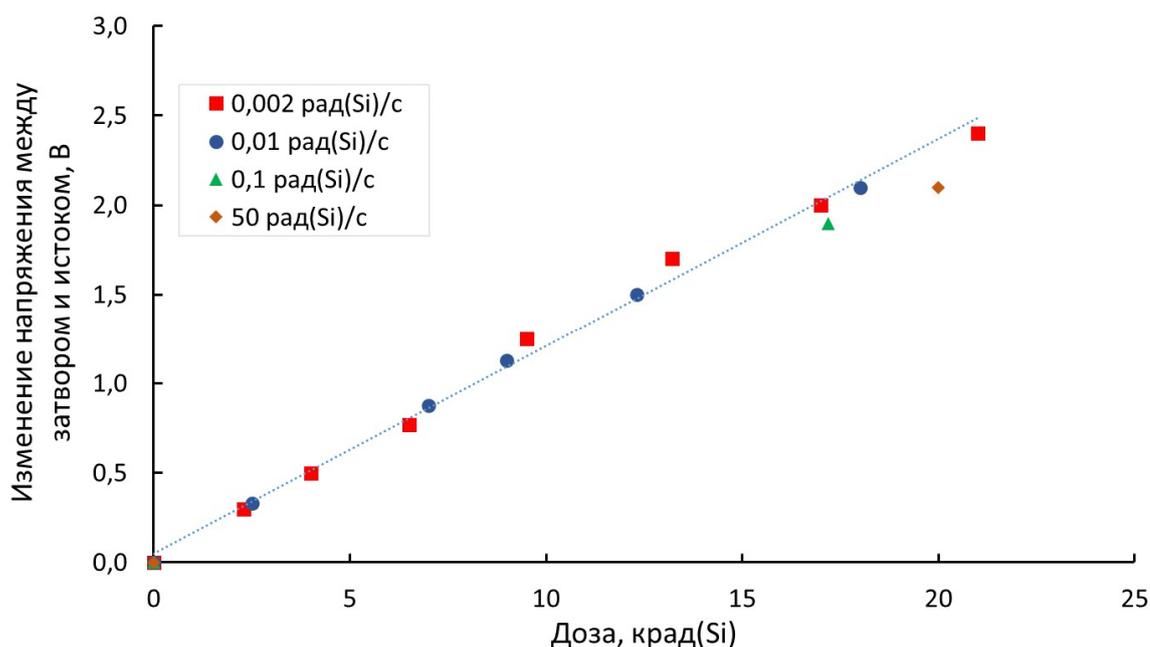


Рисунок 16 – Зависимость изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 60$ нм, от дозы гамма-излучения при приложении минус 5 В на затвор во время облучения мощностями дозы от 0,002 до 50 рад(Si)/с

Радиационная чувствительность детекторов с p-MHOPT в качестве ЧЭ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 60$ нм, при приложении минус 5 В на затвор во время облучения составила 0,12 В/крад(Si), что в полтора раза больше, нежели чувствительность детектора с MOPT в качестве ЧЭ, имеющего толщину подзатворного SiO_2 равную 100 нм, при приложении + 5 В на затвор во время облучения, которая составила 0,08 В/крад (рисунок 11). Данное сравнение демонстрирует тот факт, что даже при меньшей толщине подзатворного SiO_2 , являющегося рабочей областью детекторов, детектор с MHOPT в качестве чувствительного элемента обладает большей чувствительностью, чем детектор с чувствительным элементом на основе MOPT при равном абсолютном значении приложенного напряжения во время облучения. При данном сравнении напряженность электрического поля в SiO_2 MHOPT составляла величину 0,36 МВ/см, что ниже напряженности электрического поля в MOPT, составляющей величину 0,5 МВ/см. Чем меньше напряженность электрического поля в SiO_2 , тем меньше и выход заряда. Для увеличения выхода заряда и радиационной чувствительности детектора необходимо увеличить напряжение на затворе при облучении, но в случае детектора, имеющего MOPT в качестве ЧЭ, чувствительность при увеличении напряженности электрического поля более 0,5 МВ/см будет значительно снижаться [80] за счет снижения сечения захвата дырок на ловушках. В работе [81] показана возможность повышения чувствительности детектора на основе MHOPT с помощью оптимизации выхода заряда в SiO_2 , а в работе [82] оценена предельная чувствительность детекторов ионизирующих излучений на основе MHOPT. В случае детектора поглощенной дозы ИИ, имеющего MHOPT в качестве ЧЭ, радиационная чувствительность при увеличении напряжения на затворе будет увеличиваться пока напряженность электрического поля в Si_3N_4 не превысит величину ≈ 2 МВ/см и (или) напряженность электрического поля в SiO_2 не будет выше ≈ 5 МВ/см.

Детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе MHOPT, в частности p-канальных, имеют близкую по значению радиационную чувствительность при приложении как отрицательного, так и положительного постоянного напряжения

на затвор во время облучения [83, 84], в то время как детекторы с ЧЭ на основе МОПТ имеют значительное различие в радиационной чувствительности при приложении на затвор напряжений противоположной полярности. Связано это с тем, что граница $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ в МНОПТ захватывает дошедшие до нее носители заряда обоих знаков, а в МОПТ в SiO_2 присутствуют только дырочные ловушки, захватывающие положительный заряд.

На данный момент наибольшее значение чувствительности, достигнутой на детекторах поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ, составляет порядка 45 мВ/Гр [85]. В [48] показано, что чувствительность (S) детектора ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ пропорциональна следующей величине:

$$S \sim d_{\text{SiO}_2} \cdot (d_{\text{tot}} - d_{\text{SiO}_2}), \quad (2)$$

где d_{SiO_2} – толщина слоя SiO_2 , d_{tot} – полная толщина подзатворных диэлектриков. Для неизменной полной толщины подзатворных диэлектриков, максимальная чувствительность будет наблюдаться при толщине слоя SiO_2 , равной толщине слоя Si_3N_4 или $d_{\text{SiO}_2} = d_{\text{tot}} / 2$, а также максимальная чувствительность (S_{max}) будет пропорциональна квадрату полной толщины подзатворных диэлектриков.

$$S_{\text{max}} \sim d_{\text{tot}}^2 \quad (3)$$

На рисунке 17 продемонстрирована зависимость чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ, имеющего толщину подзатворного SiO_2 от 0,05 до 100 произвольных единиц, и полной толщиной подзатворного диэлектрика от 1 до 100 произвольных единиц [48].

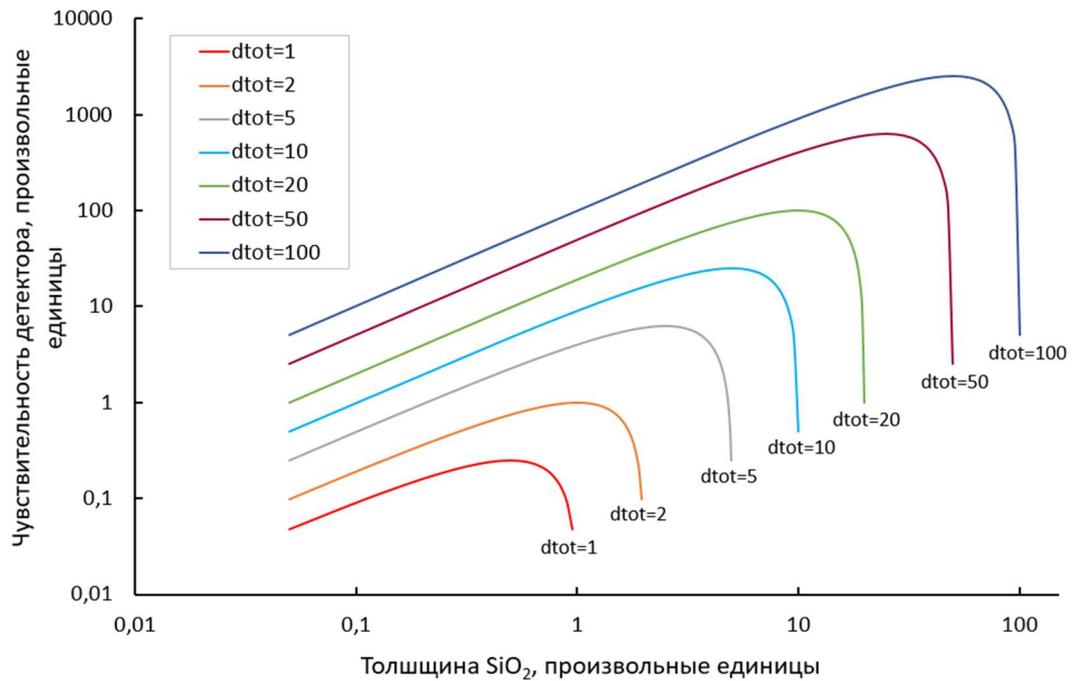


Рисунок 17 – Зависимость чувствительности детектора ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ, имеющего толщину подзатворного SiO₂ от 0,05 до 100 произвольных единиц, и полной толщиной подзатворного диэлектрика от 1 до 100 произвольных единиц

Радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ зависит не только от толщины подзатворных Si₃N₄ и SiO₂, но также и от режима работы детектора во время облучения, поэтому для прогнозирования радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз такого детектора, а также определения его условий применения, ученые разрабатывают модель накопления радиационно-индуцированного заряда в детекторе [86, 87].

1.6 Характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов

Как уже было сказано в данной главе, детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов имеют различное применение, и в зависимости от применения к ним предъявляются различные требования, в соответствии с которыми детекторы обладают различными характеристиками. Основными требованиями, предъявляемыми ко всем детекторам поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ являются:

- малые размеры чувствительного элемента;
- низкое энергопотребление.

Рассмотрим подробнее характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ для различных применений.

Для использования детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ в *in vivo* дозиметрии, необходима высокая точность измерений и, соответственно высокая чувствительность, в среднем не менее 70 мВ/Гр, при этом поглощенная доза ионизирующего излучения за одну фракцию (сеанс) облучения не превышает, как правило, 3 Гр (максимум 10 Гр), а минимально регистрируемая доза должна составлять 0,2 Гр. Суммарная же доза, которую получает пациент за все лечение, не превышает 100 Гр (обычно от 60 до 80 Гр) [88, 89].

Если рассматривать применение детекторов с ЧЭ на основе МДПТ для измерения поглощенной дозы ИИ в составе РЭА КА, то в данном случае нет необходимости в высокой радиационной чувствительности и средняя чувствительность будет иметь значение от 0,4 до 4 мВ/Гр. Для данного применения необходимо иметь широкий диапазон измеряемых доз ионизирующего излучения, который составляет величину от 1 до 10^3 Гр (10^3 Гр – минимум правой границы). Такие же требования предъявляются и к детекторам поглощенной дозы ИИ для

проведения радиационных испытаний, так как данные испытания проводятся в условиях, моделирующих воздействий ИИ космического пространства.

Для измерения поглощенной дозы ИИ на ОИАЭ детекторам требуется иметь диапазон измеряемых доз от 1 до 10^3 Гр, в то время, как требования по чувствительности в этом случае не велики и равны значению 2 мВ/Гр.

Рассматривая характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ, которые необходимо использовать при получении персоналом «аварийных» доз на ОИАЭ, то требования по чувствительности в этом случае такие же, как и для детекторов, применяемых в *in vivo* дозиметрии: 70 мВ/Гр, а диапазон измеряемых доз составляет от 0,2 до 100 Гр.

Характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ для применения в *in vivo* дозиметрии, контроле дозовых нагрузок на РЭА КА, проведении радиационных испытаний, измерении поглощенной дозы ИИ на ОИАЭ и измерении поглощенной дозы ИИ, полученной персоналом ОИАЭ при «аварии» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ для различных применений

Характеристика	Детекторы для <i>in vivo</i> дозиметрии	Детекторы для РЭА КА и радиационных испытаний	Детекторы для ОИАЭ	Детекторы «аварийной» дозы персонала
Размер ЧЭ, мм	не более 1 × 1	не более 3 × 3	не более 3 × 3	не более 1 × 1
Энергопотребление, мВт	не более 10 (U до 40 В, I до 250 мкА)	не более 25	не более 50	не более 10 (U до 40 В, I до 250 мкА)
Чувствительность, мВ/Гр	не менее 70	от 0,4 до 4	2 ± 0,5	не менее 70
Диапазон измеряемых доз ИИ, Гр*	от 0,2 до 10	от 5 до 10^3	от 5 до 10^3	от 0,2 до 100
Линейность характеристики	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения
Фединг	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения	в зависимости от исполнения

* – указана минимальная правая граница диапазона измеряемых доз

Важно знать, что для разработки и изготовления детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ в некоторых областях науки и техники, например, в космических экспериментах, можно применять ЧЭ на основе серийно выпускаемых МОПТ (как дискретных, так и транзисторов из состава КМОП интегральных схем), но для передовых решений, обладающих превосходством по своим характеристикам, в первую очередь, по радиационной чувствительности, рабочему диапазону и точности измерения поглощенной дозы, проводится разработка специального чувствительного элемента на основе МДПТ для каждого конкретного применения, и нет универсального чувствительного элемента, удовлетворяющего требованиям всех направлений применения данных детекторов.

Исходя из выше сказанного, была сформулирована **цель** данной диссертации – разработка и научное обоснование конструкции затворных систем и режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для различных применений.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие **задачи**:

- определить требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для применения в *in vivo* дозиметрии, в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ;
- разработать физическую модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ;
- провести расчет конструкции слоев подзатворного диэлектрика, состоящего из Si_3N_4 и SiO_2 , для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для каждого из применений;
- разработать топологию р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;

- разработать технологию изготовления р-МНОПТ для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с различными толщинами диэлектрических слоев;
- исследовать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от напряжения на затворе при облучении;
- разработать схмотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

1.7 Выводы к главе 1

В главе 1 рассмотрены основные виды детекторов ИИ и принципы их работы: ионизационная камера, детекторы на основе сцинтиллятора, термолюминесцентные и полупроводниковые детекторы. Проведена классификация полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения в зависимости от технологии изготовления и приведены их основные конструкции.

Рассмотрены области применения полупроводниковых детекторов ИИ, которые перекрывают большой объем потребности в детекторах для различных областей науки и техники: от ядерной медицины до геофизики и промышленности. Обосновано применение МДПТ в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ и выделены традиционные области их применения: космическая наука и техника, а также ядерная медицина (лучевая терапия).

В данной главе подробно описан принцип работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МОПТ, заключающийся в том, что при воздействии ИИ в слое подзатворного SiO_2 МОПТ образуются неравновесные электронно-дырочные пары, количество которых пропорционально поглощенной энергии ИИ и за счет захвата на ловушки дырок в процессе их переноса через SiO_2 , а также образования

радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si , происходит сдвиг сток-затворной вольт-амперной характеристики. Приведены радиационные характеристики детекторов с различными толщинами подзатворного SiO_2 и при различных напряжениях на затворе, а также продемонстрирован эффект фединга: изменения информативного параметра в течение времени без влияния каких-либо внешних факторов.

Проанализированы особенности работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ, главной из которых является то, что $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ за счет большой концентрации ловушек позволяет захватывать 100 % носителей заряда обоих знаков, дошедших до этой границы, за счет чего можно получить большую радиационную чувствительность при равной или даже меньшей толщине SiO_2 , являющегося чувствительной областью детектора в обоих случаях, чем с ЧЭ на основе МОПТ. Приведены и другие преимущества детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ перед детектором с ЧЭ на основе МОПТ и детекторов других типов: например, отсутствие зависимости от мощности дозы ИИ.

Показано, что для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ чувствительность будет максимальной при толщине SiO_2 , равной толщине Si_3N_4 и неизменной полной толщине подзатворных диэлектриков.

Приведены характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МДПТ для применения в *in vivo* дозиметрии, контроле дозовых нагрузок на РЭА КА, проведения радиационных испытаний, измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения на ОИАЭ и измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения, при получении персоналом «аварийных» доз.

Таким образом, на основании обзора была сформулирована цель диссертации – разработка и научное обоснование конструкции затворных систем и режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для различных применений и задачи, которые необходимо решить в соответствии с поставленной целью, перечисленные в разделе 1.6 главы 1.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

2.1 Определение требований к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МНОП-транзисторов для различных применений

В соответствии с целью данной диссертации: разработкой и научным обоснованием конструкции затворных систем и режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для различных применений, необходимо определить требования к характеристикам разрабатываемых детекторов, планируемых к применению в *in vivo* дозиметрии, в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ. В таблице 1 были приведены характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для различных применений, и на основе этих характеристик были сформулированы требования к характеристикам разрабатываемых детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Требуемые характеристики разрабатываемых детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для различных применений

№ п/п	Характеристика	Тип 1	Тип 2
1	Размер чувствительного элемента, мм	не более 1×1	не более 1×1
2	Чувствительность, мВ/Гр(SiO_2)	не менее 70	не менее 1
3	Диапазон измеряемых доз, Гр(SiO_2)*	от 0,2 до 100	от 5 до 10^3
4	Ток потребления, мкА	не более 250	не более 250
5	Напряжение питания, В	не более 40	не более 100
7	Фединг	отсутствие	отсутствие

* – указана минимальная правая граница и максимальная левая

Как видно из таблицы 2, разрабатываемые детекторы поглощенной дозы ИИ для различных применений были разделены на 2 типа детекторов, так как многие детекторы имеют схожие характеристики. Таким образом детекторы 1-го типа планируются к применению в *in vivo* дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ, а детекторы 2-го типа в составе РЭА КА, в радиационных испытаниях и на ОИАЭ.

2.2 Выбор конструкции МНОП-транзистора для использования в качестве чувствительного элемента детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения

Существует множество типов полевых транзисторов со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник», имеющих различные особенности. На этапе выбора конструкции МНОП-транзистора для использования в качестве чувствительного элемента детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения наиболее важным является выбор:

- типа проводимости канала: р- или n-типа;
- типа канала проводимости: встроенный или индуцированный;
- типа подложки: р- или n-типа;
- материала и конструкции подзатворного диэлектрика;

- толщины подзатворных диэлектриков.

При выборе типа проводимости канала МНОПТ, разрабатываемого для использования в качестве ЧЭ детектора, следует обратить внимание на изменение его характеристик при воздействии на него ИИ, а если быть точным, то на изменение его сток-затворной вольт-амперной характеристики, которая изменяется аналогично сток-затворной вольт-амперной характеристике МОПТ.

В главе 1 на рисунке 7 было показано, что положительный заряд, захваченный на ловушках в SiO_2 , определяет сдвиг сток-затворной ВАХ в сторону отрицательных значений напряжения. Таким образом, если посмотреть на сток-затворную характеристику р- и n-канальных МОПТ с индуцированным каналом, то становится видно, что при наборе дозы ИИ абсолютное значение порогового напряжения р-МОПТ увеличивается, оставаясь отрицательным, а абсолютное значение порогового напряжения n-канального транзистора сначала уменьшается, а далее после пересечения нулевого значения напряжения меняет знак на противоположный и начинает увеличиваться.

При рассмотрении изменений сток-затворных ВАХ р- и n-канальных МОПТ при облучении вследствие накопления радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si (рисунок 8) видно, что у р-МОПТ абсолютное значение порогового напряжения увеличивается, также, как и в случае с накоплением радиационно-индуцированного положительного заряда, абсолютное значение порогового напряжения n-канального МОПТ также увеличивается, сдвигаясь в противоположную сторону, нежели при накоплении радиационно-индуцированного положительного заряда.

Рассмотрев данные зависимости можно сделать вывод, что радиационная чувствительность детектора с ЧЭ на основе р-МОПТ будет выше за счет сдвига сток-затворной ВАХ в сторону увеличения отрицательных напряжений при накоплении положительного заряда и при накоплении поверхностных состояний, чем чувствительность детектора с ЧЭ на основе n-канального МОПТ при облучении которого направление сдвига сток-затворной ВАХ зависит от величины захваченного положительного заряда и накопленных поверхностных состояний.

Также при использовании р-МОПТ в качестве ЧЭ детектора отсутствует вероятность прохождения его сток-затворной ВАХ через нулевое значение напряжения при его стандартной работе (отрицательное напряжение на затворе), что значительно упрощает электронику обработки информации с детектора, нежели в случае n-канального МОП-транзистора, когда пороговое напряжение может менять знак.

Если рассматривать р-МНОПТ с индуцированным и встроенным каналом, для применения в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ, следует также обратить внимание на их сток-затворные ВАХ. На рисунке 18 представлены сток-затворные вольт-амперные характеристики р-МОПТ с индуцированным и встроенным каналами, которые аналогичны сток-затворным ВАХ р-МНОПТ [90].

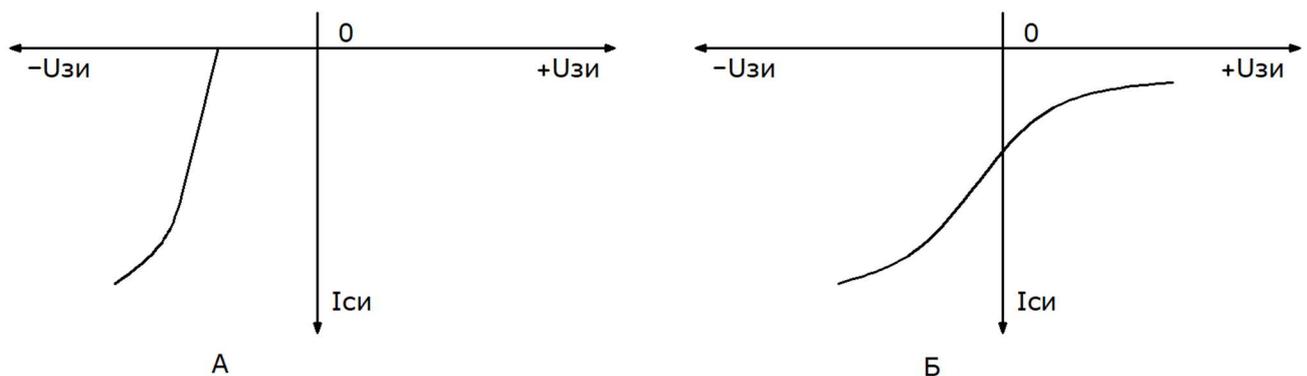


Рисунок 18 – Сток-затворные ВАХ р-МОПТ с индуцированным (а) и встроенным (б) каналами

Р-МНОПТ со встроенным каналом может иметь положительное пороговое напряжение, и как уже говорилось выше, при облучении пороговое напряжение р-канального МДП-транзистора будет смещаться в сторону отрицательных значений, таким образом, пороговое напряжение будет менять знак. В р-МНОПТ с индуцированным каналом такой ситуации не прослеживается.

Рассмотрев варианты структуры МНОПТ со встроенным и индуцированным каналом, и сделав выбор в пользу р-канального МНОП-транзистора с индуцированным каналом, остается только один вариант полупроводниковой

подложки, удовлетворяющий этим двум условиям – это кремниевая подложка n-типа проводимости.

При выборе материала и конструкции подзатворного диэлектрика для ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ на основе МДПТ изначально был сделан выбор в пользу двухслойного подзатворного диэлектрика, состоящего из Si_3N_4 и SiO_2 , так как детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе МНОПТ обладают неоспоримыми преимуществами перед детекторами с чувствительными элементами на основе МОПТ, описанными в главе 1.

Учитывая все выше изложенное, к разработке предлагается детектор поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с индуцированным каналом на кремниевой подложке n-типа проводимости, соответственно. Выбор толщины слоев $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ будет сделан в разделе 2.5 данной диссертации на основе расчетов характеристик чувствительных элементов детекторов по разработанной физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках p-канального МНОП-транзистора.

2.3 Физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках p-канального МНОП-транзистора

В общем случае работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе p-МНОПТ, изменение напряжения между затвором и истоком МНОПТ (ΔV_{MNOS} или $\Delta V_{MHOП}$) при фиксированном значении тока стока зависит от трех составляющих: величины захваченного положительного заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на единицу площади (Q_p), объемной плотности захваченного положительного заряда в SiO_2 ($\rho(x)$) и величины заряда радиационно-индуцированных поверхностных состояний на границе SiO_2 / Si на единицу площади ($q \cdot N_{rSS}$). Данная зависимость представлена выражением 4.

$$\Delta V_{MNOS} = - \left(\frac{Q_p}{C_{Si_3N_4}} + \left(\frac{1}{C_{Si_3N_4}} \int_0^{d_{SiO_2}} \rho(x) dx + \frac{1}{C_{SiO_2} \cdot d_{SiO_2}} \int_0^{d_{SiO_2}} (d_{SiO_2} - x) \rho(x) dx \right) + \frac{q \cdot N_{r_{ss}}}{C_{tot}} \right), \quad (4)$$

где $C_{Si_3N_4}$ – электрическая емкость слоя Si_3N_4 на единицу площади, C_{tot} – полная электрическая емкость затворной системы на единицу площади ($\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_{Si_3N_4}} + \frac{1}{C_{SiO_2}}$), C_{SiO_2} – электрическая емкость слоя SiO_2 на единицу площади, q – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), $N_{r_{ss}}$ – плотность радиационно-индуцированных поверхностных состояний, d_{SiO_2} – толщина слоя SiO_2 .

Для оптимальной работы р-МНОПТ в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ требуется приложение отрицательного напряжения на затвор транзистора, поэтому в уравнении (4) вторым членом в правой части можно пренебречь, так как считаем, что весь заряд, избежавший «родственную» рекомбинацию, будет собираться на границе Si_3N_4 / SiO_2 . Величина $N_{r_{ss}}$ в свою очередь будет пропорциональна полному флюенсу радиационно-индуцированных зарядов, перенесенных через слой SiO_2 , а так как на границе Si_3N_4 / SiO_2 захватывается 100% радиационно-индуцированных положительно заряженных носителей заряда (дырок), дошедших до этой границы, величина $N_{r_{ss}}$ будет пропорциональна величине Q_p . Таким образом выражение (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$\Delta V_{MNOS} = - \left(\frac{Q_p}{C_{Si_3N_4}} + \frac{M \cdot Q_p}{C_{tot}} \right), \quad (5)$$

где M – безразмерный коэффициент, зависящий от характеристик изготовления МНОПТ, таких как технология выращивания и толщина слоя SiO_2 , концентрация ионов водорода в SiO_2 и т. д. Коэффициент M невозможно рассчитать из каких-либо выражений и зависимостей, он определяется экспериментально, и, как правило, не превышает значения 0,07.

Из выражения (5) следует, что расчет зависимости ΔV_{MNOS} от дозы ИИ сводится к расчету дозовой зависимости $Q_p(D)$. В свою очередь дозовая зависимость $Q_p(D)$ может быть получена путем интегрирования уравнения (6):

$$\frac{\partial Q_p(D)}{\partial D} = q \cdot G_{SiO_2} \cdot Y(E_{SiO_2}) \cdot d_{SiO_2}, \quad (6)$$

где G_{SiO_2} – число электронно-дырочных пар, генерируемых в единице объема SiO_2 на единицу поглощенной дозы ИИ ($G_{SiO_2} = 8,35 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$, с учетом того, что для образования одной электронно-дырочной пары в SiO_2 требуется энергия равная 17 эВ), E_{SiO_2} – величина напряженности электрического поля в SiO_2 , $Y(E_{SiO_2})$ – выход заряда.

Величина выхода заряда $Y(E_{SiO_2})$ может быть рассчитана с помощью следующих выражений [91]:

$$Y(E_{SiO_2}) = \frac{1}{\alpha \cdot E_{SiO_2}} \cdot e^{-(\alpha \cdot E_{SiO_2} + A)} \cdot \left[\sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{A^m}{m!} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{l=m+n+1}^{\infty} (\alpha \cdot E_{SiO_2})^l \cdot \frac{1}{l!} \right] \right] \right], \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{q \cdot r_0}{k \cdot T}, \quad (8)$$

$$A = \frac{q^2}{4\pi \cdot \varepsilon_{SiO_2} \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot T \cdot r_0}, \quad (9)$$

где r_0 – начальное расстояние разделения между электроном и дыркой, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, ε_{SiO_2} – относительная диэлектрическая проницаемость SiO_2 , ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$. Для точного расчета величины выхода заряда необходимо учитывать геометрическую поправку, зависящую от толщины SiO_2 [92, 86].

Величина напряженности электрического поля в слоях Si_3N_4 и SiO_2 р-МНОПТ зависит от величины напряжения, приложенного к затвору (V_g) и величины захваченного положительного заряда на границе Si_3N_4 / SiO_2 на единицу

площади (Q_p). При применении р-МНОПТ в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ возможна реализация двух электрических режимов работы:

- режим с постоянной отрицательной величиной V_g на контакте затвора и объединенными остальными контактами, находящимися под нулевым потенциалом, и периодическим переключением в режим с постоянным током стока транзистора для измерения информативного параметра;

- режим с постоянным током стока, когда между контактом затвора, объединенного с контактом стока, и контактом истока, объединенного с контактом подложки подается рабочий ток и измеряется напряжение между контактами затвора и истока.

При приложении к затвору р-МНОПТ постоянного отрицательного напряжения V_g , величины напряженностей электрических полей в слоях Si_3N_4 и SiO_2 будут рассчитываться по следующим формулам:

$$E_{\text{SiO}_2} = \frac{C_{tot}}{\varepsilon_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(|V_g - \psi_s| - \frac{Q_p}{C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} \right), \quad (10)$$

$$E_{\text{Si}_3\text{N}_4} = \frac{C_{tot}}{\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot \varepsilon_0} \cdot |V_g - \psi_s| + \frac{Q_p}{\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(1 - \frac{C_{tot}}{C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} \right), \quad (11)$$

где ψ_s – поверхностный потенциал на границе SiO_2 / Si (при достаточно больших электрических полях $\psi_s \approx 2\varphi_b$, φ_b – разница между уровнем Ферми и серединой запрещенной зоны в кремнии), $\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ – относительная диэлектрическая проницаемость Si_3N_4 .

При работе р-МНОПТ в режиме с постоянным током стока (режим измерения информативного параметра детектора) величины электрических полей в слоях Si_3N_4 и SiO_2 р-МНОПТ рассчитываются по следующим формулам:

$$E_{\text{SiO}_2} = \frac{Q_s}{\varepsilon_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_0}, \quad (12)$$

$$E_{Si_3N_4} = \frac{Q_s + Q_p}{\varepsilon_{Si_3N_4} \cdot \varepsilon_0}, \quad (13)$$

где Q_s – положительный заряд в приповерхностном слое кремния на границе SiO_2 / Si на единицу площади. $Q_s \approx C_{tot} \cdot (V_0 - \psi_s)$, где V_0 – абсолютное значение напряжения на затворе р-МНОПТ, устанавливаемое для поддержания постоянного тока стока транзистора до воздействия ионизирующего излучения.

При расчете дозовой зависимости $Q_p(D)$ методом интегрирования уравнения (6) необходимо учитывать, что величина напряженности электрического поля в слое SiO_2 , являющаяся аргументом функции $Y(E_{SiO_2})$, также зависит от величины Q_p . Поэтому расчет дозовой зависимости $Q_p(D)$ должен проводиться по следующему выражению:

$$D = \frac{1}{q \cdot G_{SiO_2} \cdot d_{SiO_2}} \cdot \int_0^{Q_p} \frac{1}{Y(E_{SiO_2}(x))} dx, \quad (14)$$

Можно с уверенностью сказать, что выражения (5) – (14) являются полным комплектом формул, которые необходимы для проведения расчетов радиационных характеристик детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

2.4 Валидация физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора

Путем сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ ($\Delta V_{МНОП}$) от дозы ионизирующего излучения при постоянном значении тока стока, была проведена валидация модели накопления радиационно-индуцированных зарядов в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ. Сравнение проводилось для двух

режимов облучения детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ: режима с постоянным отрицательным напряжением на затворе и режима с постоянным током стока.

В ходе проведения эксперимента были облучены изготовленные тестовые образцы детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих длину канала равную 3,5 мкм, эффективное отношение ширины к длине канала равную 14,3 и толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм. Слой SiO_2 был выращен методом термического окисления, а слой Si_3N_4 был осажден на слой SiO_2 с помощью метода химического осаждения из газовой фазы (CVD).

Облучение образцов детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе осуществлялось на изотопной установке с радионуклидом ^{60}Co гамма-излучением с мощностью экспозиционной дозы (P), равной 14 Р/с. В процессе облучения на затвор детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ подавались следующие постоянные напряжения: минус 2 В, минус 4 В, минус 10 В и минус 40 В относительно истока, все остальные контакты детектора были объединены и находились под нулевым потенциалом. В процессе облучения образцов детекторов периодически проводили измерения напряжения между затвором и истоком $V_{\text{МНОП}}$ при фиксированном значении тока стока I_D равном 100 мкА. Измерения напряжения между затвором и истоком проводились в схеме с объединенными контактами стока и затвора и объединенными контактами истока и подложки. Ток стока на уровне 100 мкА задавался с помощью источника тока. Поглощенную дозу D_{SiO_2} в слое SiO_2 р-МНОПТ определяли по следующему соотношению:

$$D_{\text{SiO}_2} = 0,87 \cdot P \cdot t_{\text{обл}} \cdot \frac{\mu_{\text{SiO}_2}}{\mu_{\text{возд}}}, \quad (15)$$

где $t_{\text{обл}}$ – время облучения, μ_{SiO_2} – массовый коэффициент поглощения энергии фотонного излучения с энергией 1,25 МэВ в SiO_2 , $\mu_{\text{возд}}$ – массовый

коэффициент поглощения энергии фотонного излучения с энергией 1,25 МэВ в воздухе.

По описанной в предыдущем разделе модели и исходя из условий эксперимента был проведен расчет изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ от дозы ИИ, поглощенной в слое подзатворного SiO_2 $\Delta V_{\text{МНОПТ}}(D)$. Коэффициент модели M был подобран из условия наилучшего соответствия расчетных и экспериментальных результатов. Результаты моделирования и экспериментальные результаты представлены на рисунке 19.

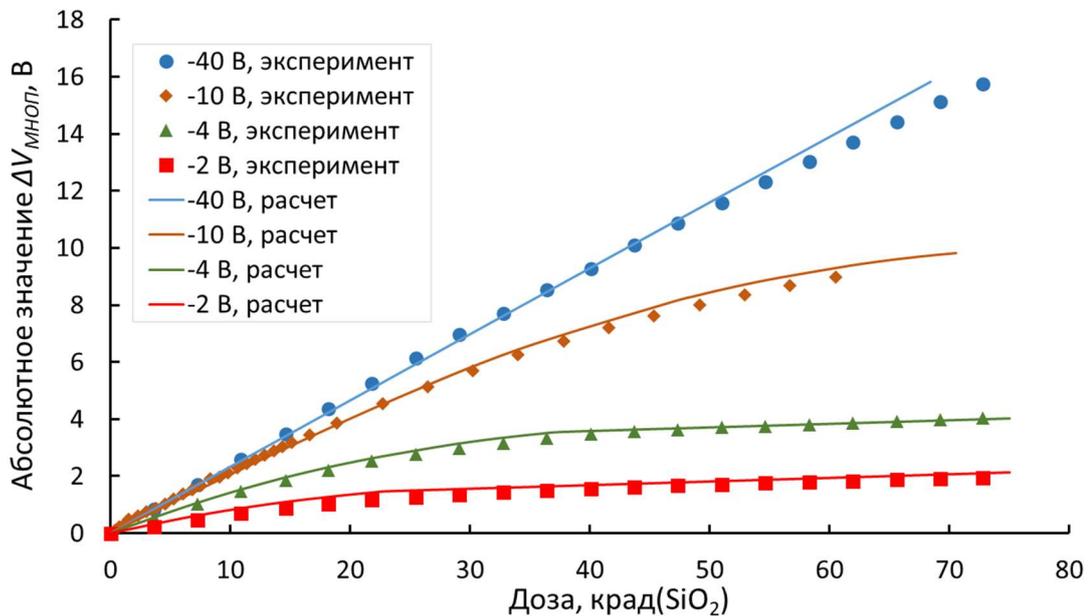


Рисунок 19 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от дозы гамма-излучения при приложении различных постоянных отрицательных напряжений на затвор во время облучения

Как видно из рисунка 19, расчетные и экспериментальные зависимости изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ от дозы ИИ хорошо согласуются в широком диапазоне постоянных отрицательных напряжений (от минус 2 В до минус 40 В) на затворе в процессе облучения.

При анализе расчетных и экспериментальных результатов видно, что за счет увеличения напряженности электрического поля в SiO_2 (увеличения абсолютного значения приложенного постоянного напряжения в процессе облучения) происходит увеличение радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ и связано это с увеличением величины выхода заряда $Y(E_{\text{SiO}_2})$. Нелинейность дозовых зависимостей: уменьшение наклона (снижение радиационной чувствительности) с увеличением поглощенной дозы связано с уменьшением выхода заряда $Y(E_{\text{SiO}_2})$, обусловленного уменьшением напряженности электрического поля в SiO_2 из-за увеличения количества накопленного положительного заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$. Таким образом, величина напряженности электрического поля в SiO_2 является доминирующим фактором, который управляет радиационной чувствительностью детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ. Накопленный положительный заряд на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ также приводит к увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 и при достижении значения ≈ 2 МВ/см начинает давать вклад в уменьшение наклона дозовых зависимостей за счет переноса заряда в Si_3N_4 . Значение коэффициента модели M составило 0,015.

Необходимо отметить, что при малых отрицательных напряжениях на затворе в процессе облучения достаточно быстро напряженность электрического поля в SiO_2 становится равной нулю за счет компенсации электрического поля накопленным на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ положительным зарядом. Так как выход заряда даже при нулевой напряженности электрического поля в SiO_2 имеет величину 0,121 при температуре равной 293 К, избежавшие «родственной» рекомбинации носители заряда в результате диффузии движутся по направлению к границе раздела диэлектриков и поверхности кремния в равном соотношении. При этом электроны и дырки, захватываемые на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, вклад в радиационную чувствительность не дают, так как компенсируют заряд друг друга. В тоже время, при движении носителей заряда в сторону поверхности кремния происходит захват положительного заряда на ловушки в приповерхностной области кремния, а электроны покидают диэлектрик, попадая в полупроводник.

Сечение захвата дырок на приповерхностные ловушки при отсутствии электрического поля является достаточно большим и можно считать, что захватывается 25 % положительного заряда, дошедшего до границы $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$.

Облучение тестовых образцов детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным током стока осуществлялось на изотопной установке с радионуклидом ^{60}Co гамма-излучением с мощностью экспозиционной дозы, равной 0,37 Р/с. В процессе облучения напряжение на стоке детектора составляло минус 0,1 В, ток стока с помощью автоматической подстройки напряжения на затворе был выбран и стабилизирован на уровне 48 мкА, контакты истока и подложки транзистора были объединены и находились под нулевым потенциалом. Напряжение между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в ходе всего эксперимента измерялось автоматически и в начале эксперимента (до облучения) составляло минус 2,5 В, а далее по мере набора дозы его абсолютное значение увеличивалось. Сравнение расчетных и полученных экспериментальных результатов представлено на рисунке 20.

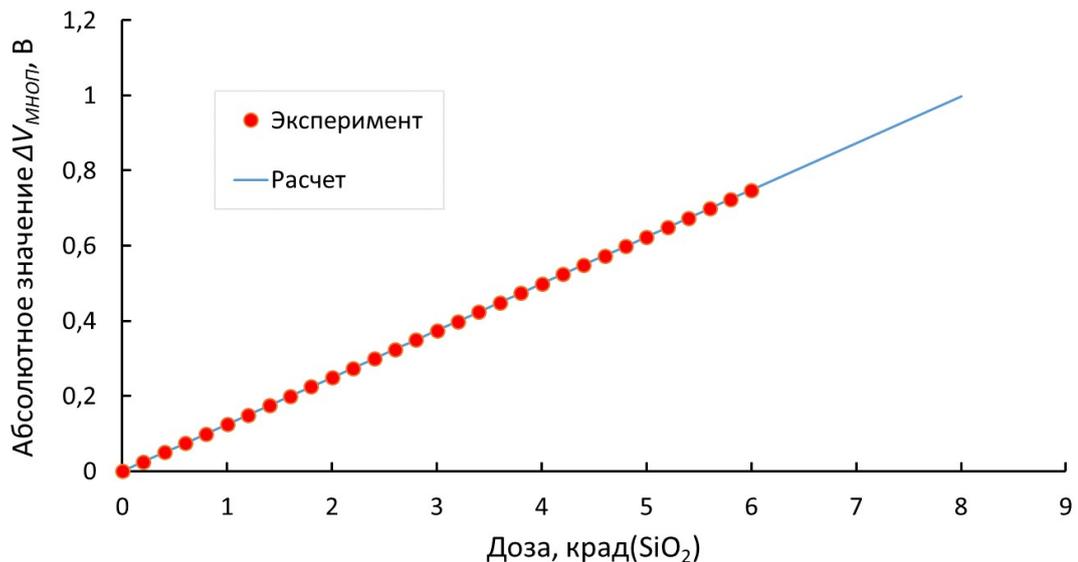


Рисунок 20 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от дозы гамма-излучения в режиме с постоянным током стока, равном 48 мкА

Как видно из рисунка 20, расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом. Коэффициент модели M был подобран из условия наилучшего соответствия расчетных и экспериментальных результатов. Значение коэффициента модели M для условий проведения облучений в режиме с постоянным током стока составило 0,015. Необходимо отметить, что при облучении в режиме с постоянным током стока наблюдается лучшая линейность зависимости ΔV_{MNOS} от дозы, чем для режима с постоянным отрицательным напряжением на затворе. Анализ расчетных и экспериментальных результатов показывает, что линейность зависимости ΔV_{MNOS} от дозы при облучении в режиме с постоянным током стока обеспечивается тем, что в процессе облучения напряженность электрического поля в SiO_2 остается неизменной.

Таким образом, проведенные в рамках настоящей работы экспериментальные и расчетные исследования показали, что физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ, описанная в разделе 2.3, позволяет успешно прогнозировать радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в широком диапазоне электрических режимов с учетом конструктивно-технологических параметров транзисторов.

2.5 Оптимизационные расчеты и выбор толщины подзатворных диэлектриков р-канальных МНОП-транзисторов для получения требуемых характеристик детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения

Для обеспечения требований по необходимой радиационной чувствительности и диапазону измеряемых доз разрабатываемых детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ были проведены оптимизационные расчеты конструктивных параметров затворной системы р-МНОПТ: а именно, толщины подзатворных

диэлектриков Si_3N_4 и SiO_2 также, как это было сделано в [93]. Ограничениями конструктивных параметров затворной системы служили технологические и электрофизические ограничения. Для различных электрических режимов работы во время облучения были проведены расчеты зависимости изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ от дозы ИИ, из которых были определены радиационная чувствительность (RS) и диапазон измеряемых доз.

Технологическим ограничением для изготовления р-МНОПТ, в первую очередь, является создание бездефектных слоев Si_3N_4 и SiO_2 большой толщины. Толщина качественного термически выращенного SiO_2 на кремниевой подложке не превышает 1 мкм, что справедливо для любой конструкции МДП-транзистора. Предельная толщина качественного Si_3N_4 составляет от 150 до 200 нм, что также определяется технологией создания слоя данного диэлектрика.

Электрофизическим ограничением конструктивных параметров затворной системы ЧЭ детекторов на основе р-МНОПТ является предельно допустимая напряженность электрического поля в слое SiO_2 , определяемая инжекцией Фаулера-Нордгейма из кремниевой подложки, равная ≈ 5 МВ/см, и предельно допустимая напряженность электрического поля в слое Si_3N_4 , определяемая началом переноса заряда через данный диэлектрик вследствие полевой ионизации ловушек по механизму Пула-Френкеля, равная ≈ 2 МВ/см.

Оптимизационные расчеты затворной системы р-МНОПТ, являющимися ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ были проведены для толщин слоев Si_3N_4 и SiO_2 , представленных в таблице 3. Минимальная величина поглощенной дозы, которая может быть измерена детектором с ЧЭ на основе МНОПТ, определялась по критерию $\Delta V_{MNOS} = 10$ мВ. Максимальная доза определялась по критериям либо уменьшения радиационной чувствительности RS более чем в 3 раза, либо превышением значения напряженности электрического поля в нитриде кремния ($E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$) равного 2,1 МВ/см. Следует отметить, что в ходе облучения напряженность электрического поля в Si_3N_4 растет, а в SiO_2 уменьшается, за счет накопления положительного заряда на границе раздела диэлектриков.

Таблица 3 — Варианты затворной системы р-МНОПТ для применения в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ

Вариант затворной системы р-МНОПТ	Толщина Si ₃ N ₄ , нм	Толщина SiO ₂ , нм
1	35	35
2	150	150
3	150	300
4	150	800

Расчетные зависимости абсолютного изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ от дозы ИИ, поглощенной в слое SiO₂, для режима с постоянным отрицательным напряжением на затворе детектора представлены на рисунках 21 – 24. Сплошными линиями на графиках представлены зависимости ΔV_{MNOS} от дозы ионизирующего излучения при значениях $E_{Si_3N_4}$ менее 2,1 МВ/см, точками представлены зависимости при значениях $E_{Si_3N_4}$ более 2,1 МВ/см или уменьшении значения чувствительности более чем в 3 раза по сравнению с начальной. При работе детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе зависимость ΔV_{MNOS} от дозы является нелинейной, и величина радиационной чувствительности RS снижается по мере набора дозы ИИ.

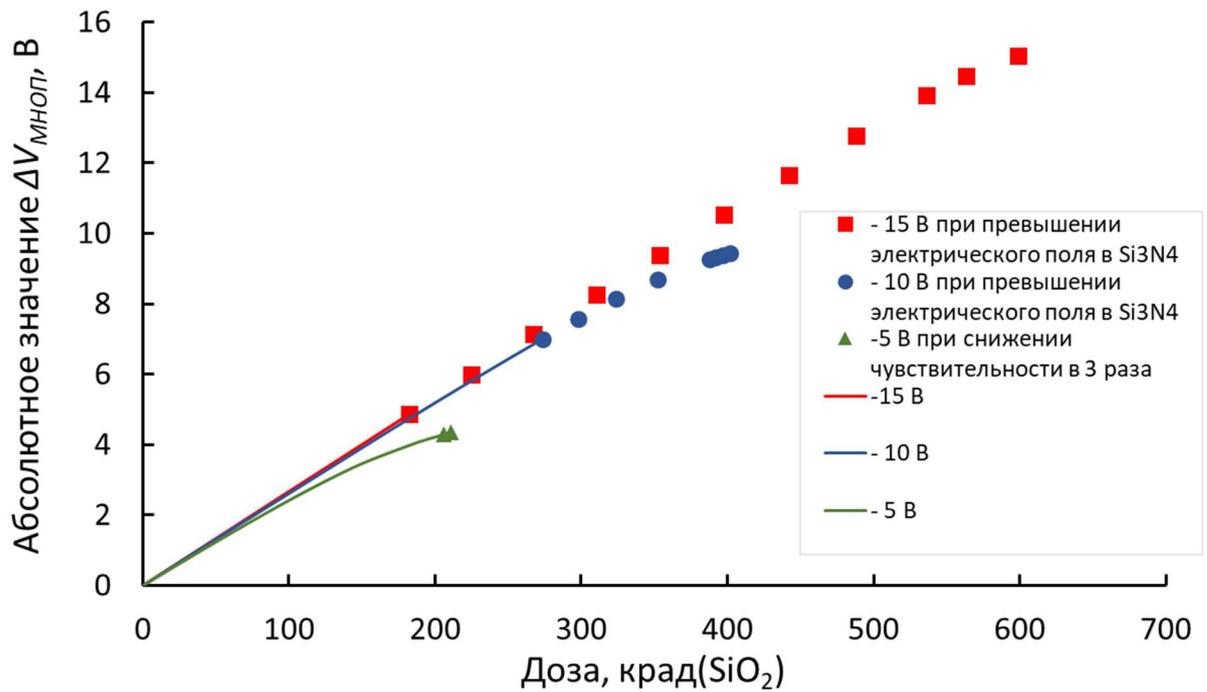


Рисунок 21 – Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм от дозы ИИ для различных постоянных отрицательных напряжений на затворе

На рисунке 21 представлены расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм от дозы ИИ. Красным цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 15 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Синим цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 10 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Зеленым цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 5 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более, чем в 3 раза по отношению к начальной, точки – зависимость после снижения чувствительности более, чем в 3 раза по отношению к начальной.

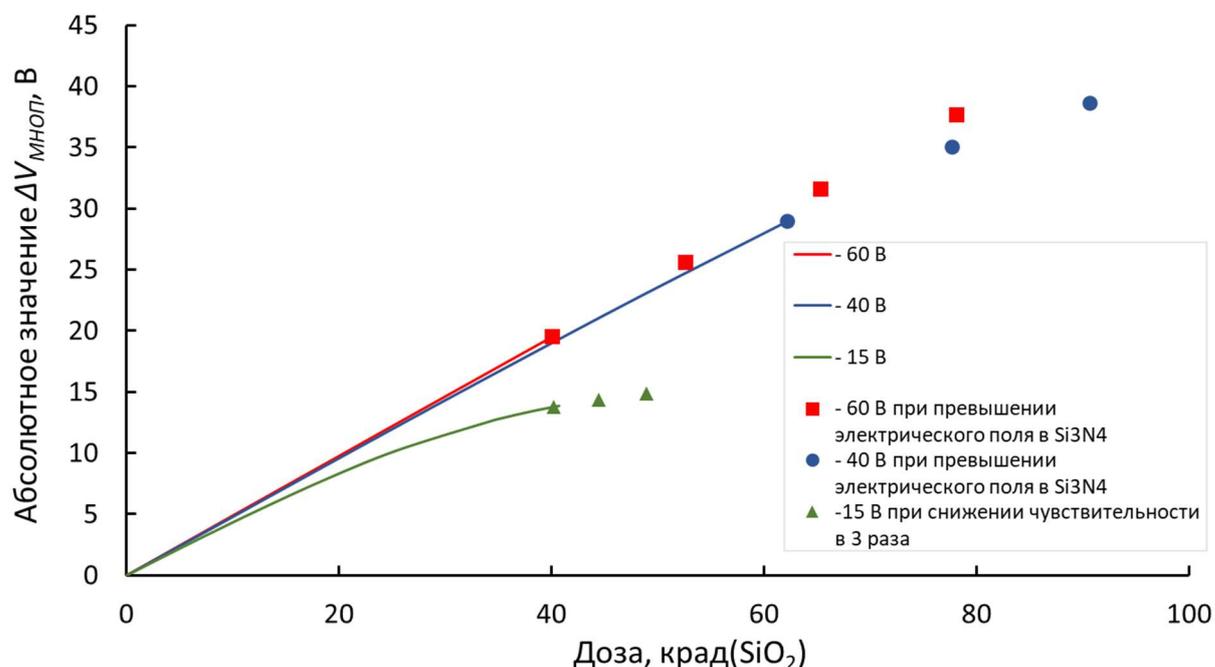


Рисунок 22 – Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с толщиной подзатворных диэлектриков Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 150 нм от дозы ИИ для различных постоянных отрицательных напряжений на затворе

На рисунке 22 представлены расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с толщиной подзатворных диэлектриков Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 150 нм от дозы ИИ. Красным цветом обозначена зависимость при V_g = минус 60 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{Si_3N_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{Si_3N_4}$ более 2,1 МВ/см. Синим цветом обозначена зависимость при V_g = минус 40 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{Si_3N_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость $E_{Si_3N_4}$ более 2,1 МВ/см. Зеленым цветом обозначена зависимость при V_g = минус 15 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более, чем в 3 раза по отношению к начальной, точки – зависимость после снижения чувствительности более, чем в 3 раза по отношению к начальной.

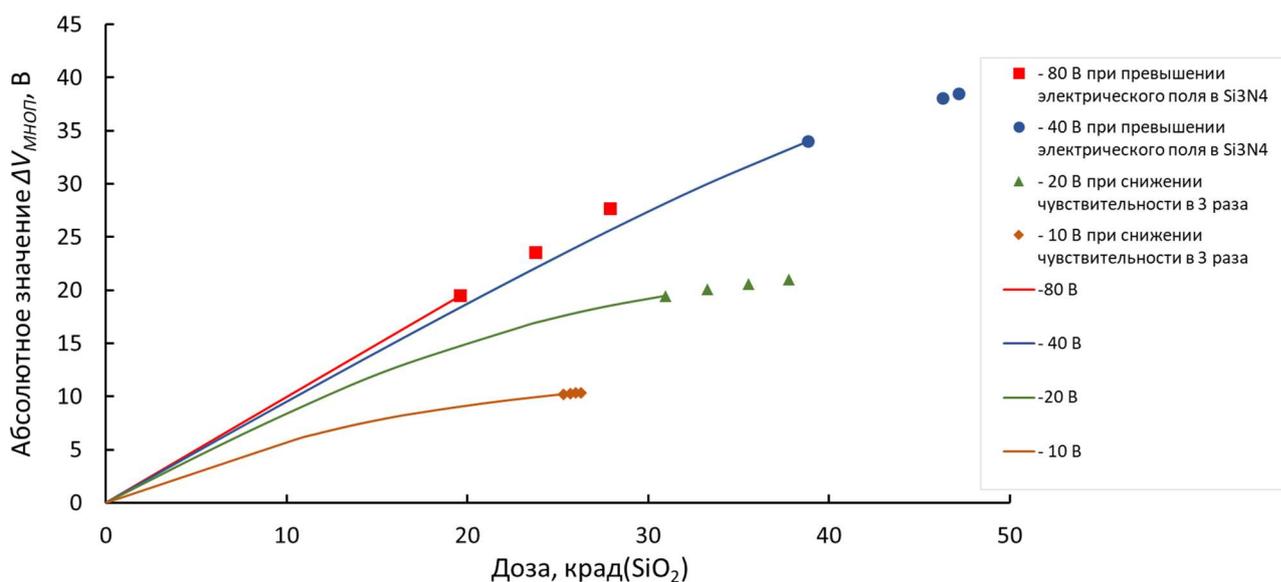


Рисунок 23 – Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм от дозы ИИ для различных постоянных отрицательных напряжений на затворе

На рисунке 23 представлены расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм от дозы ИИ. Красным цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 80 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Синим цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 40 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Зеленым цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 20 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной, точки – зависимость после снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной. Оранжевым цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 10 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной,

точки – зависимость после снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной.

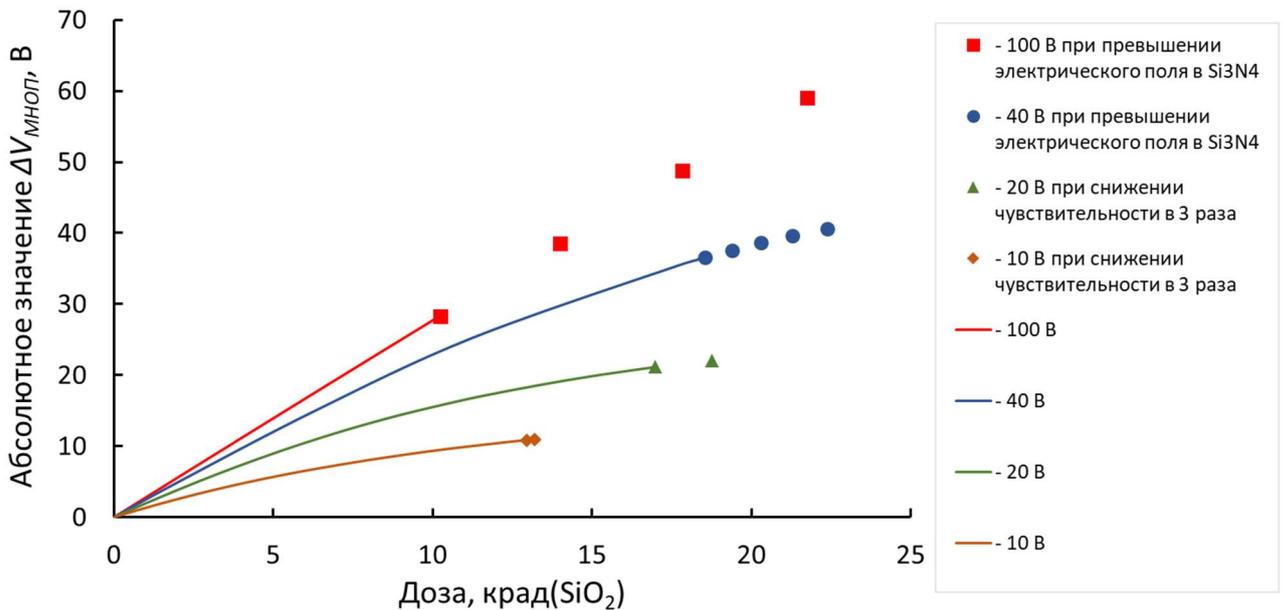


Рисунок 24 – Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм от дозы ИИ для различных постоянных отрицательных напряжений на затворе

На рисунке 24 представлены расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм от дозы ИИ. Красным цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 100 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Синим цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 40 В во время облучения: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Зеленым цветом обозначена зависимость при $V_g =$ минус 20 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной, точки – зависимость после снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной. Оранжевым цветом обозначена

зависимость при $V_g =$ минус 10 В во время облучения: линия – зависимость до снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной, точки – зависимость после снижения чувствительности более чем в 3 раза по отношению к начальной.

Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT от дозы ИИ, поглощенной в слое SiO_2 , для режима с постоянным током стока представлены на рисунке 25. Начальное напряжение между затвором и истоком транзистора при постоянном токе было принято равным минус 2 В. Красным цветом обозначена зависимость для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Синим цветом обозначена зависимость для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Зеленым цветом обозначена зависимость для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см. Оранжевым цветом обозначена зависимость для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм: линия – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ менее 2,1 МВ/см, точки – зависимость при $E_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ более 2,1 МВ/см.

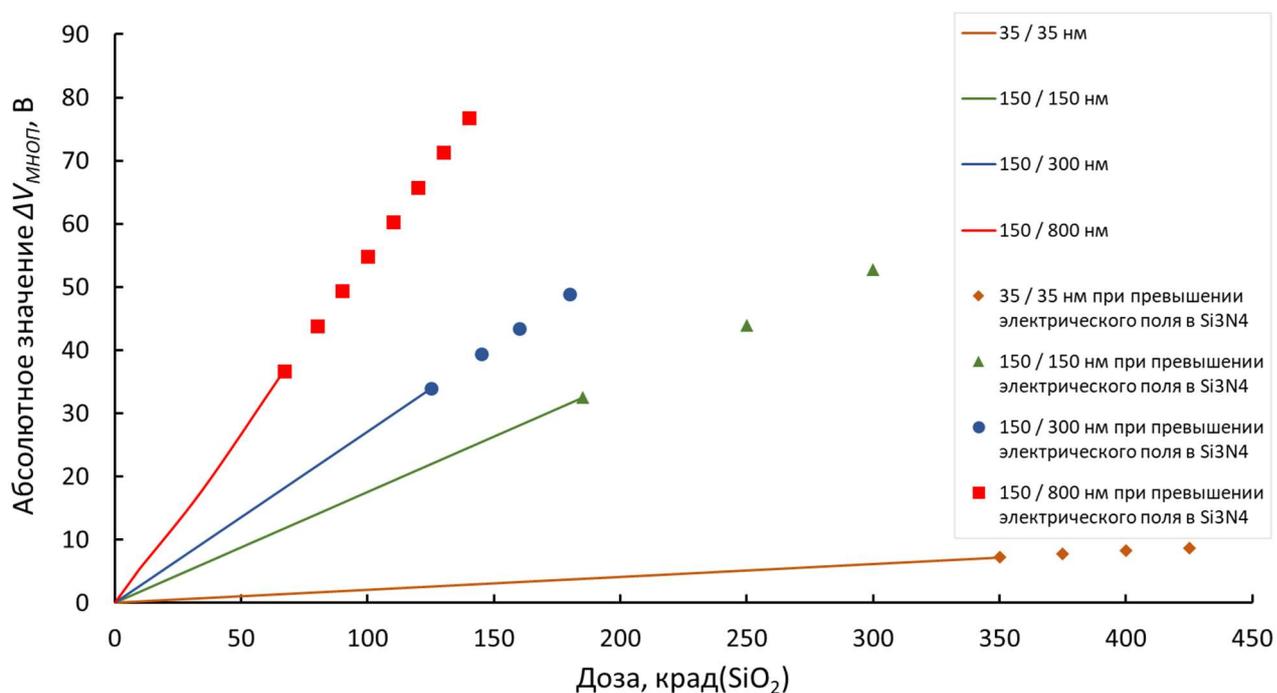


Рисунок 25 – Расчетные зависимости абсолютного значения изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих различные толщины, работающих в режиме с постоянным током стока, от дозы ИИ

Данные по расчетным значениям радиационной чувствительности и диапазону измеряемых доз для детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с различными вариантами затворной системы и различными режимами работы представлены в таблице 4. Следует принять во внимание, что диапазон изменения RS для режима использования при постоянном отрицательном напряжении на затворе соответствует крайним значениям диапазона измеряемых доз ИИ.

Таблица 4 – Расчетные значения радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз для детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с различными вариантами затворной системы и различными режимами работы

Толщина подзатворных диэлектриков, нм	Режим работы с постоянным отрицательным напряжением на затворе		Режим работы с постоянным токе стока	
	Чувствительность RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))	Диапазон измеряемых доз, крад(SiO ₂) (Гр(SiO ₂))	RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))	Диапазон измеряемых доз, крад(SiO ₂) (Гр(SiO ₂))
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 35 / 35	V _{зат} = минус 5 В 0,025 – 0,01 (2,5 - 1,0) V _{зат} = минус 10 В 0,026 – 0,024 (2,6 – 2,4) V _{зат} = минус 15 В 0,027 (2,7)	V _{зат} = минус 5 В 0,4 – 211 (4,0 - 2110) V _{зат} = минус 10 В 0,38 – 274 (3,8 - 2740) V _{зат} = минус 15 В 0,37 – 182 (3,7 - 1820)	0,021 (2,1)	0,48 – 350 (4,8 - 3500)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 150	V _{зат} = минус 15 В 0,44 – 0,148 (44 – 14,8) V _{зат} = минус 40 В 0,48 – 0,44 (48,0 – 44,0) V _{зат} = минус 60 В 0,49 (49,0)	V _{зат} = минус 15 В 0,023-40 (0,23 - 400) V _{зат} = минус 40 В 0,021 – 62 (0,21 - 620) V _{зат} = минус 60 В 0,02 – 40 (0,2 - 400)	0,18 (18,0)	0,06 – 185 (0,6 - 1850)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 300	V _{зат} = минус 10 В 0,57 – 0,19 (57,0 – 19,0) V _{зат} = минус 20 В 0,86 – 0,30 (86,0 – 30,0) V _{зат} = минус 40 В 0,96– 0,72 (96,0 – 72,0) V _{зат} = минус 80 В 1,0 (100,0)	V _{зат} = минус 10 В 0,018 – 25 (0,18 - 250) V _{зат} = минус 20 В 0,012 – 31 (0,12 - 310) V _{зат} = минус 40 В 0,01 – 39 (0,1 - 390) V _{зат} = минус 80 В 0,01 – 20 (0,1 - 200)	0,27 (27,0)	0,04 – 125 (0,4 - 1250)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 800	V _{зат} = минус 10 В 1,35 – 0,45 (135 - 45) V _{зат} = минус 20 В 1,96 – 0,64 (196 - 64) V _{зат} = минус 40 В 2,46 – 1,29 (246 - 129) V _{зат} = минус 100 В 2,79 – 2,75 (279 - 275)	V _{зат} = минус 10 В 0,007 – 13 (0,07 - 130) V _{зат} = минус 20 В 0,005 – 17 (0,05 - 170) V _{зат} = минус 40 В 0,004 – 19 (0,04 - 190) V _{зат} = минус 100 В 0,004 – 10 (0,04 - 100)	0,55 (55,0)	0,018 – 67 (0,18 - 670)

Как показали оптимизационные расчеты, требования, предъявляемые к детекторам поглощенной дозы ИИ типа 1 и 2 с ЧЭ на основе р-МНОПТ, могут быть выполнены при различных вариантах толщины подзатворных диэлектриков.

В качестве чувствительного элемента детектора типа 1 с высокой радиационной чувствительностью может быть использован р-МНОПТ со следующими вариантами затворной системы:

- $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, которая в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе равным минус 20 В обеспечивает детектору радиационную чувствительность от 86 до 30 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 0,12 до 310 Гр(SiO_2) (для диапазона от 0,12 до 159 Гр(SiO_2) чувствительность составляет от 86 до 72 мВ/Гр(SiO_2)), при минус 40 В на затворе обеспечивает радиационную чувствительность от 96,0 до 72,0 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 0,1 до 390 Гр(SiO_2);

- $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, которая в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе равным минус 20 В обеспечивает радиационную чувствительность от 196 до 64 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 0,05 до 170 Гр(SiO_2) (для диапазона от 0,05 до 155 Гр(SiO_2) чувствительность составляет от 196 до 74 мВ/Гр(SiO_2)), при минус 40 В обеспечивает радиационную чувствительность от 246 до 129 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 0,04 до 190 Гр(SiO_2). Данный вариант является наиболее предпочтительным, так как обеспечивает запас по радиационной чувствительности и диапазону измеряемых доз.

В качестве чувствительного элемента детектора типа 2 с низкой радиационной чувствительностью и широким диапазоном измеряемых доз может быть использован р-МНОПТ с затворной системой:

- $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, которая в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе равным минус 5 В обеспечивает детектору радиационную чувствительность от 2,5 до 1,0 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 4,0 до 2110 Гр(SiO_2), при минус 10 В обеспечивает радиационную чувствительность от 2,6 до 2,4 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 3,8 до 2740 Гр(SiO_2), при минус 15 В обеспечивает радиационную чувствительность 2,7 мВ/Гр(SiO_2) в диапазоне от 3,7 до

1820 Гр(SiO₂), в режиме с постоянным током стока обеспечивает радиационную чувствительность 2,1 мВ/Гр(SiO₂) в диапазоне от 4,8 до 3500 Гр(SiO₂);

- Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 150 нм, которая в режиме с постоянным током стока обеспечивает детектору радиационную чувствительность 18,0 мВ/Гр(SiO₂) в диапазоне от 0,6 до 1850 Гр(SiO₂);

- Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 300 нм, которая в режиме с постоянным током стока обеспечивает детектору радиационную чувствительность 27,0 мВ/Гр(SiO₂) в диапазоне от 0,4 до 1250 Гр(SiO₂).

При совместном использовании двух ЧЭ на основе p-MHOPT с высокой и низкой радиационной чувствительностью в одном детекторе поглощенной дозы ИИ можно обеспечить диапазон измерения дозы от 0,04 до 3500 Гр(SiO₂) с чувствительностью до 246 мВ/Гр(SiO₂).

2.6 Выводы к главе 2

Глава была посвящена разработке конструкции детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT в рамках единой конструктивно-технологической концепции для применения в *in vivo* дозиметрии, в составе РЭА КА и на ОИАЭ, в том числе для радиационных испытаний, а также для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ. В данной главе были выбраны такие конструктивные особенности МДП-транзистора, как тип канала, тип проводимости канала, тип проводимости подложки и конструкция затворной системы MHOPT. В результате, в данной работе разрабатывается детектор поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с индуцированным каналом на кремниевой подложке n-типа проводимости. Также в данной главе были определены требования к характеристикам разрабатываемых детекторов. Было решено разрабатывать 2 типа детекторов: с высокой чувствительностью более 70 мВ/Гр(SiO₂) и диапазоном измеряемых доз от 0,2 до 100 Гр(SiO₂), и с низкой чувствительностью не менее 1 мВ/Гр(SiO₂) и широким диапазоном измеряемых доз от 5 до 10³ Гр(SiO₂).

В данной главе была разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см. Данная модель прошла валидацию на детекторах с ЧЭ на основе р-МНОПТ с затворной системой $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм.

Показано, что нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

Для получения оптимальных характеристик детекторов поглощенной дозы ИИ по разработанной физической модели были проведены оптимизационные расчеты конструкции затворных систем детекторов: толщин диэлектрических слоев подзатворного Si_3N_4 и SiO_2 р-МНОПТ, являющихся ЧЭ детекторов. Данные расчеты показали, что радиационную чувствительность детектора более 70 мВ/Гр(SiO_2), вплоть до 246 мВ/Гр(SiO_2), можно получить с помощью ЧЭ на основе р-МНОПТ со следующими параметрами затворной системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, $150 / 800$ нм, (параметры затворных систем представлены в порядке возрастания чувствительности) не превышая напряжение питания минус 40 В, при этом минимальная регистрируемая доза составит 0,04 Гр(SiO_2), а максимальная 390 Гр(SiO_2). Диапазон регистрируемых доз от 5 до 10^3 Гр(SiO_2), вплоть до 3500 Гр(SiO_2), возможно получить при использовании ЧЭ на основе р-МНОПТ с затворными системами: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, при этом чувствительность будет варьироваться от 1,0 до 27 мВ/Гр(SiO_2).

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ P-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ

3.1 Исследование возможности создания p-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с требуемыми характеристиками в рамках единой конструктивно-технологической концепции

На данный момент МНОП-транзисторы, как и МОП-транзисторы, изучены достаточно хорошо, их создание не представляет большой сложности [94]. Для разработки необходимого p-МНОПТ, использующегося в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ требуется детально проработать характеристики, представленные в таблице 5, являющиеся следствием предъявляемых требований к детекторам поглощенной дозы ИИ, определенных в главе 2.

Таблица 5 – Требуемые характеристики p-МНОПТ для применения в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ

№ п/п	Характеристика, единица измерения (режим измерения)	Буквенное обозначение характеристики	Норма характеристики
1	Ток утечки сток-исток, нА ($U_{си} = \text{минус } 20 \text{ В}, U_{зи} = 0 \text{ В}$)	$I_{сут}$	Не менее минус 1
2	Ток утечки затвора, нА $U_{зи} = + 20 \text{ В}, U_{си} = 0 \text{ В}$ $U_{зи} = \text{минус } 20 \text{ В}, U_{си} = 0 \text{ В}$	$I_{зут}$	Не более 1 Не менее минус 1
3	Пороговое напряжение, В (определяется по сток-затворной ВАХ при $U_{си} = \text{минус } 0,1 \text{ В}$, $I_{си} = \text{минус } 10 \text{ мкА}$)	$U_{порог}$	Не менее минус 1,3 Не более минус 0,5
4	Максимально допустимое напряжение затвор-исток, В	$U_{зи\text{max}}$	Не менее 50

Продолжение таблицы 5

№ п/п	Характеристика, единица измерения (режим измерения)	Буквенное обозначение характеристики	Норма характеристики
5	Максимально допустимое напряжение сток-исток, В	$U_{си\max}$	Не менее 50
6	Отношение ширины к длине канала	-	от 10 до 15
7	Две транзисторные структуры на одном кристалле, с индивидуальными контактами к подложке	-	Наличие

Примечание: значения параметров должны соответствовать указанным диапазонам при температуре окружающей среды (корпуса) от минус 40 до + 85 °С

Обеспечить данные требования по току утечки и формированию двух транзисторных структур на одном кристалле возможно двумя способами:

1) Создание кольцевой структуры транзистора, где вокруг области стока формируется кольцевая область истока, формируется отдельный контакт к подложке, препятствующий также образованию канала за пределами активной области (рисунок 26).

2) Создание полосковой структуры и формирование n^+ -области по периферии транзистора для ограничения канала (рисунок 27).

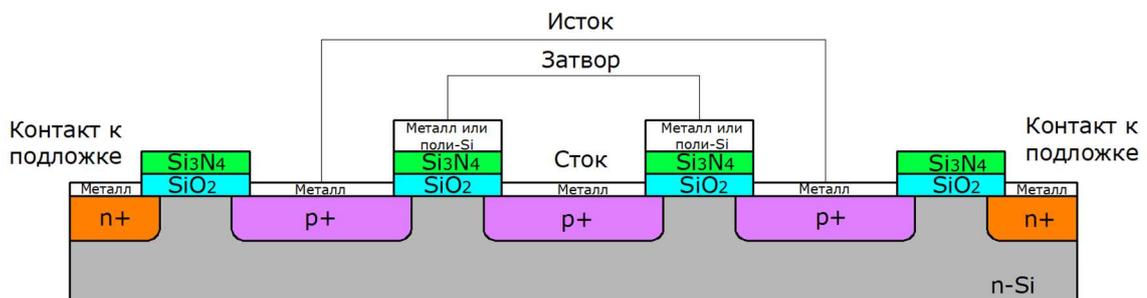


Рисунок 26 – Разрез кольцевой структуры р-МНОПТ

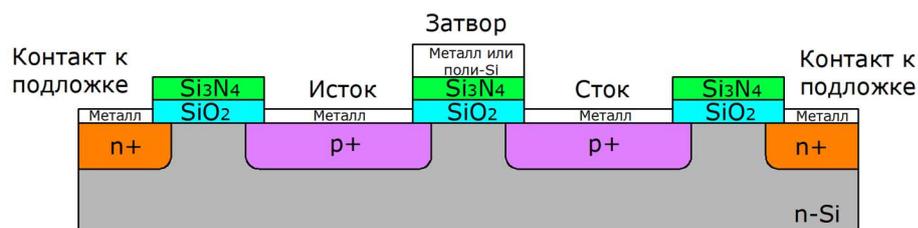


Рисунок 27 – Разрез полосковой структуры р-МНОПТ

Для обеспечения требования по расположению двух транзисторных структур на одном кристалле необходимо их электрически разделить. Сделать это возможно двумя методами: изоляцией, основанной на обратно-смещенном p-n переходе и LOCOS (LOCAl Oxidation of Silicon). Изоляция обратнo-смещенным p-n переходом и LOCOS двух p-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, представлены на рисунках 28 и 29.

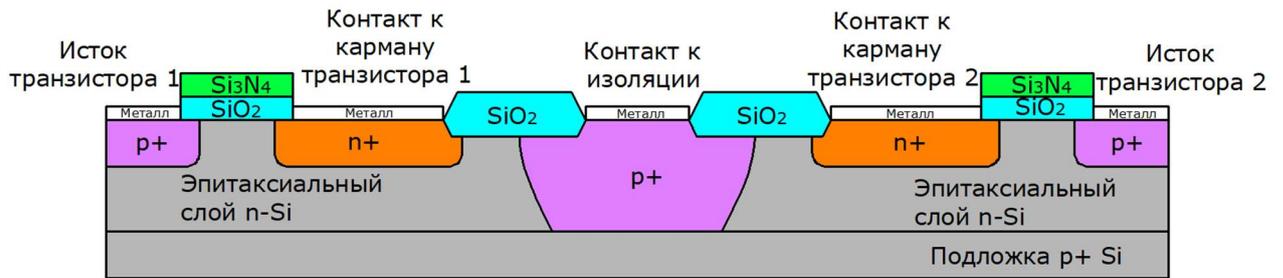


Рисунок 28 – Изолация обратнo-смещенным p-n переходом двух p-МНОПТ, расположенных на одном кристалле

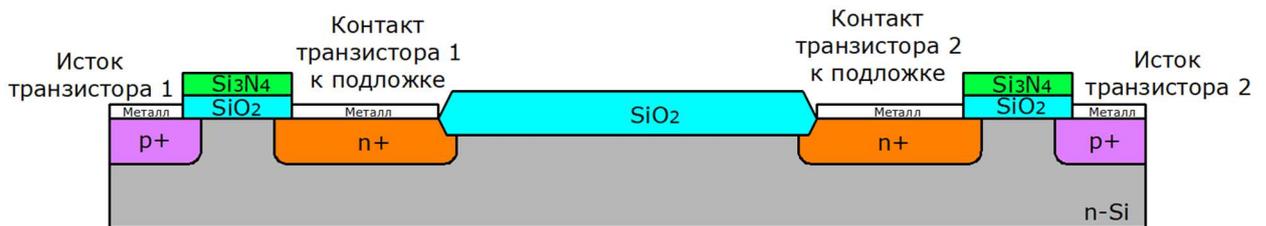


Рисунок 29 – Изолация LOCOS двух p-МНОПТ, расположенных на одном кристалле

Технология изготовления МНОПТ с изоляцией обратнo-смещенным p-n переходом достаточно сложна и требует более длительных сроков изготовления. Например, необходима кремниевая эпитаксиальная подложка, а также в данном варианте присутствует большое количество паразитных биполярных структур, что может препятствовать нормальной работе МНОПТ в определенных режимах.

Технология изготовления МНОПТ на объемном кремнии с изоляцией LOCOS является оптимальной. В данном варианте технологического исполнения два транзистора разделены сопротивлением подложки, зависящего от удельного

сопротивления подложки и расстояния между транзисторами, и при грамотном выборе этих параметров электрической связи между МНОПТ, расположенными на одном кристалле, не будет.

Для обеспечения требований по максимально допустимому напряжению сток-исток требуется определить удельное сопротивление кремниевой подложки, так как от него будет зависеть напряжение лавинного пробоя р-п перехода стоковой области. Напряжение лавинного пробоя U_{bd} определяют по приближенным эмпирическим формулам, так для резкого несимметричного р-п перехода на кремнии при $T = 300$ К U_{bd} равно [95]:

$$U_{bd} = 5,3 \cdot 10^{13} N_b^{-3/4}, \quad (16)$$

где N_b – концентрация примеси в слаболегированной области базы диода (в нашем случае равна концентрации примеси в кремниевой подложке N_d).

По выражению 16 был сделан расчет напряжений пробоя для наиболее распространенных кремниевых подложек n-типа проводимости, результаты расчета представлены в таблице 6. Расчет концентрации примеси в кремниевой подложке проводился по выражению 17, где $\mu_n = 1350$ см²/В·с – подвижность электронов в кремнии, ρ – удельное сопротивление кремния.

$$N_d = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho} \quad (17)$$

Таблица 6 – Результаты расчета пробивного напряжения плоского р-п перехода для различных типов кремниевых подложек n-типа проводимости

Тип кремния	КЭФ 0,3	КЭФ 1,0	КЭФ 2,5	КЭФ 3,5	КЭФ 4,5	КЭФ 6,5
Концентрация примеси, см ⁻³	$1,5 \cdot 10^{16}$	$4,6 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,0 \cdot 10^{15}$	$7,1 \cdot 10^{14}$
Напряжение пробоя, В	38,28	94,43	187,75	241,64	291,76	384,42

При оценке результатов расчета стоит учитывать следующий фактор: МДП-транзисторы обладают значительно более низким пробивным напряжением,

чем области с плоским p-n переходом ввиду наличия локальных точек напряженности и сложной геометрии p-n переходов.

Для расчета порогового напряжения (V_{th}) p-МНОПТ было использовано следующее выражение [94, 96]:

$$V_{th} = -2\varphi_b - \frac{Q_b}{C_{tot}} - \frac{Q_{ss}}{C_{tot}} - |\varphi_{ms}|, \quad (18)$$

где Q_b – заряд обедненной области в полупроводнике на единицу площади, Q_{ss} – заряд поверхностных состояний на единицу площади, φ_{ms} – разность работ выхода материала затвора и полупроводника.

Расчет емкости подзатворных диэлектриков на единицу площади для четырех вариантов затворной системы p-МНОПТ со значениями относительных диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_{Si_3N_4} = 7,0$ и $\varepsilon_{SiO_2} = 3,85$ приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Расчеты емкости подзатворных диэлектриков на единицу площади для четырех вариантов затворной системы p-МНОПТ

Вариант затворной системы	Толщина Si_3N_4 / SiO_2 , нм	C_{SiO_2} , Ф/см ²	$C_{Si_3N_4}$, Ф/см ²	C_{tot} , Ф/см ²
1	35 / 35	$9,74 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$	$6,28 \cdot 10^{-8}$
2	150 / 150	$2,27 \cdot 10^{-8}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	$1,47 \cdot 10^{-8}$
3	150 / 300	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	$8,91 \cdot 10^{-9}$
4	150 / 800	$4,26 \cdot 10^{-9}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	$3,86 \cdot 10^{-9}$

Разность работ выхода электрона из материала затвора и из кремниевой пластины можно вычислить из следующего выражения 19 [97]:

$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \varphi_b \right), \quad (19)$$

где φ_m – работа выхода из металла, χ – сродство электрона в полупроводнике, $E_g/2q$ – середина запрещенной зоны в полупроводнике. В нашем случае, при использовании в качестве материала затвора сильно легированного поликремния n-типа, где уровень Ферми практически совпадает с положением дна зоны

проводимости, $\varphi_m = 4,15$ В (величина сродства электрона в кремнии), $E_g/2q = 0,56$ В, а разницу между уровнем Ферми и серединой запрещенной зоны в кремниевой подложке можно вычислить из выражения 20:

$$\varphi_b = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right), \quad (20)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Также φ_{ms} можно вычислить, как разность уровней Ферми в поликремниевом затворе и полупроводнике.

Заряд обедненной области и заряд поверхностных состояний на единицу площади вычисляются из выражений 21 и 22, соответственно [98]:

$$Q_b = \sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon_{si} \varepsilon_0 \cdot N_d \cdot 2\varphi_b}, \quad (21)$$

где ε_{si} – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, равная 11,9.

$$Q_{ss} = N_{ss} \cdot q, \quad (22)$$

где N_{ss} – плотность поверхностных состояний. При расчете порогового напряжения данный параметр был взят в двух значениях: $1,0 \cdot 10^{11}$ см⁻² (предельное значение по аттестации технологического процесса подзатворного окисления) и $2,7 \cdot 10^{11}$ см⁻² (аналитический расчет на конечном этапе изготовления р-МНОПТ). Полученные зависимости порогового напряжения от концентрации примеси в подложке для четырех вариантов затворной системы р-МНОПТ приведены на рисунках 30 и 31.

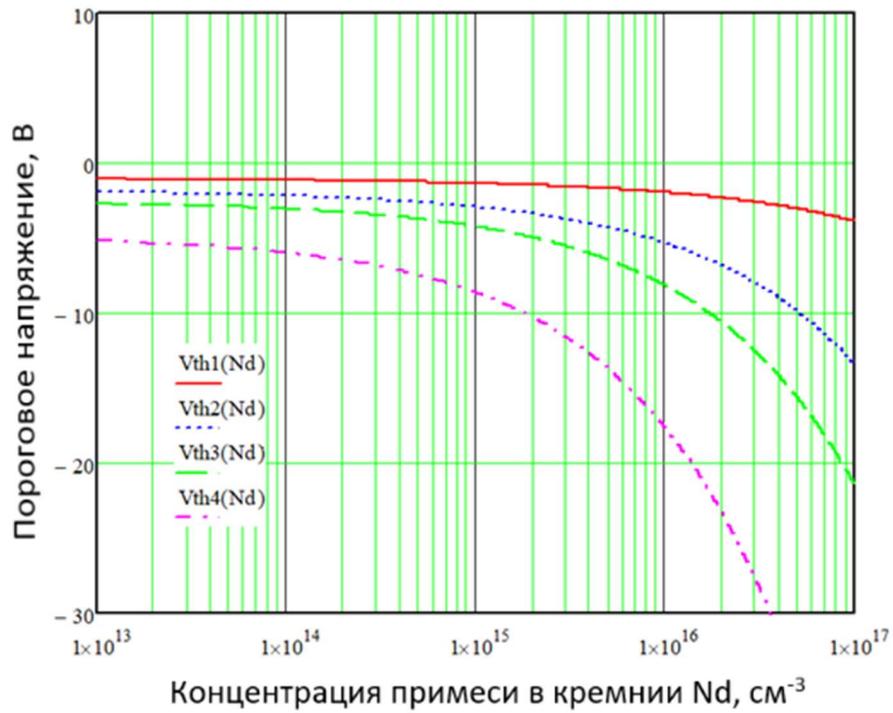


Рисунок 30 – Зависимость порогового напряжения р-МНОПТ от концентрации примеси в кремнии для 4 вариантов затворной системы при $N_{ss} = 1,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

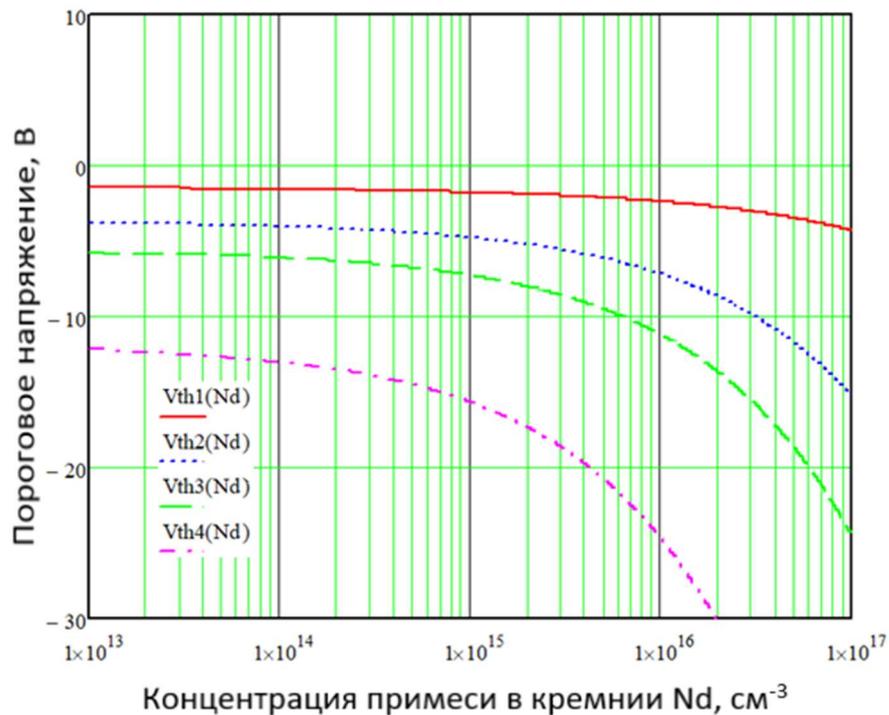


Рисунок 31 – Зависимость порогового напряжения р-МНОПТ от концентрации примеси в кремнии для 4 вариантов затворной системы при $N_{ss} = 2,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

В таблице 8 приведены расчетные значения пороговых напряжений р-МНОПТ с различной толщиной подзатворных диэлектрических слоев Si_3N_4 и SiO_2 для различных полупроводниковых подложек n-типа проводимости и различных плотностей поверхностных состояний.

Таблица 8 – Расчетные значения пороговых напряжений р-МНОПТ с различной толщиной подзатворных диэлектрических слоев Si_3N_4 и SiO_2 для различных полупроводниковых подложек n-типа проводимости и различных плотностей поверхностных состояний

N_{ss} , см^{-2}	Толщина $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, нм	Пороговое напряжение, В					
		Тип кремневой подложки (концентрация примеси, см^{-3})					
		КЭФ 0,3 ($1,5 \cdot 10^{16}$)	КЭФ 1 ($4,6 \cdot 10^{15}$)	КЭФ 2,5 ($1,9 \cdot 10^{15}$)	КЭФ 3,5 ($1,3 \cdot 10^{15}$)	КЭФ 4,5 ($1,0 \cdot 10^{15}$)	КЭФ 6,5 ($7,1 \cdot 10^{14}$)
$1,0 \cdot 10^{11}$	35/35	- 2,13	- 1,65	- 1,44	- 1,37	- 1,33	- 1,28
	150/150	- 6,12	- 4,16	- 3,31	- 3,05	- 2,89	- 2,72
	150/300	- 9,48	- 6,27	- 4,88	- 4,46	- 4,21	- 3,94
	150/800	- 20,67	-13,30	- 10,14	- 9,17	- 8,61	- 7,98
$2,7 \cdot 10^{11}$	35/35	- 2,57	- 2,09	- 1,87	- 1,80	- 1,76	- 1,71
	150/150	- 7,98	- 6,02	- 5,16	- 4,90	- 4,75	- 4,58
	150/300	- 12,54	- 9,32	- 7,94	- 7,51	- 7,27	- 6,99
	150/800	- 27,72	- 20,35	- 17,18	- 16,22	- 15,65	- 15,03

При анализе расчетов пороговых напряжений и с учетом факта, что любой технологический процесс изготовления имеет разброс параметров (также разброс параметров присутствует и в полупроводниковой пластине), а также с учетом того, что все р-МНОПТ с различными вариантами затворной системы предполагается изготавливать на кремниевой подложке одного типа, следует выбрать тип кремниевой пластины, обладающий наименьшим разбросом пороговых напряжений всех четырех типов транзисторов. Но выбор кремния с наибольшим удельным сопротивлением (наименьшей концентрацией примеси) может привести к ухудшению других характеристик транзисторов. Таким образом, оптимальным вариантом подложки является кремниевая пластина КЭФ 4,5.

Так как изготовление р-МНОПТ с четырьмя вариантами затворной системы будет осуществляться на кремниевой подложке КЭФ 4,5, они будут обладать различными пороговыми напряжениями, поэтому для приведения порогового

напряжения к требуемому значению, необходима подгонка данного параметра, которая будет осуществляться с помощью ионного легирования, позволяющего изменять концентрацию примеси в подзатворной области МНОП-транзистора.

Для расчета зависимости порогового напряжения от дозы имплантации ионов бора, ее следует рассматривать, как имплантацию примеси на мелкую глубину, в таком случае пороговое напряжение V_{thp} будет рассчитываться с помощью следующего выражения [94]:

$$V_{thp} = V_{th0} + \frac{Q_p}{C_{tot}}, \quad (23)$$

где V_{th0} – пороговое напряжение до подгонки, Q_p – доза легирования бором при подгонке порога, мкКл/см². Результаты расчетов и зависимости порогового напряжения для р-МНОПТ от величины дозы ионов бора при подгонке для четырех вариантов затворной системы и двух вариантов плотности поверхностных состояний приведены в таблице 9 и на рисунках 32 и 33.

Таблица 9 – Результаты расчета порогового напряжения для четырех вариантов затворной системы р-МНОПТ в зависимости от дозы ионов бора при подгонке порогового напряжения для двух вариантов плотности поверхностных состояний

Доза, мкКл/см ²	Пороговое напряжение, В							
	N _{ss} = 1,0 · 10 ¹¹ см ⁻²				N _{ss} = 2,7 · 10 ¹¹ см ⁻²			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
0	- 1,33	- 2,89	- 4,21	- 8,61	- 1,76	- 4,75	- 7,27	- 15,65
0,01	- 1,17	- 2,21	- 3,09	- 6,02	- 1,60	- 4,07	- 6,14	- 13,06
0,02	- 1,01	- 1,53	- 1,97	- 3,43	- 1,44	- 3,39	- 5,02	- 10,47
0,03	- 0,85	- 0,85	- 0,85	- 0,84	- 1,28	- 2,70	- 3,90	- 7,88
0,04	- 0,69	- 0,16	0,28	1,75	- 1,12	- 2,02	- 2,78	- 5,29
0,05	- 0,53	0,52	1,40	4,34	- 0,96	- 1,34	- 1,65	- 2,70
0,06	- 0,37	1,20	2,52	6,93	- 0,80	- 0,66	- 0,53	- 0,11
0,07	- 0,21	1,88	3,65	9,52	- 0,65	0,03	0,59	2,48
0,08	- 0,05	2,57	4,77	12,11	- 0,49	0,71	1,72	5,07
0,09	0,11	3,25	5,89	14,70	- 0,33	1,39	2,84	7,66
0,1	0,27	3,93	7,01	17,29	- 0,17	2,07	3,96	10,25

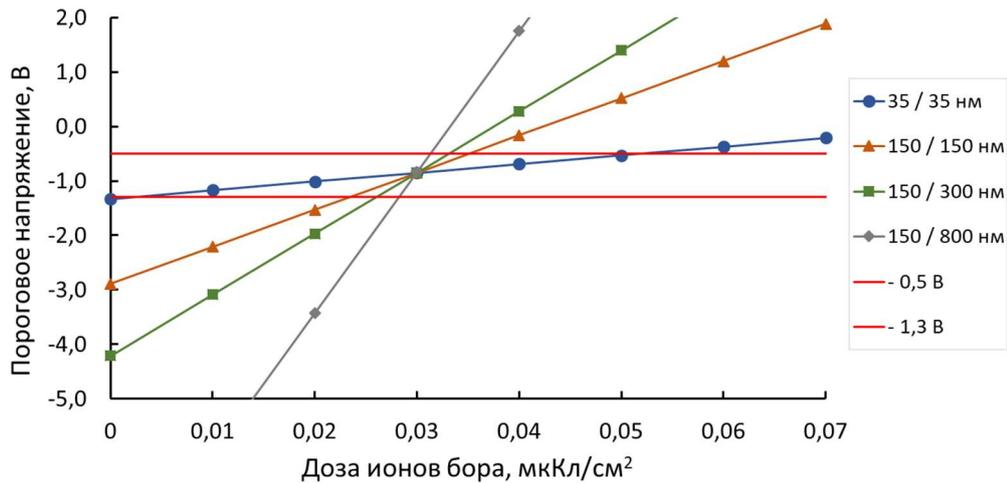


Рисунок 32 – Зависимость порогового напряжения для четырех вариантов затворной системы р-МНОПТ от дозы ионов бора при подгонке порогового напряжения, $N_{ss} = 1,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

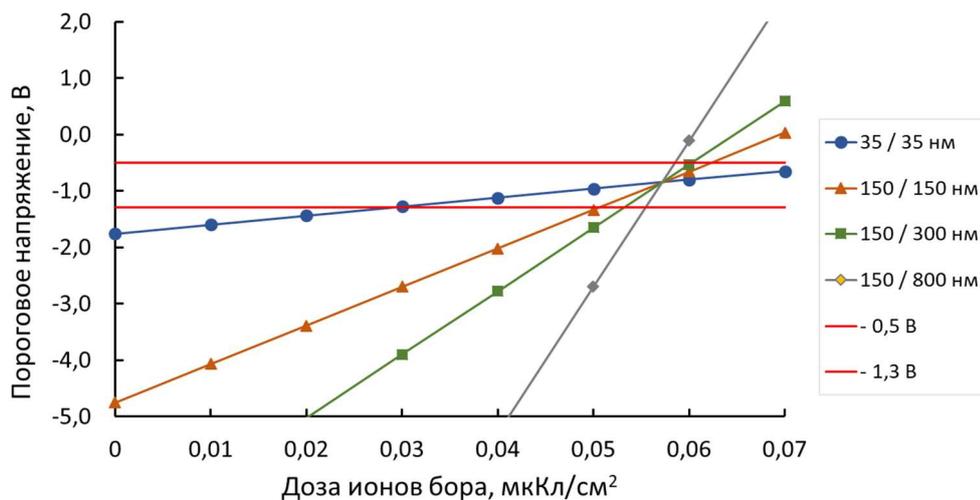


Рисунок 33 – Зависимость порогового напряжения для четырех вариантов затворной системы р-МНОПТ от дозы ионов бора при подгонке порогового напряжения, $N_{ss} = 2,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

Положительное значение порогового напряжения в таблице 9 означает, что в р-МНОПТ при подгонке порога ионным легированием бора образовался встроенный канал. Из рисунков 32 и 33 хорошо видно, что при помощи ионного легирования бором возможно осуществить подгонку порогового напряжения до требуемых значений от минус 0,5 до минус 1,3 В, но вследствие наличия резкой

зависимости порогового напряжения от дозы легирования ионами бора для затворных систем с толстыми слоями подзатворных диэлектриков, на таких структурах может не быть удовлетворительной воспроизводимости значений порогового напряжения и за счет этого может быть снижен процент выхода годных кристаллов. Следует учесть и тот факт, что часть имплантированной примеси, находящейся вблизи поверхности, будет диффундировать в слой SiO_2 , поэтому фактически необходимые дозы ионов бора могут оказаться значительно больше расчетных. Чтобы точно подобрать дозы ионной имплантации примеси следует провести приборно-технологическое моделирование и контрольные операции легирования на тестовых пластинах.

Требования по току утечки сток-исток (менее 1 нА) и затвор-исток (менее 1 нА) разрабатываемых р-МНОПТ должны обеспечиваться с большим запасом конструкцией (заданная толщина подзатворных диэлектриков, геометрические размеры канала, подложка КЭФ 4,5) и технологией изготовления.

3.2 Разработка топологии кристаллов р-канальных МНОП-транзисторов

Согласно выбранному в предыдущем разделе варианту технологического исполнения кристалла, в котором два р-МНОПТ, расположенные на одном кристалле, разделены сопротивлением подложки с изоляцией LOCOS и учитывая размер кристалла, равный $1,0 \times 1,0$ мм, сопротивление полупроводника между двумя транзисторами будет составлять несколько Ом.

Для технологичности операции приварки проволочных выводов к контактными площадкам кристалла транзистора ультразвуковой сваркой площадь контактных площадок должна быть 150×150 мкм. Диаметр алюминиевой проволоки в таком случае должен составлять 50 мкм с учетом того, что в процессе ультразвуковой сварки происходят колебательные движения по одной или

нескольким осям и размер контактной площадки должен иметь тройной запас по отношению к толщине привариваемой проволоки.

В ходе анализа возможности выполнения требований к конструкции р-МНОПТ, используемого в качестве чувствительного элемента детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения, основной конструкцией выбран полосковый вариант и в соответствии с требованием, что отношение ширины к длине канала должно находиться в диапазоне от 10 до 15, данная конструкция является наиболее предпочтительной, нежели кольцевая. Параметры выбранной полосковой конструкции р-МНОПТ приведены в таблице 10, из которой видно, что было предложено три варианта топологии полоскового МНОПТ со следующими отношениями ширины к длине канала: 10; 12; 12,5; 15. Также была спроектирована в двух вариантах топология кольцевого р-МНОПТ для возможного нивелирования пробойных эффектов на краях рабочей области транзистора. Во всех вариантах топологии были учтены упреждения на боковую диффузию областей стока и истока.

Таблица 10 – Параметры конструкции р-МНОПТ для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения

Вариант топологии	Конструкция транзистора	Длина канала, мкм	Отношение ширины к длине канала
1	Кольцевая одинарная	20	12
2	Кольцевая сдвоенная	20	12
3	Полосковая	20	10
4	Полосковая	20	15
5	Полосковая	10	12,5

Для осуществления технологического и параметрического контроля различных фрагментов конструкции и слоев р-МНОПТ были разработаны два тестовых модуля, топология которых представлена на рисунке 34.

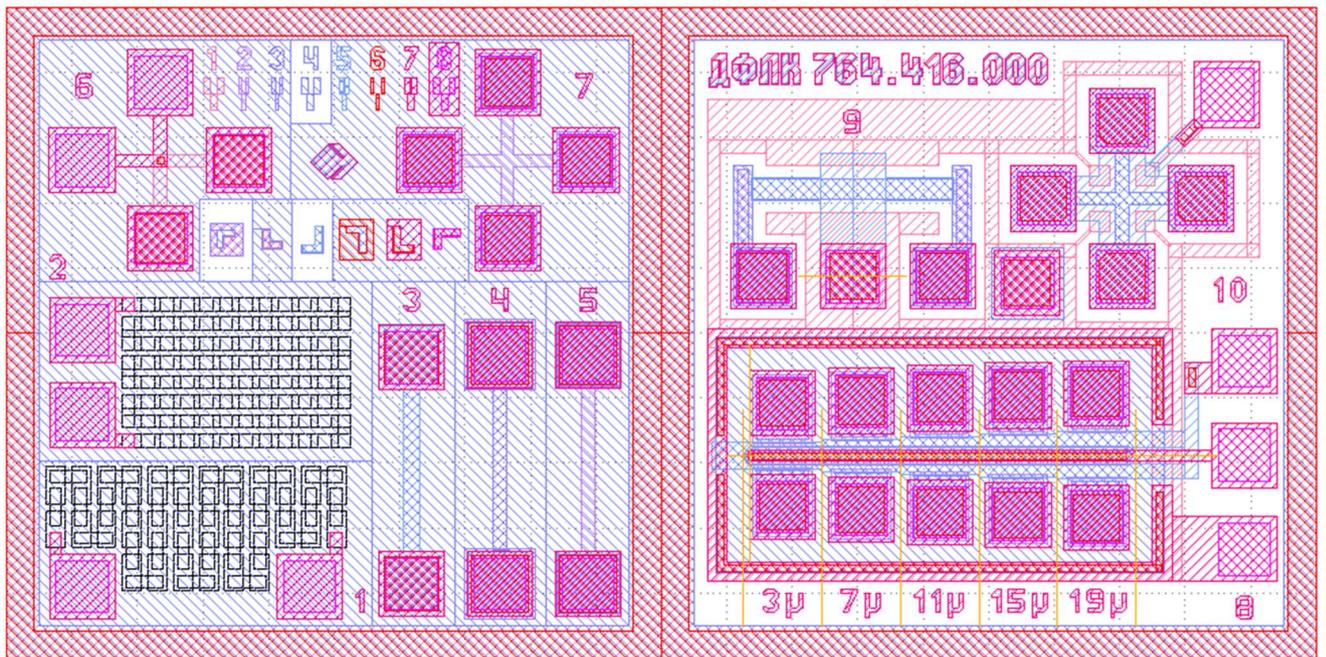


Рисунок 34 – Топология тестовых модулей

На рисунке 35 представлена топология пяти вариантов кристаллов р-МНОПТ: одинарная кольцевая конструкция с эффективным отношением ширины к длине канала равным 12 при длине канала равной 20 мкм (а), вдвоенная кольцевая конструкция с эффективным отношением ширины к длине канала равным 12 при длине канала равной 20 мкм (б), полосковая конструкция с эффективным отношением ширины к длине канала равной 10 при длине канала 20 мкм (в), полосковая конструкция с эффективным отношением ширины к длине канала равной 15 при длине канала 20 мкм (г); полосковая конструкция с эффективным отношением ширины к длине канала равной 12,5 при длине канала 10 мкм (д). На рисунке 36 представлен общий вид модуля мультипликации, содержащий все пять вариантов топологии р-МНОПТ.

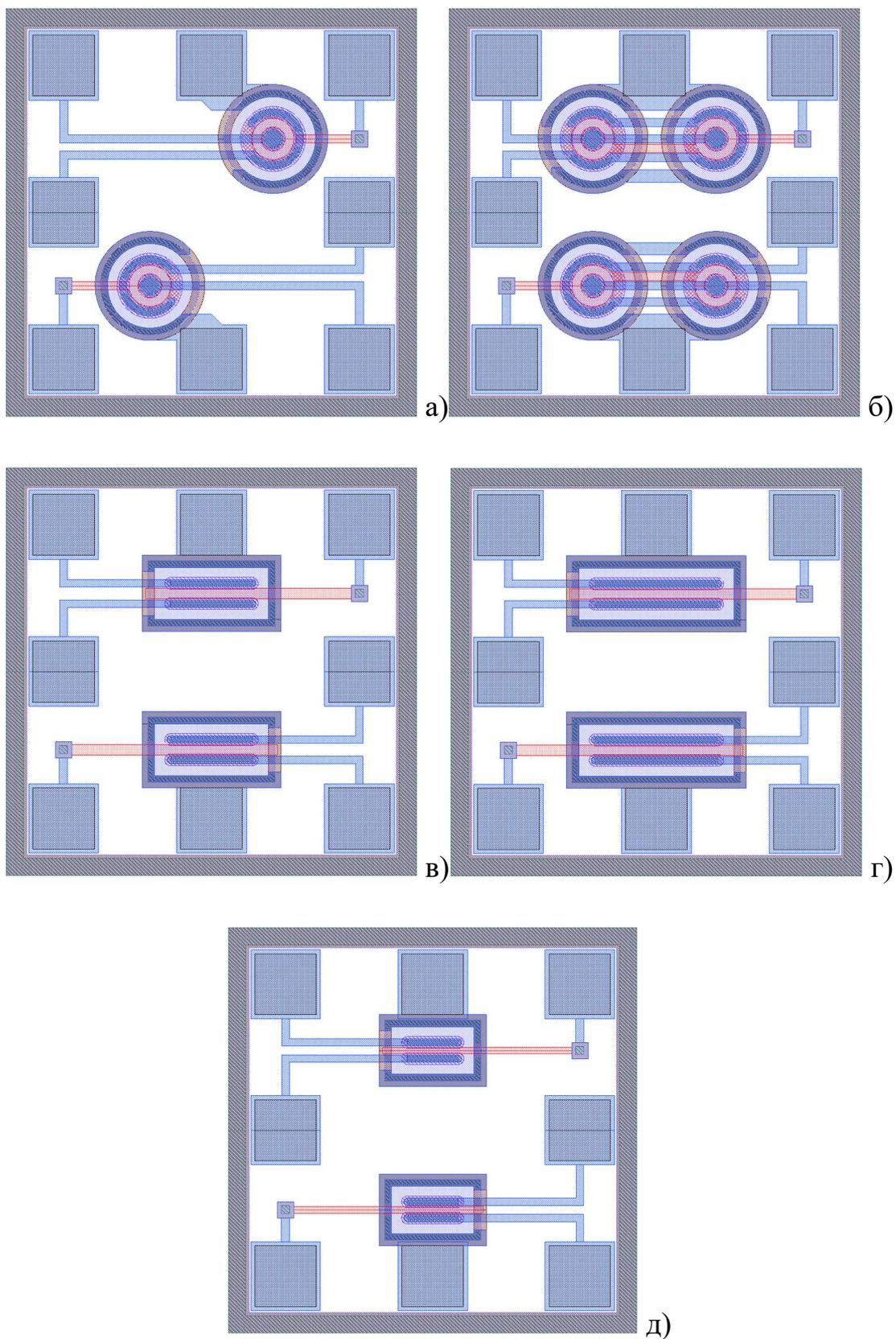


Рисунок 35 – Пять вариантов топологии p-MNPT для использования в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ

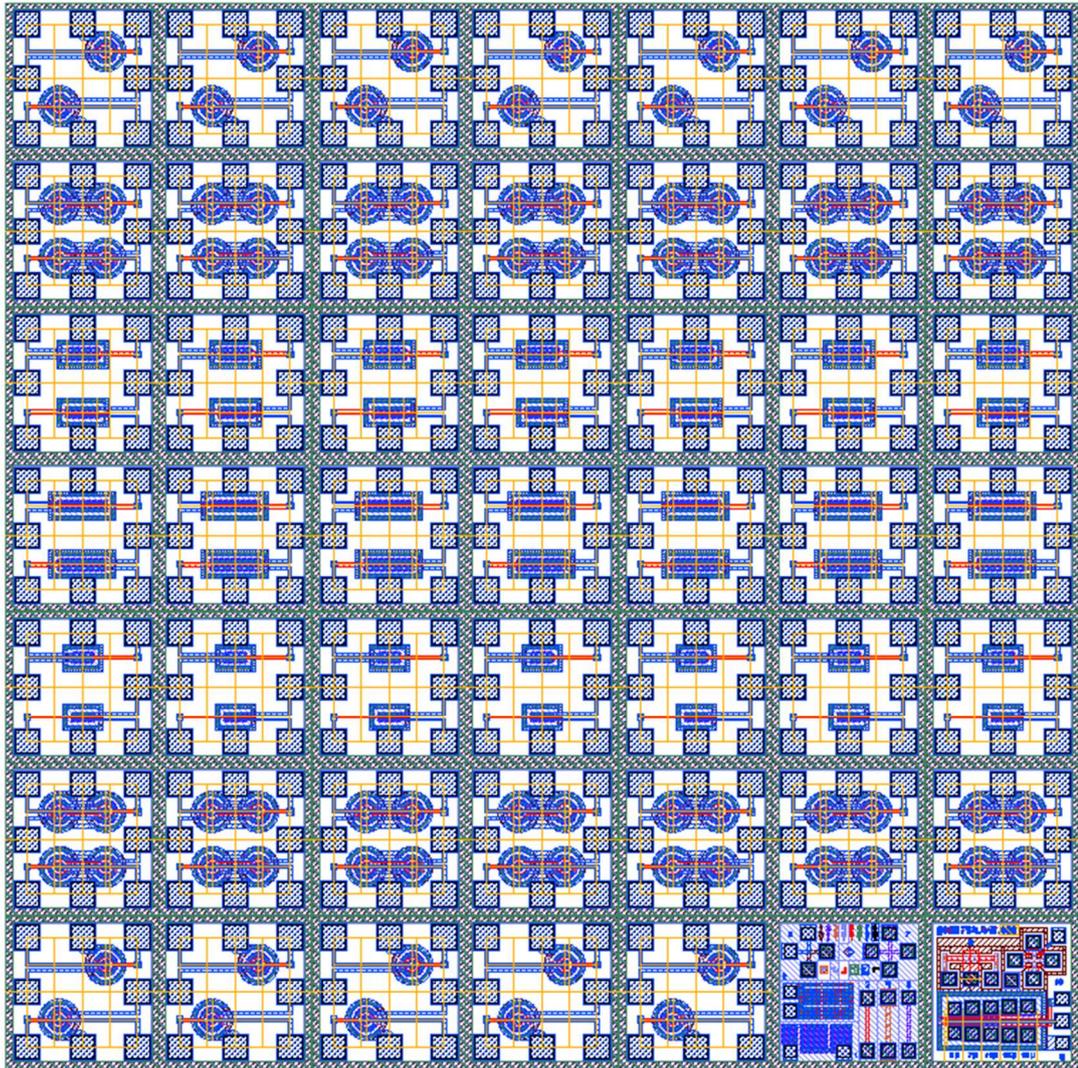


Рисунок 36 – Общий вид модуля мультипликации с пятью вариантами топологии р-МНОПТ и тестовыми модулями

На рисунках 37 – 44 послойно приведен общий вид пяти вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей, используемых в рабочем комплекте фотошаблонов. Топологии выстроены в ряд с 1 по 5 вариант.

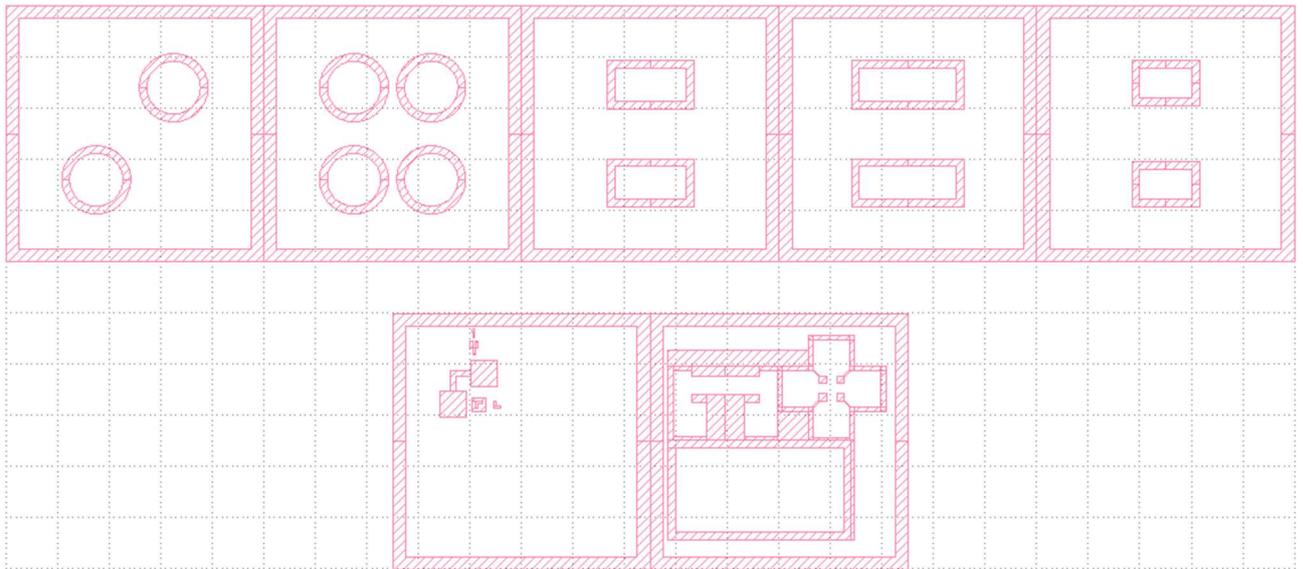


Рисунок 37 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №1 «Легирование охранного кольца»

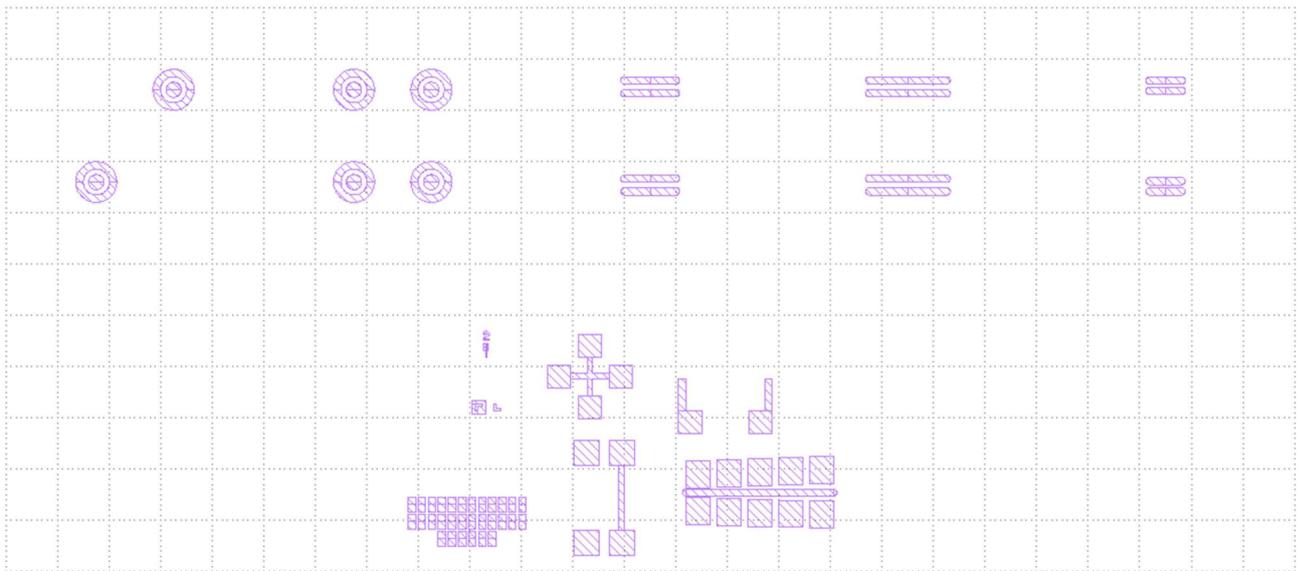


Рисунок 38 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №2 «Легирование р-областей истока и стока»

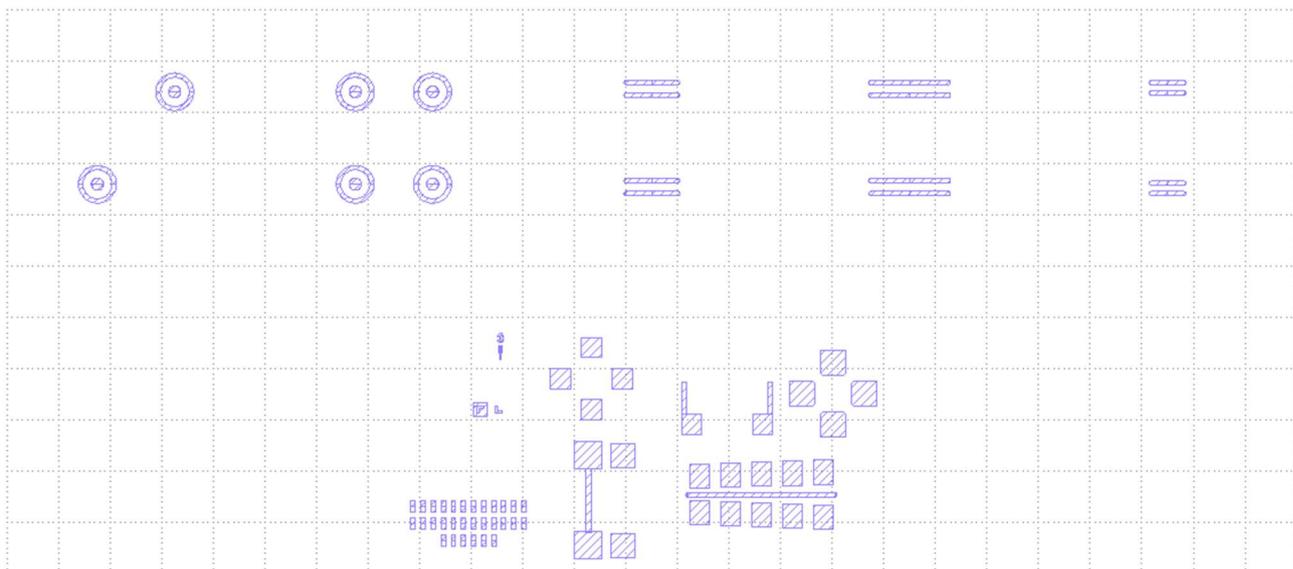


Рисунок 39 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №3 «Легирование р+-областей истока и стока»

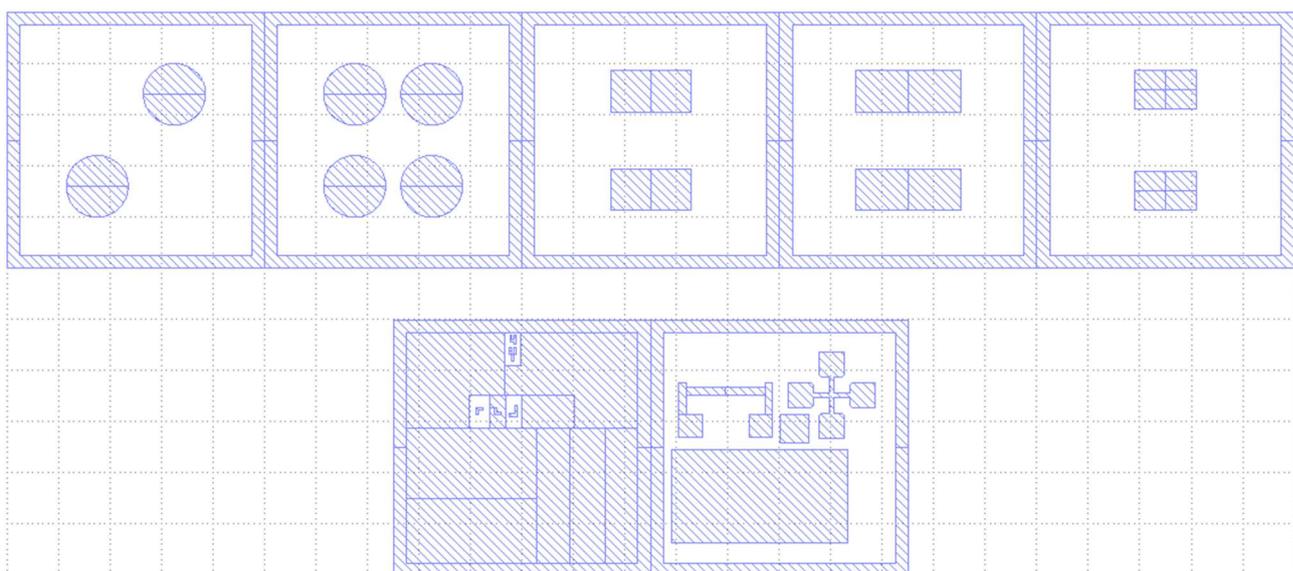


Рисунок 40 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №4 «LOCOS»

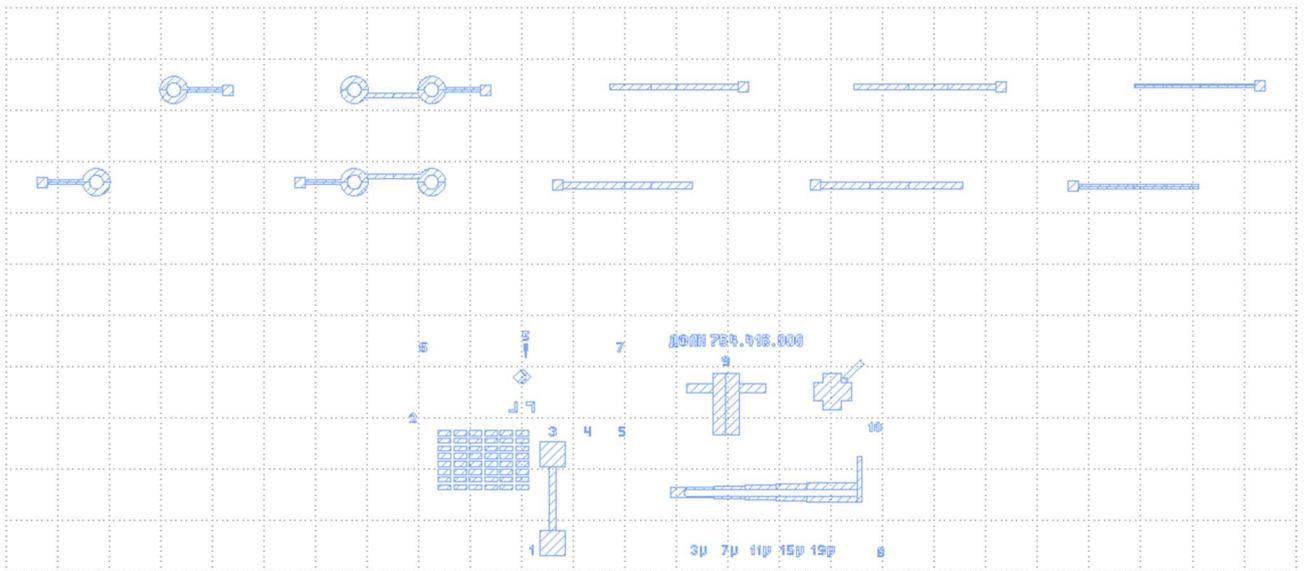


Рисунок 41 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №5 «Травление поликремния»

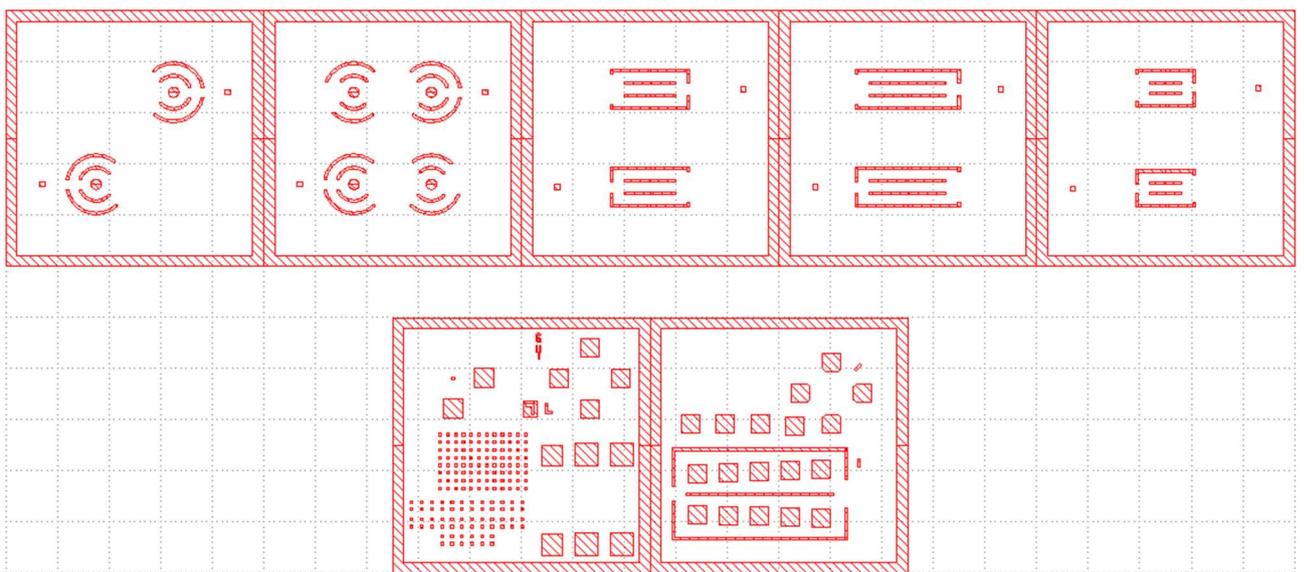


Рисунок 42 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №6 «Вскрытие контактных окон»

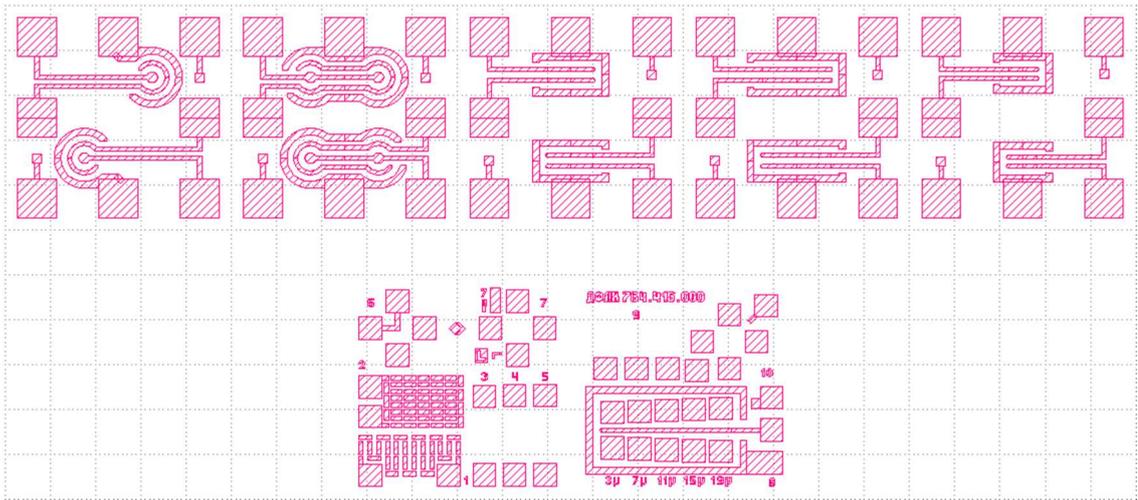


Рисунок 43 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №7 «Травление контактных площадок»

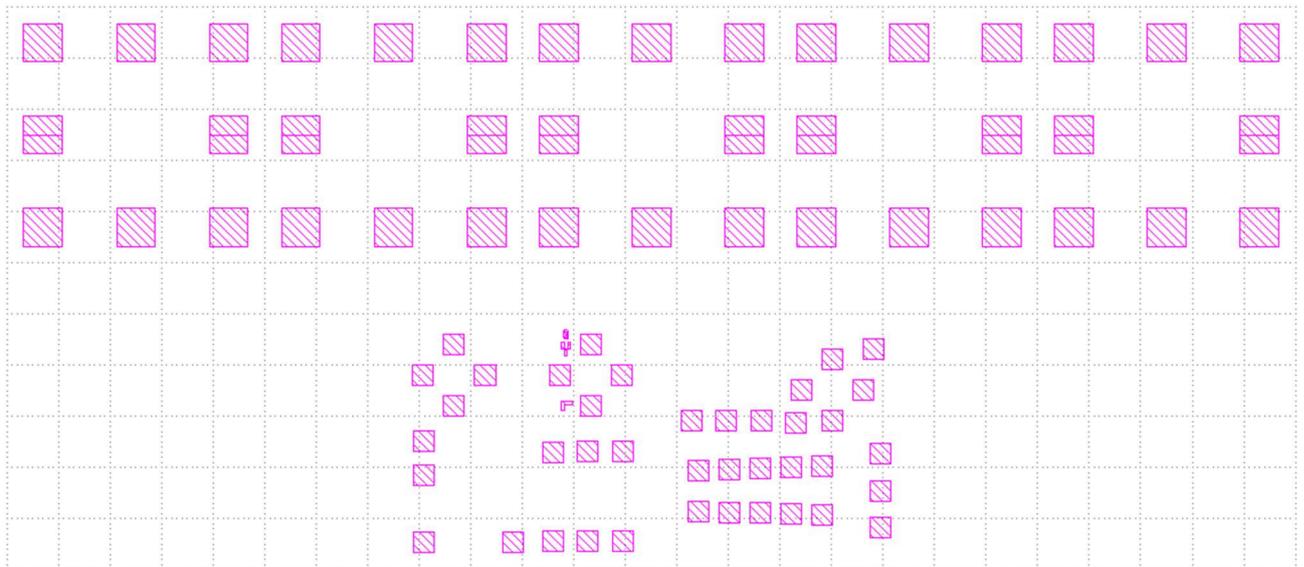


Рисунок 44 – Пять вариантов топологии р-МНОПТ и двух тестовых модулей в шаблоне №8 «Вскрытие контактных площадок»

В соответствии с разработанной топологией кристаллов транзисторов и требованиями завода-изготовителя были спроектированы и изготовлены фотошаблоны. В таблице 11 для каждого фотошаблона приведена одна из самых важных характеристик топологии: критический линейный размер.

Таблица 11 – Состав комплекта фотошаблонов

Номер фотошаблона	Название фотошаблона	Критический линейный размер, мкм
1	Легирования охранного кольца	10
2	Легирование р-областей истока и стока	5
3	Легирование р ⁺ -областей истока и стока	5
4	LOCOS	10
5	Травление поликремния	5
6	Вскрытие контактных окон	5
7	Травление контактных площадок	4
8	Вскрытие контактных площадок	10

На рисунке 45 представлен общий вид компоновки рабочего модуля мультипликации, а на рисунке 46 представлен вид пластины после экспонирования рабочим модулем мультипликации.

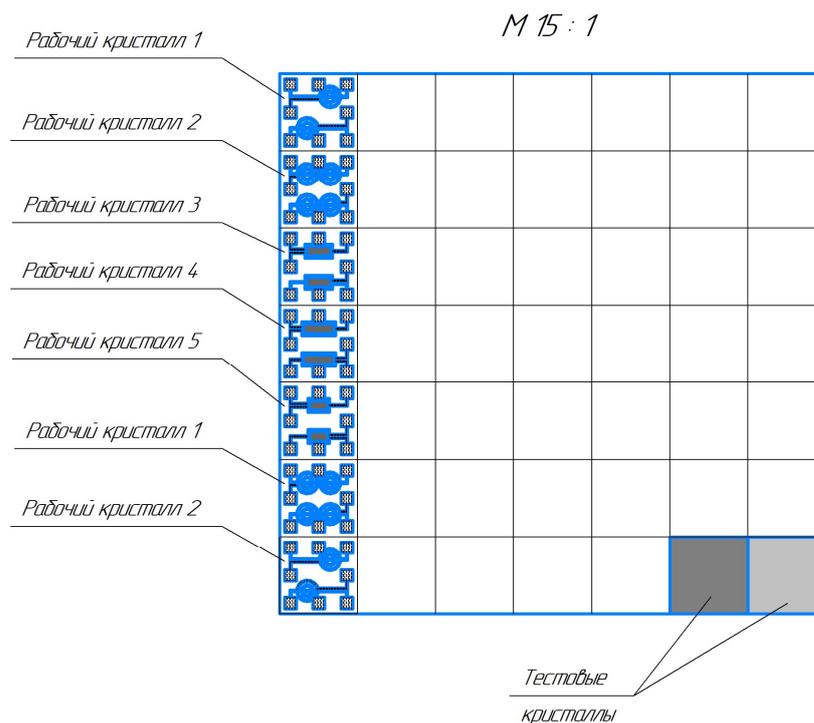


Рисунок 45 – Общий вид модуля мультипликации

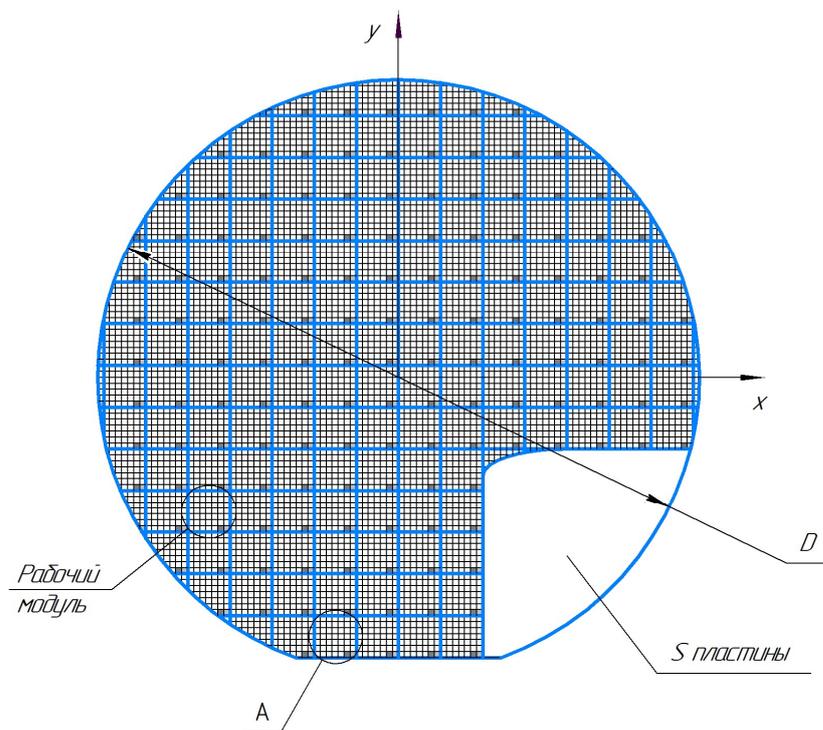


Рисунок 46 – Вид пластины после экспонирования рабочим модулем мультипликации

3.3 Разработка технологического маршрута изготовления р-канальных МНОП-транзисторов

При разработке технологического маршрута изготовления за исходные данные были приняты проведенные расчеты, а также технологические возможности завода-изготовителя, выбранного для изготовления разработанных р-МНОПТ. Основные технологические требования к заводу-изготовителю:

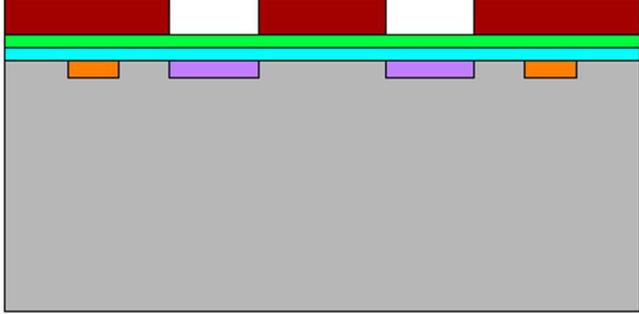
1. имеющаяся технология: МОП-технология на объемном кремнии;
2. проектная норма: не более 2 мкм;
4. фотолитография: проекционная.

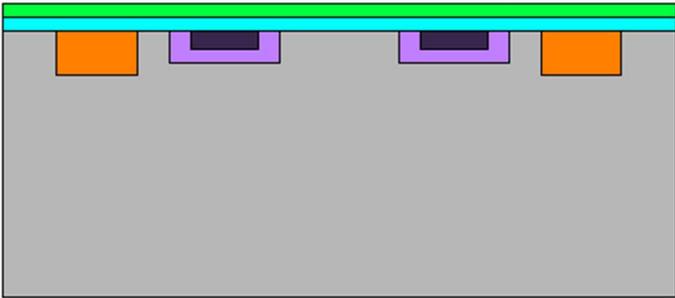
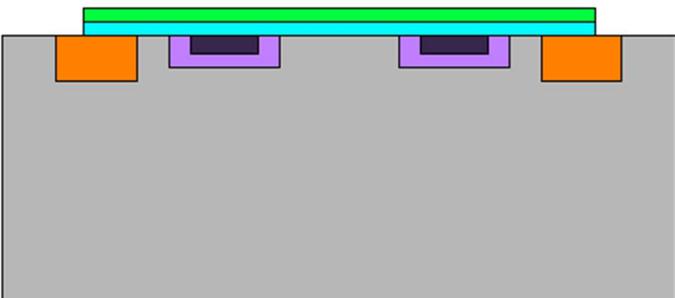
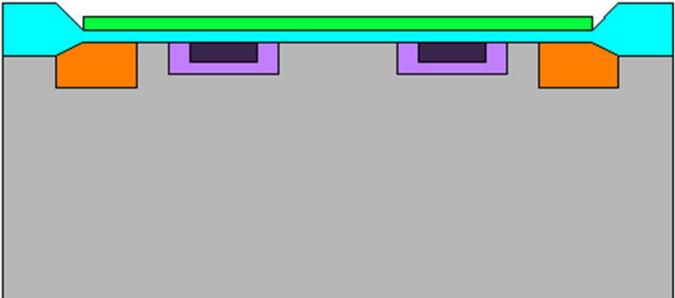
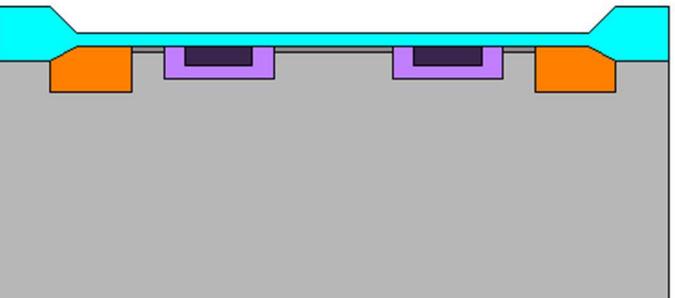
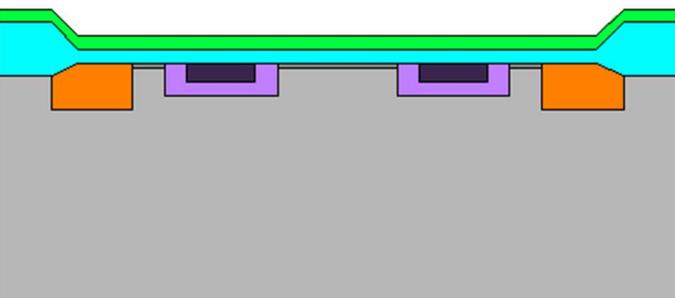
Для изготовления р-МНОПТ, представленного на рисунках 26, 27 необходим технологический маршрут, включающий в себя 8 фотолитографий в соответствии с разработанными фотошаблонами (таблица 11).

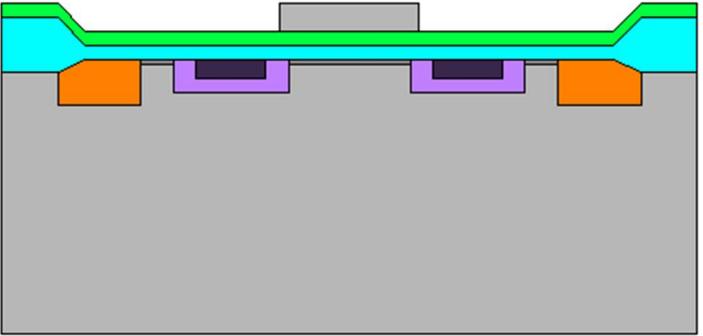
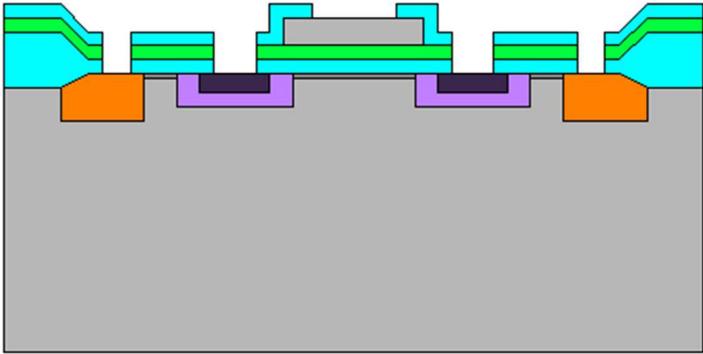
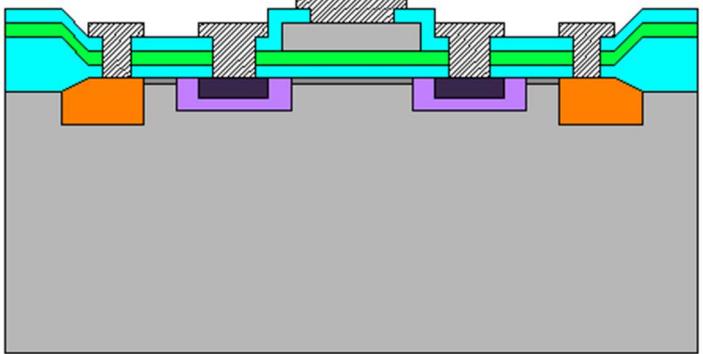
Р-канальные МНОП-транзисторы будут изготавливаться на кремниевой пластине 460 КЭФ 4,5 (100) Ø100 мм, основными токопроводящими слоями будут являться легированный поликремний и сплав Al-Ti, выбранный для получения ровной границы травления токопроводящих дорожек. В качестве пассивирующего слоя диэлектрика выбран наиболее доступный, технологичный и подходящий для требуемого уровня напряжений SiO₂. Разработанная структура р-МНОПТ имеет контакт к подложке с лицевой стороны кристалла, поэтому шлифовка и формирование металлизации на обратной стороне не требуется, изготовленные кристаллы р-МНОПТ будут иметь толщину 460 ± 20 мкм.

Технологический маршрут изготовления р-МНОПТ представлена в таблице 12, а на рисунке 47 представлен разрез разработанного р-МНОПТ после всех технологических операций. Состав и толщина технологических слоев к рисунку 47 представлены в таблице 13.

Таблица 12 – Технологический маршрут изготовления р-МНОПТ

Перечень операций	Промежуточная структура
1. Формирование 2. Химическая обработка 3. Окисление 4. ПФЛ №1 «Легирования охранного кольца» 5. ИЛ фосфором 6. ПХТ-SiO ₂	
7. Удаление фоторезиста 8. Отжиг 9. Химическая обработка 10. Осаждение Si ₃ N ₄ 11. ПФЛ №2 «Легирование р-областей истока и стока» 12. ИЛ бором	

Перечень операций	Промежуточная структура
13. Удаление фоторезиста 14. Разгонка фосфора 15. ПФЛ № 3 «Легирование p+областей истока и стока» 16. ИЛ бором 17. Удаление фоторезиста 18. Отжиг бора	
19. Химическая обработка 20. ПФЛ №4 «LOCOS» 21. ПХТ-Si ₃ N ₄ 22. Удаление фоторезиста 23. Травление SiO ₂	
24. Химическая обработка 25. Локальное окисление 26. ПХТ- SiO ₂ (подтрав)	
27. Травление Si ₃ N ₄ в H ₃ PO ₄ 28. Травление SiO ₂ 29. Промежуточное окисление 30. ИЛ бором «подгонка порогового напряжения» 31. Отжиг бора	
32. Травление SiO ₂ 33. Подзатворное окисление (4 варианта толщины) 34. Осаждение Si ₃ N ₄ (2 варианта толщины)	

Перечень операций	Промежуточная структура
35. Химическая обработка 36. Осаждение поликремния 37. Диффузия фосфора в поликремний 38. Снятие ФСС 39. Отжиг 40. ПФЛ №5 «Травление поликремния» 41. ПХТ поликремния 42. Удаление фоторезиста 43. Отжиг	
44. Химическая обработка 45. Осаждение ФСС 46. Отжиг 47. ПФЛ №6 «Вскрытие контактных окон» 48. Травление SiO_2 49. ПХТ Si_3N_4 50. ПХТ SiO_2 51. Удаление фоторезиста	
52. Химическая обработка 53. Напыление Al-Ti 54. ПФЛ №7 «Травление контактных площадок» 55. Травление Al-Ti 56. Удаление фоторезиста 57. Вжигание Al-Ti	
58. Химическая обработка 59. Осаждение SiO_2 60. ПФЛ №8 «Вскрытие контактных площадок» 61. ПХТ SiO_2 62. Удаление фоторезиста	

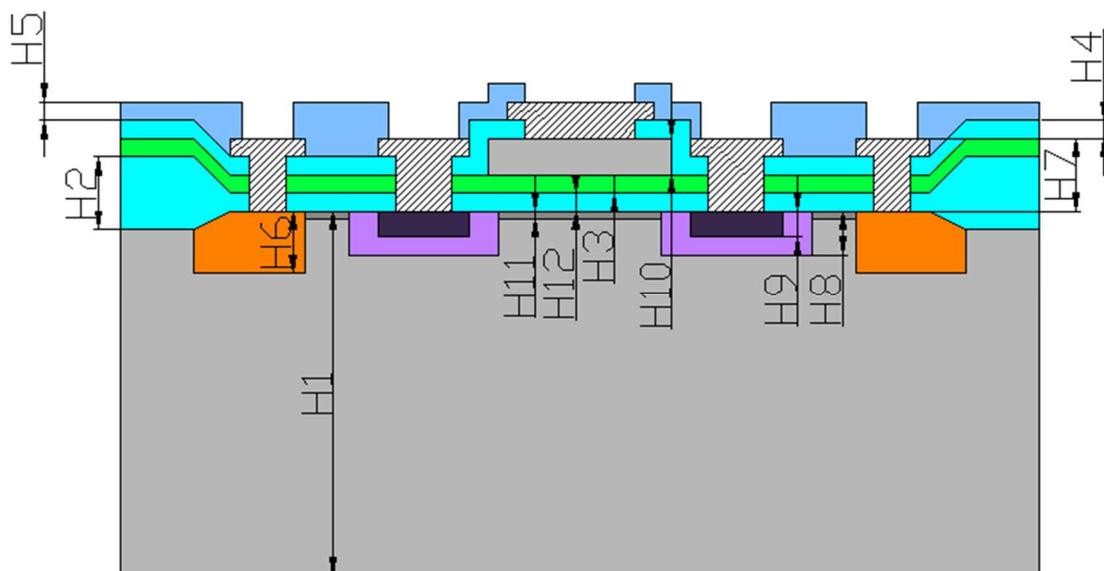


Рисунок 47 – Структура разработанного p-MHOPT

Таблица 13 – Состав и толщина слоев разработанного p-MHOPT

№ слоя	Наименование слоя	Толщина, мкм	Примечание
H1	Подложка n - типа Si (100)	460 ± 20	-
H2	LOCOS	$1,2 \pm 0,1$	-
H3	Подзатворный Si_3N_4	0,035 / 0,15	В зависимости от варианта исполнения
H4	ФСС	$0,8 \pm 0,1$	
H5	Пассивация SiO_2	$0,9 \pm 0,1$	
H6	Охранное кольцо	-	Не регламентируется
H7	Металлизация Al-Ti	$1,7 \pm 0,2$	-
H8	p-область истока/стока	-	Не регламентируется
H9	p+-область истока/стока	от 0,3 до 0,5	-
H10	Поликремний	$0,7 \pm 0,05$	-
H11	Подгонка порога	-	Очень малая величина
H12	Подзатворный SiO_2	0,035 / 0,15 / 0,3 / 0,8	В зависимости от варианта исполнения

Технологический маршрут изготовления p-MHOPT (таблица 12) не конкретизирован в плане режимов технологических процессов и вспомогательных операций, как например, химическая обработка, которая может включать в себя обработку в различных органических и неорганических химических соединениях. Более детальный технологический маршрут разрабатывается технологом на заводе-изготовителе с учетом всей специфики его работы. Но предварительно, во избежание грубых ошибок в подробном технологическом маршруте необходимо провести приборно-технологическое моделирование с применением режимов технологических процессов и получить виртуальную модель p-MHOPT, соответствующую разработанной топологии, составу и толщине слоев транзистора.

3.4 Приборно-технологическое моделирование p-канальных MHOPT-транзисторов

Для приборно-технологического моделирования была выбрана активная область p-MHOPT, а также часть периферийной области, включающей контакт к подложке и LOCOS. Моделирование было проведено в среде Silvaco TCAD при помощи блока технологического моделирования Victory Process в режиме Process mode с использованием разработанной топологии кристаллов. Верификация технологических моделей обеспечивалась калибровкой результатов расчетов по полученным результатам технологических процессов на контрольных структурах. На рисунке 48 представлена структура модели p-MHOPT.

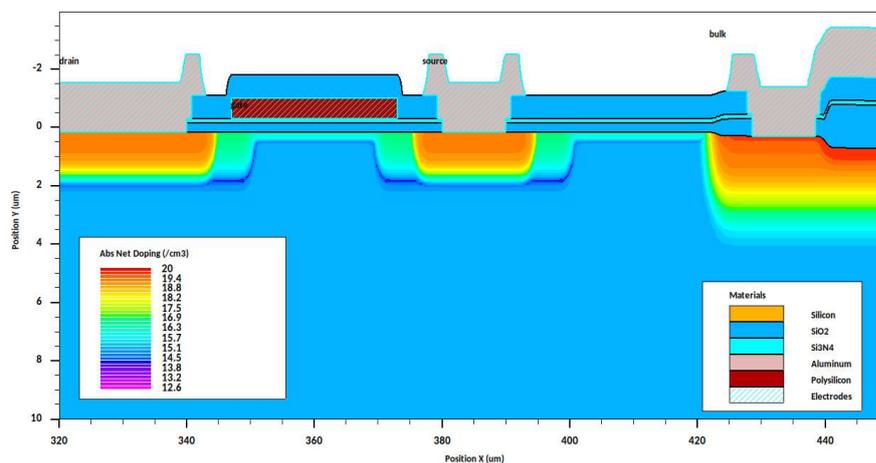


Рисунок 48 – Структура модели p-MНОПТ

Структура модели p-MНОПТ обладает линейной сеткой, показанной на рисунке 49. Данный тип сетки является неоптимальным для расчета электрических параметров прибора, так как узлы сетки, содержащие все необходимые данные о структуре, не всегда находятся в необходимой для расчета области, за счет этого фактора увеличивается погрешность расчета и могут быть ошибки сходимости. Особенно это может сильно проявиться при большом количестве расчетных структурных параметров в зависимости от выбранных физических моделей.

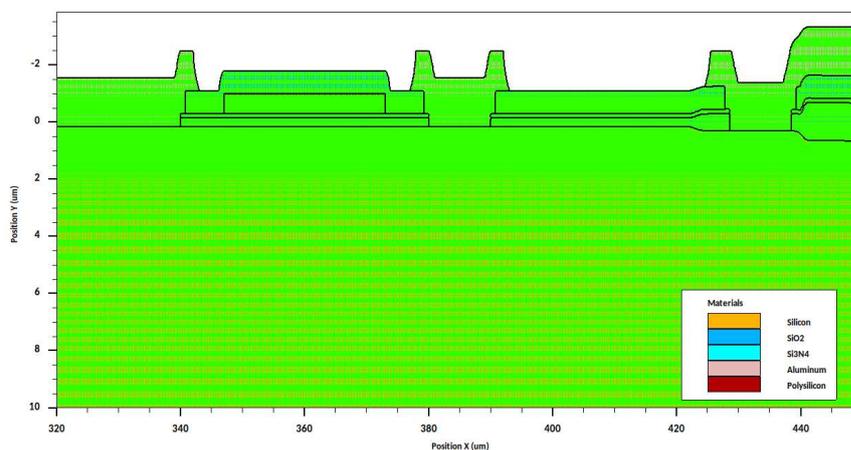


Рисунок 49 – Линейная сетка модели p-MНОПТ

Для повышения точности расчета электрических параметров необходимо перестроить сетку в сегментарный формат delaunay, для этого служит модуль Silvaco victory mesh. Необходимо отметить, что данный способ оптимизации сетки полностью автоматизирован, а понятие области также включает в себя p-n переходы

и границы интерфейсов, в случае наличия заданных областей система находит их границы и автоматически перестраивает сетку в соответствии с заданными условиями. Результат оптимизации сетки приведен на рисунке 50, а сравнение исходной и полученной сетки в области канала приведено на рисунке 51.

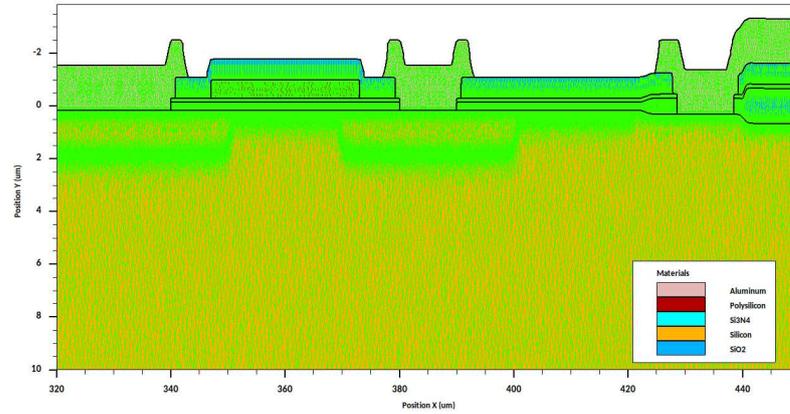
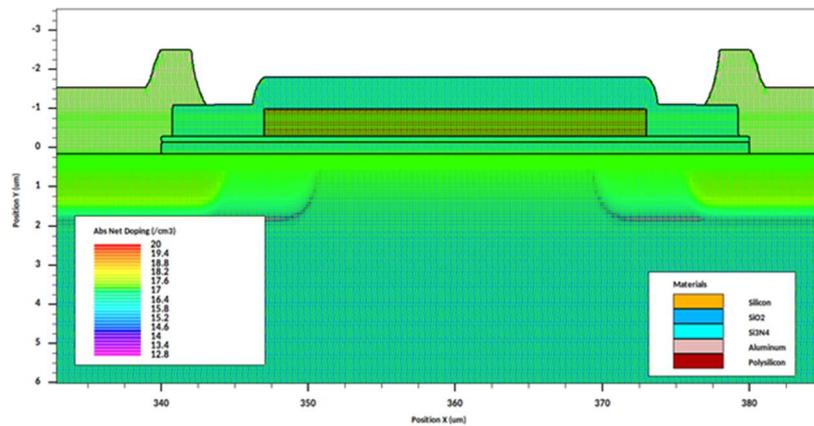
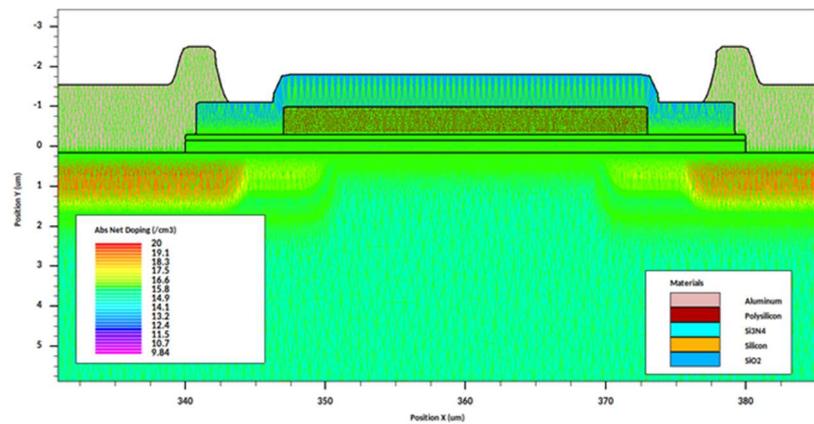


Рисунок 50 – Сегментарная сетка модели р-МНОПТ



а)



б)

Рисунок 51 – Фрагмент канальной области модели р-МНОПТ с линейной сеткой (а), с сегментарной сеткой (б)

В результате приборно-технологического моделирования для всех четырех вариантов затворной системы и пяти вариантов топологии р-МНОПТ были получены электрические характеристики, удовлетворяющие требованиям к р-МНОПТ, планируемых к применению в качестве ЧЭ детекторов поглощенной дозы ИИ. В таблице 14 приведены электрические характеристики р-МНОПТ полосковой конструкции с эффективным отношением ширины к длине канала равной 15 при длине канала равной 20 мкм и (вариант топологии 4) для всех четырех вариантов затворной системы, полученные в результате моделирования.

Таблица 14 – Электрические характеристики р-МНОПТ полосковой конструкции с эффективным отношением ширины к длине канала равной 15 при длине канала равной 20 мкм (вариант топологии 4) для всех четырех вариантов затворной системы, полученные в результате моделирования

Толщина подзатворного диэлектрика $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, нм	$I_{\text{сут}}$, нА	$I_{\text{зут}}$, нА	$U_{\text{порог}}$, В	$U_{\text{зи.мах}}$, В	$U_{\text{си.мах}}$, В
35 / 35	- 0,1	+0,21; -0,21	- 0,9	> 80	> 200
150 / 150	- 0,1	+0,23; -0,24	- 0,7	> 80	> 200
150 / 300	- 0,1	+0,21; -0,19	- 1,0	> 80	> 200
150 / 800	- 0,1	+0,20; -0,22	- 1,1	> 80	> 200

3.5 Выбор типа корпуса для детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов

Для удобства проведения измерений и испытаний детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ и с учетом размера кристалла был выбран стандартный металлокерамический корпус типа 402-16 в исполнении 402.16-33, представленный на рисунке 52.

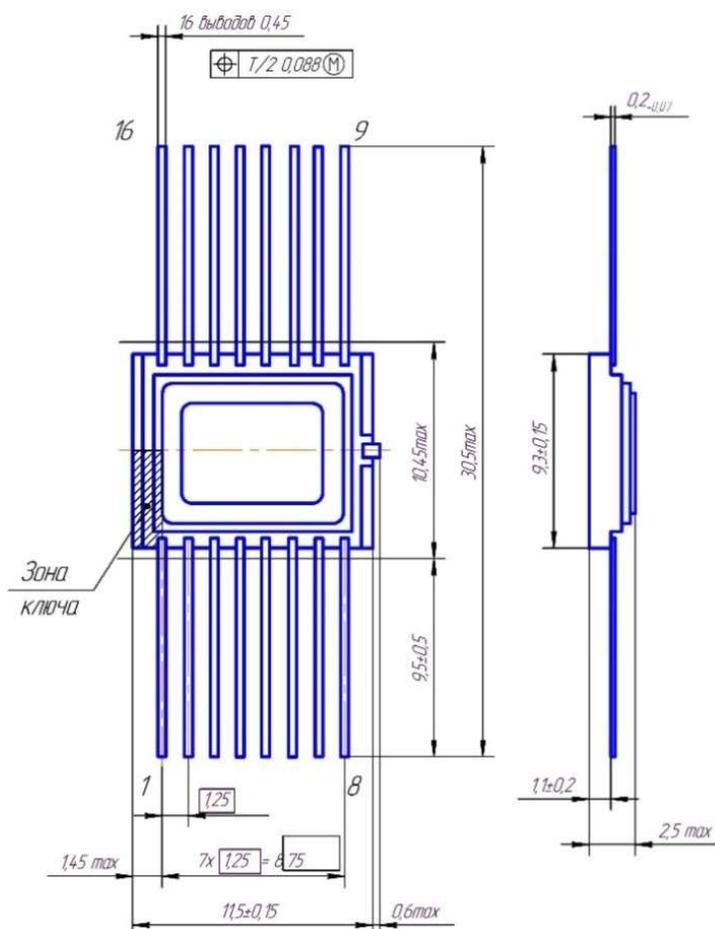


Рисунок 52 – Габаритный чертеж корпуса 402.16-33

В настоящее время металлокерамические корпуса изделий электронной техники герметизируются в основном двумя способами: пайкой и контактной сваркой. У каждого способа герметизации есть свои преимущества и недостатки.

Процесс пайки позволяет получить неразъемное соединение крышки и ободка основания корпуса за счёт введения между соединяемыми деталями припоя, имеющего температуру плавления ниже температуры плавления конструкционных материалов корпуса, и не приводящей к нарушению работоспособности элементов в корпусе и внутренних соединений.

Процесс герметизации контактной сваркой заключается в том, что при пропускании электрического тока по кромке зоны контакта крышки и ободка корпуса происходит расплавление металла крышки и ободка. В этом варианте герметизации крышка может быть только металлической. Поскольку в соединение вступают только ободок и крышка, отсутствует необходимость в применении

дополнительного припоя. Во время сварки оператор визуально контролирует операцию герметизации. В настоящее время оборудование герметизации контактной сваркой дополнительно может комплектоваться газонаполненными скафандрами, что позволяет вести сварку в определенной среде – чаще всего в среде сухого азота (точка росы не выше минус 60 °С). Необходимо отметить, что температура корпуса при герметизации контактной сваркой ниже, чем при герметизации пайкой, это происходит из-за того, что сварка ведётся в очень узкой зоне: кромке крышки, а корпус снабжен мощным теплоотводом, контактирующим с металлическим столиком установки герметизации.

Исходя из следующих преимуществ контактной сварки был выбран именно этот способ герметизации:

- оперативный визуальный контроль;
- возможность герметизации в инертной среде;
- отсутствие перегрева корпуса и корпусируемых кристаллов;
- отсутствие загрязнения корпуса посторонними веществами.

На рисунке 53 представлен фрагмент сборочного чертежа детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-МНОПТ.

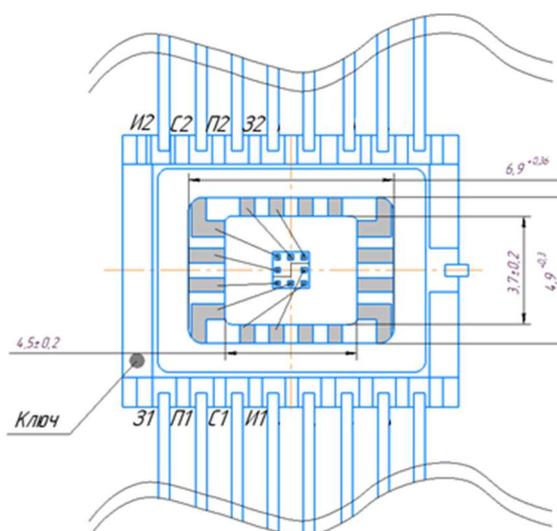


Рисунок 53 – Фрагмент сборочного чертежа детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-МНОПТ

3.6 Изготовление детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов

В соответствии с разработанными пятью вариантами топологии и четырьмя вариантами затворной системы р-МНОПТ, технологическим маршрутом изготовления и проведенным приборно-технологическим моделированием, на заводе-изготовителе было выпущено несколько партий р-МНОПТ прежде, чем получить годные образцы с требуемыми характеристиками. Причины брака были различные: от низкой культуры производства на некоторых технологических операциях до некачественных химических реактивов. Так или иначе было получено достаточное количество пластин с годными р-МНОПТ. На данном этапе подсчет выхода годных приборов не проводился, так как, в целом, для определенных исследований можно было использовать р-МНОПТ, формально не соответствующие требуемым характеристикам, и следует учитывать тот факт, что основными задачами данной диссертационной работы являются разработка и исследование характеристик детекторов, а не технико-экономические аспекты их производства. Также возможен технический отход на операциях сборки кристаллов р-МНОПТ в корпус. В таблице 15 представлен технологический маршрут сборки р-МНОПТ в корпус.

Таблица 15 – Технологический маршрут сборки р-МНОПТ в корпус

№ п/п	Наименование операции
1	Разделение пластин на кристаллы
2	Проверка внешнего вида кристаллов
3	Маркировка оснований
4	Сушка после маркировки
5	Напайка, наклейка
6	Выдержка после наклейки
7	Сушка после выдержки

Продолжение таблицы 15

№ п/п	Наименование операции
8	Приварка выводов
9	Контроль внешнего вида
10	Прихватка крышки
11	Термообработка
12	Герметизация
13	Термообработка
14	Контроль внешнего вида
15	Термоциклирование
16	Вырубка рамки
17	I классификация
18	Монтаж
19	Измерение статических параметров при повышенной температуре
20	Демонтаж
21	Опрессовка и термодесорбция
22	Контроль герметичности
23	Маркировка и сушка
24	II классификация
25	Контроль внешнего вида

В процессе изготовления детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ проводились следующие отбраковочные испытания:

- термоциклирование собранных приборов перед классификацией (5 циклов при температуре минус 60 °С и + 125 °С) для исключения брака из-за возможных механических напряжений конструкции приборов в целом;

- I-классификация приборов – измерение электрических характеристик при крайних температурах (+ 125 °С) по завышенным нормам, для исключения параметрического брака транзисторов;

- II-классификация – измерение электрических характеристик по завышенным нормам для исключения параметрического брака после проведения лазерной маркировки.

Данный перечень отбраковочных испытаний также дополнялся контролем внешнего вида после наиболее критических операций, позволяющим исключить потенциально ненадежные приборы в ходе их изготовления.

Для проведения исследований было изготовлено 500 образцов детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ: по 100 образцов каждого из пяти вариантов топологии транзистора, при этом каждый из пяти вариантов топологии транзистора включал в себя 4 варианта затворной системы (по 25 образцов каждого варианта затворной системы).

Электрические характеристики каждого из изготовленных образцов детекторов были измерены на соответствие характеристикам, представленным в таблице 5 данной главы. В таблицах 16 – 20 представлены электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ пяти вариантов топологии транзистора и четырех вариантов затворной системы.

Таблица 16 – Электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ кольцевого одинарного типа конструкции с длиной канала 20 мкм и отношением ширины к длине канала 12 (вариант топологии 1)

Толщина подзатворного диэлектрика Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	I _{сут} , нА	I _{зут} , нА	U _{порог} , В	U _{зиmax} , В	U _{сиmax} , В
35 / 35	- 0,35	+0,24; -0,27	- 1,05	> 70	> 100
150 / 150	- 0,41	+0,15; - 0,17	- 1,22	> 70	> 100
150 / 300	- 0,53	+0,21; -0,19	- 1,17	> 70	> 100
150 / 800	- 0,49	+0,17; - 0,16	- 1,25	> 70	> 100

Таблица 17 – Электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ кольцевого сдвоенного типа конструкции с длиной канала 20 мкм и отношением ширины к длине канала 12 (вариант топологии 2)

Толщина подзатворного диэлектрика Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	I _{с_{ут}} , нА	I _{з_{ут}} , нА	U _{порог} , В	U _{зи_{ма}х} , В	U _{си_{ма}х} , В
35 / 35	- 0,47	+0,19; - 0,21	- 1,10	> 70	> 100
150 / 150	- 0,42	+0,17; - 0,16	- 1,19	> 70	> 100
150 / 300	- 0,38	+0,15; - 0,12	- 1,14	> 70	> 100
150 / 800	- 0,36	+0,22; - 0,19	- 1,23	> 70	> 100

Таблица 18 – Электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ полоскового типа конструкции с длиной канала 20 мкм и отношением ширины к длине канала 10 (вариант топологии 3)

Толщина подзатворного диэлектрика Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	I _{с_{ут}} , нА	I _{з_{ут}} , нА	U _{порог} , В	U _{зи_{ма}х} , В	U _{си_{ма}х} , В
35 / 35	- 0,45	+0,15; - 0,20	- 1,03	> 70	> 100
150 / 150	- 0,38	+0,21; - 0,17	- 1,15	> 70	> 100
150 / 300	- 0,42	+0,18; - 0,23	- 1,16	> 70	> 100
150 / 800	- 0,57	+0,22; - 0,21	- 1,21	> 70	> 100

Таблица 19 – Электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ полоскового типа конструкции с длиной канала 20 мкм и отношением ширины к длине канала 15 (вариант топологии 4)

Толщина подзатворного диэлектрика Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	I _{с_{ут}} , нА	I _{з_{ут}} , нА	U _{порог} , В	U _{зи_{ма}х} , В	U _{си_{ма}х} , В
35 / 35	- 0,33	+0,16; -0,20	- 1,10	> 70	> 100
150 / 150	- 0,41	+0,19; -0,22	- 1,18	> 70	> 100
150 / 300	- 0,51	+0,23; -0,10	- 1,15	> 70	> 100
150 / 800	- 0,47	+0,19; -0,17	- 1,20	> 70	> 100

Таблица 20 – Электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ полоскового типа конструкции с длиной канала 10 мкм и отношением ширины к длине канала 12,5 (вариант топологии 5)

Толщина подзатворного диэлектрика Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	I _{сут} , нА	I _{зут} , нА	U _{порог} , В	U _{зиmax} , В	U _{сиmax} , В
35 / 35	- 0,35	+0,20; -0,21	- 1,04	> 70	> 100
150 / 150	- 0,39	+0,17; -0,16	- 1,20	> 70	> 100
150 / 300	- 0,52	+0,22; -0,15	- 1,18	> 70	> 100
150 / 800	- 0,50	+0,16; -0,18	- 1,23	> 70	> 100

Как видно из таблиц 16 – 20 все электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ пяти вариантов топологии транзистора и четырех вариантов затворной системы полностью соответствуют предъявляемым требованиям.

3.7 Выводы к главе 3

Глава была посвящена разработке и изготовлению детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ. В данной главе была исследована возможность изготовления р-МНОПТ с требуемыми характеристиками для применения в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения путем расчета электрических характеристик с учетом возможности использования кремниевых пластин с различным удельным сопротивлением, особенностей топологии и затворной системы транзисторов, а также особенностей и возможностей технологической линии производства. Была разработана топология пяти вариантов р-МНОПТ с кольцевой и полосковой конструкцией, имеющих ширину канала равную 10 и 20 мкм, и эффективным отношением ширины к длине канала равным 10; 12; 12,5 и 15.

В данной главе продемонстрирована возможность создания в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для применения в различных областях науки и техники, имеющих равнозначные электрические характеристики, но различные радиационные чувствительности и диапазоны измеряемых доз. Был разработан технологический маршрут изготовления р-МНОПТ, включающий в себя 62 технологические операции, в том числе 8 фотолитографий. Так как разрабатываемые р-МНОПТ имеют четыре варианта затворной системы: различная толщина подзатворных Si_3N_4 и SiO_2 , а их изготовление рассматривалось на кремниевой подложке 460 КЭФ 4,5 (100) Ø100 мм, то была использована операция подгонки порогового напряжения методом ионного легирования бором подзатворной области транзистора.

В ходе приборно-технологического моделирования была создана верифицированная модель р-МНОПТ. Данная модель позволила определить электрические характеристики р-МНОПТ, в соответствии с основными топологическими размерами и технологией изготовления разработанных транзисторов до их изготовления.

Для проведения исследований было изготовлено 500 образцов детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ: по 100 образцов каждого из пяти вариантов топологии транзистора, при этом каждый из пяти вариантов топологии включал в себя 4 варианта затворной системы (по 25 образцов каждого варианта затворной системы). Для удобства проведения измерений и испытаний детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ и с учетом размера кристалла 1×1 мм для изготовления детекторов был выбран корпус 402.16-33.

Измеренные электрические характеристики изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ пяти вариантов топологии транзистора и четырех вариантов затворной системы полностью соответствуют предъявляемым требованиям.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ P-КАНАЛЬНЫХ МНОП-ТРАНЗИСТОРОВ

АО «НИИП» обладает радиационными установками, а также различным оборудованием и приборами для исследования радиационных характеристик и проведения испытаний различных полупроводниковых приборов, как в корпусированном виде, так и в бескорпусном исполнении [99]. В рамках данной диссертационной работы были проведены исследования детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе p-MHOPT с параметрами затворных систем, представленными в таблице 21.

Таблица 21 – Параметры затворных систем исследованных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT

№	Толщина подзатворных диэлектриков Si ₃ N ₄ / SiO ₂ , нм	Длина канала, мкм	Отношение ширины канала к длине
1	100 / 106,7	3,5	14,3
2	150 / 150	12	12,5
3	35 / 35	10	12,5
4	150 / 150	10	12,5
5	150 / 300	10	12,5
6	150 / 800	10	12,5

Изначально были изготовлены тестовые образцы детекторов № 1 и 2 (таблица 21), на которых были проведены исследования, результаты которых легли в основу программ и методик измерений изготовленных детекторов № 3 – 6 с требуемыми характеристиками. Далее будут приведены не все результаты исследований и измерений, а наиболее значимые, которые в полной мере отражают возможные режимы работы и характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе p-MHOPT.

4.1 Выбор рабочего тока для измерения информативного параметра детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора

Типовые вольт-амперные характеристики детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ можно измерять в соответствии с двумя электрическими схемами:

1. схема измерения 1: контакт подложки соединен с контактом истока, а контакт стока соединен с контактом затвора, на объединенный контакт затвора и стока подается отрицательное напряжение и на нем же измеряется ток стока, а контакт истока и подложки находится под нулевым потенциалом (рисунок 54);

2. схема измерения 2: контакт подложки соединен с контактом истока и находится под нулевым потенциалом, на контакт стока подается постоянное напряжение минус 0,1 В и на нем же измеряется ток стока, а на контакт затвора подается отрицательное напряжение (рисунок 55).

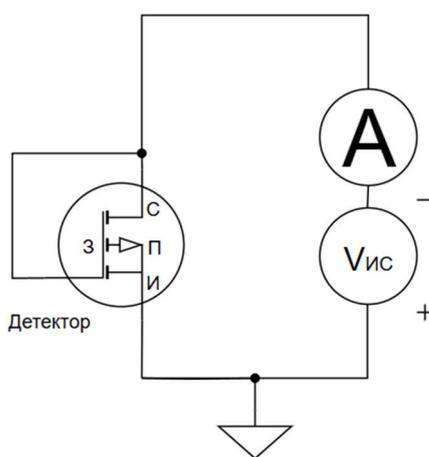


Рисунок 54 – Электрическая схема измерения ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с объединенными контактами затвора и стока

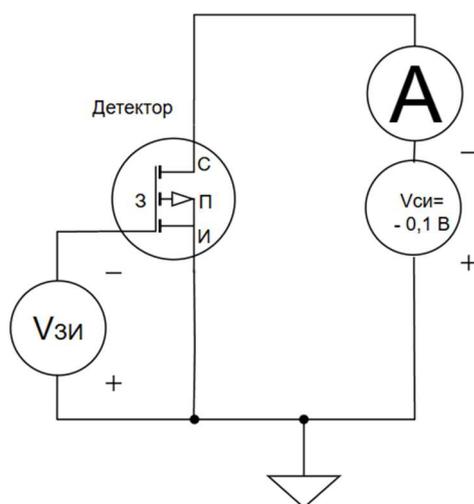


Рисунок 55 – Электрическая схема измерения ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с постоянным напряжением минус 0,1 В на стоке

В соответствии с данными электрическими схемами были измерены ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм. На рисунке 56 и 57 представлены ВАХ детектора, измеренные по схеме 1 и схеме 2, соответственно.

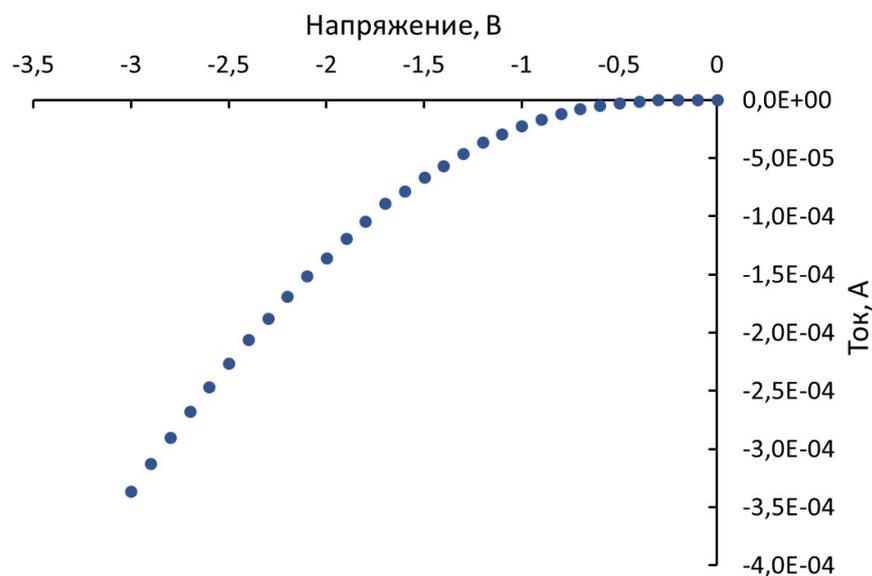


Рисунок 56 – ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм измеренная в электрической схеме с объединенными затвором и стоком

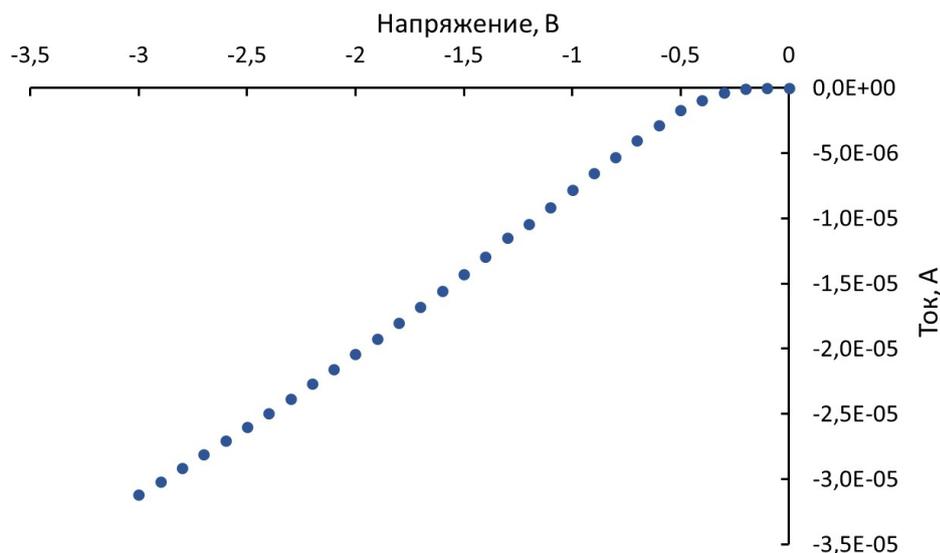


Рисунок 57 – ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм измеренная в электрической схеме при подаче на сток постоянного напряжения минус 0,1 В

При анализе ВАХ детектора, представленных на рисунках 56 и 57 видно, что на ВАХ детектора при подаче на сток постоянного напряжения минус 0,1 В уже при малых значениях тока стока можно однозначно определить надпороговую и подпороговую область характеристики. Это очень важно, так как детекторы должны работать в надпороговой области ВАХ, чтобы однозначно было определено изменение напряжения между затвором и истоком при воздействии ионизирующего излучения на детектор. Таким образом, при использовании схемы измерения с подачей малого отрицательного напряжения на сток детектора с чувствительным элементом на основе p-MHOPT, детектор может работать уже на токе стока порядка 10 мкА, в то время, как в схеме с объединенными контактами стока и затвора рабочий ток составляет величину порядка 100 мкА. Используя схему измерения с подачей малого отрицательного напряжения на сток можно получить меньший потребляемый ток, в то время как вторая схема измерения проще за счет использования одного источника питания.

Для измерения напряжения между затвором и истоком, являющимся информативным параметром, детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе

p- МНОПТ необходимо выбрать рабочий ток детектора. При выборе рабочего тока детектора на котором будет проходить измерение информативного параметра необходимо учитывать тот факт, что при изменении температуры окружающей среды и, соответственно, самого транзистора изменяется и его пороговое напряжение (напряжение между затвором и истоком на определенном токе), а при облучении большой плотностью потока частиц или большой мощностью дозы гамма- или рентгеновского излучения объект может нагреваться. Для минимизации возможной погрешности измерений необходимо найти такой тока стока, при котором эти изменения будут минимальны. Для нахождения данной термостабильной точки необходимо провести измерения ВАХ детекторов при различных температурах окружающей среды [100]. На рисунке 58 представлены измерения детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм в схеме с постоянным напряжением на стоке минус 0,1 В при различных температурах: + 25, + 85, + 125, минус 30 и минус 60 °С.

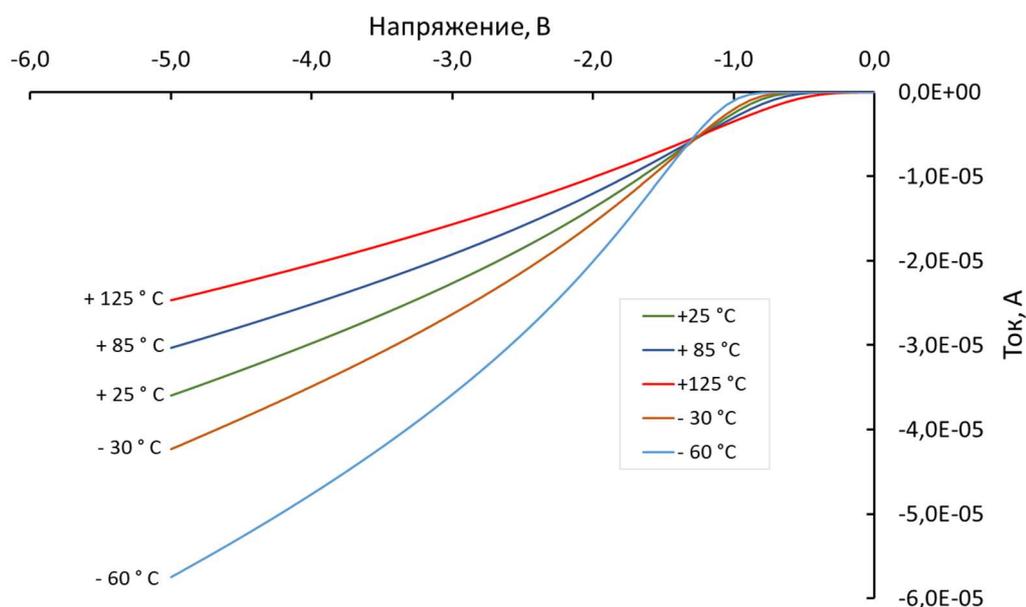


Рисунок 58 – ВАХ детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм в схеме с постоянным напряжением минус 0,1 В на стоке при температурах + 25, + 85, + 125, минус 30 и минус 60 °С

Из рисунка 58 видно, что все пять ВАХ при различных температурах пересекаются в некой области на уровне примерно 5,5 мкА. Поэтому для проведения дальнейших экспериментов на данном детекторе необходимо проводить измерения информативного параметра на рабочем токе равном 5,5 мкА в схеме с постоянным напряжением на стоке минус 0,1 В. Аналогично определяется рабочий ток детектора и на детекторах с другими толщинами подзатворных диэлектриков и в другой схеме измерения.

4.2 Исследование радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора при облучении в режиме с постоянным током стока

Эффективно использовать детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-МНОПТ можно в двух режимах работы:

1. При постоянном токе стока. В данном случае измеряется напряжение между затвором и истоком детектора при постоянном рабочем токе между стоком и истоком. Данный вариант включения можно реализовать в соответствии с двумя электрическими схемами измерения:

- при объединенных контактах стока и затвора, и объединенных контактах подложки и истока (рисунок 59);

- при подаче на контакт стока постоянного напряжения минус 0,1 В (рисунок 60), когда посредством операционного усилителя на затворе детектора подбирается отрицательное напряжение для поддержания заданного рабочего тока детектора.

2. При постоянном отрицательном напряжении на затворе. В данном случае детектор обучается при отрицательном напряжении на затворе и объединенных контактах стока, истока и подложки, находящихся под нулевым потенциалом

(рисунок 61), периодически переключаясь в режим с постоянным током стока для измерения информативного параметра.

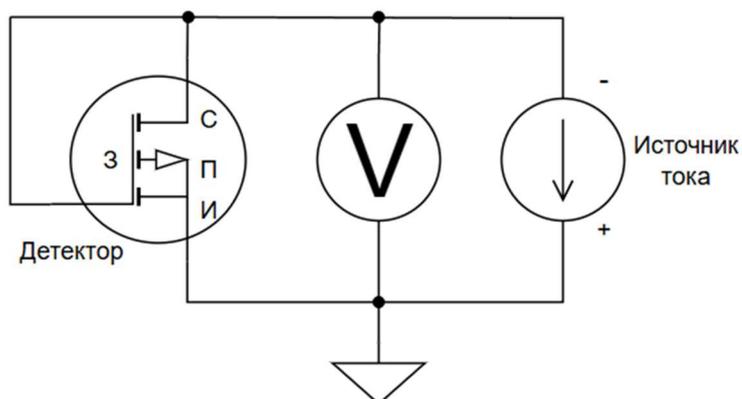


Рисунок 59 – Электрическая схема работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным током стока при объединенных контактах стока и затвора, и объединенных контактах подложки и истока

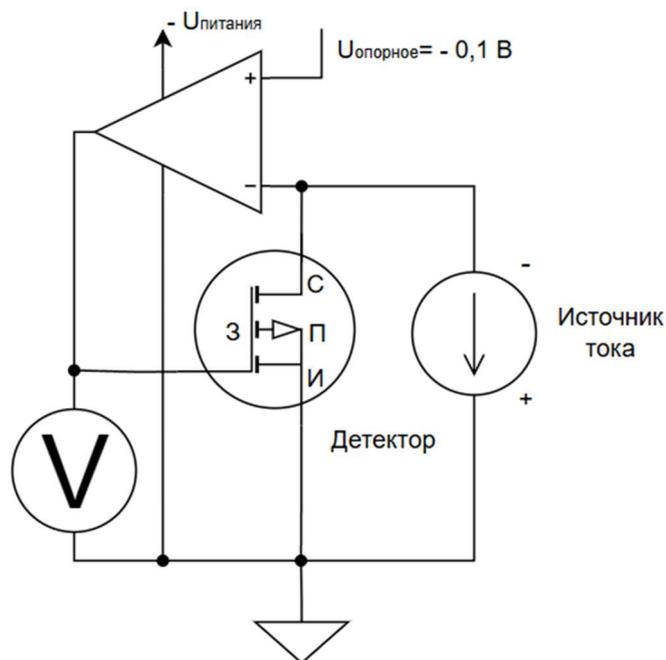


Рисунок 60 – Электрическая схема работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным током стока при постоянном напряжении минус 0,1 В на стоке

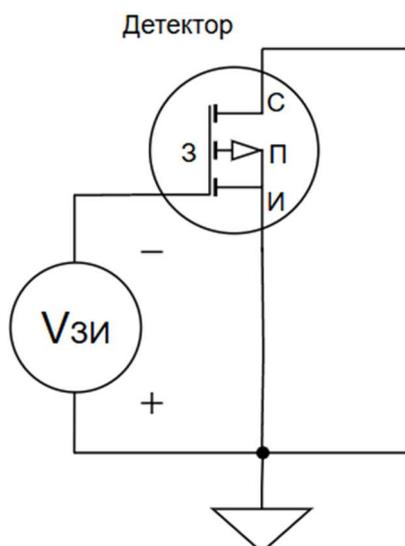


Рисунок 61 – Электрическая схема работы детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе

Самым простым для реализации режимом работы детектора является режим с постоянным током стока в котором не требуется ни каких переключений для измерения информативного параметра. На рисунке 62 представлена зависимость изменения напряжения между затвором и истоком ($\Delta V_{\text{МНОП}}$) детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, в режиме работы с постоянным током стока 70,2 мкА при объединенных затворе и стоке, от поглощенной дозы ИИ. Облучение проводилось на изотопном источнике гамма-излучения ^{60}Co с мощностью экспозиционной дозы 12,9 Р/с до значения поглощенной дозы 46,57 крад(SiO_2).

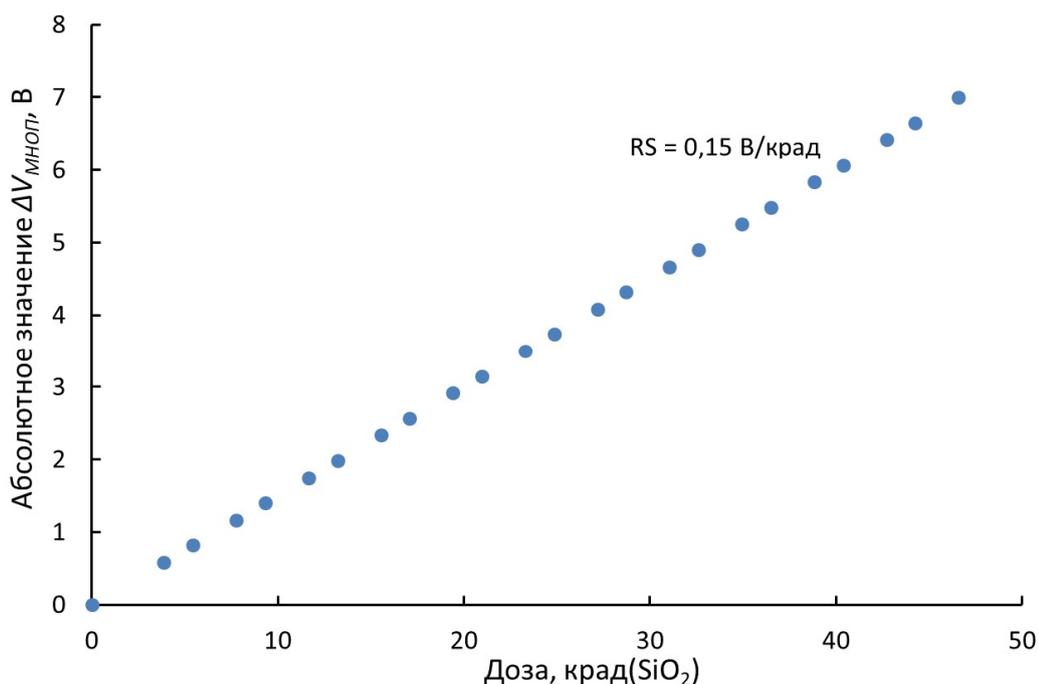


Рисунок 62 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, в режиме работы с постоянным током стока 70,2 мкА при объединенных затворе и стоке, в зависимости от поглощенной дозы ИИ

Из рисунка 62 видно, что зависимость изменения напряжения между затвором и истоком имеет постоянный наклон, который соответствует радиационной чувствительности 0,15 В/крад(SiO_2). Если сравнивать полученную чувствительность с чувствительностью расчетной, полученной в главе 2 (0,18 В/крад(SiO_2)), то она ниже. Объясняется это тем, что для расчета чувствительности использовалось начальное напряжение на затворе равное минус 2 В, что соответствует напряженности электрического поля 61730 В/см, а в эксперименте начальное напряжение на затворе было минус 1,4 В до воздействия ионизирующего излучения (при токе 70,2 мкА). Соответственно, электрическое поле в SiO_2 , имеющее постоянное значение в данном режиме облучения, было меньше (35920 В/см), чем в расчетах и чувствительность за счет меньшего выхода заряда составила также меньшую величину.

4.3 Исследование зависимости радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-канального МНОП-транзистора от отрицательного напряжения на затворе

Радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе р-МНОПТ зависит от напряженности электрического поля в SiO_2 и, соответственно, от приложенного к затвору напряжения, поэтому для увеличения чувствительности детектора необходимо применять режим работы с наиболее высоким постоянным отрицательным напряжением на затворе. В главе 2 был представлен рисунок 19 на котором видно, как растет чувствительность детектора при увеличении отрицательного напряжения на затворе во время облучения (напряжение на затворе минус 2, минус 4, минус 10 и минус 40 В). На рисунке 63 представлены зависимости изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, при напряжениях на затворе равных минус 40, минус 75 и минус 100 В. В процессе облучения детекторов периодически проводили измерения напряжения между затвором и истоком при постоянном токе стока 100 мкА, в схеме с объединенными затвором и стоком. Облучение проводилось на изотопном источнике гамма-излучения ^{60}Co с мощностью экспозиционной дозы 14 Р/с до поглощенной дозы 72,8 крад(SiO_2). Стоит отметить, что для корректности работы детектора в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе необходимо соблюдать следующее условие: время измерения информативного параметра в режиме с постоянным током стока должно быть кратно меньше, чем время работы детектора в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе, так как данные режимы работы приводят к разному количеству накопленного заряда на границе раздела диэлектриков.

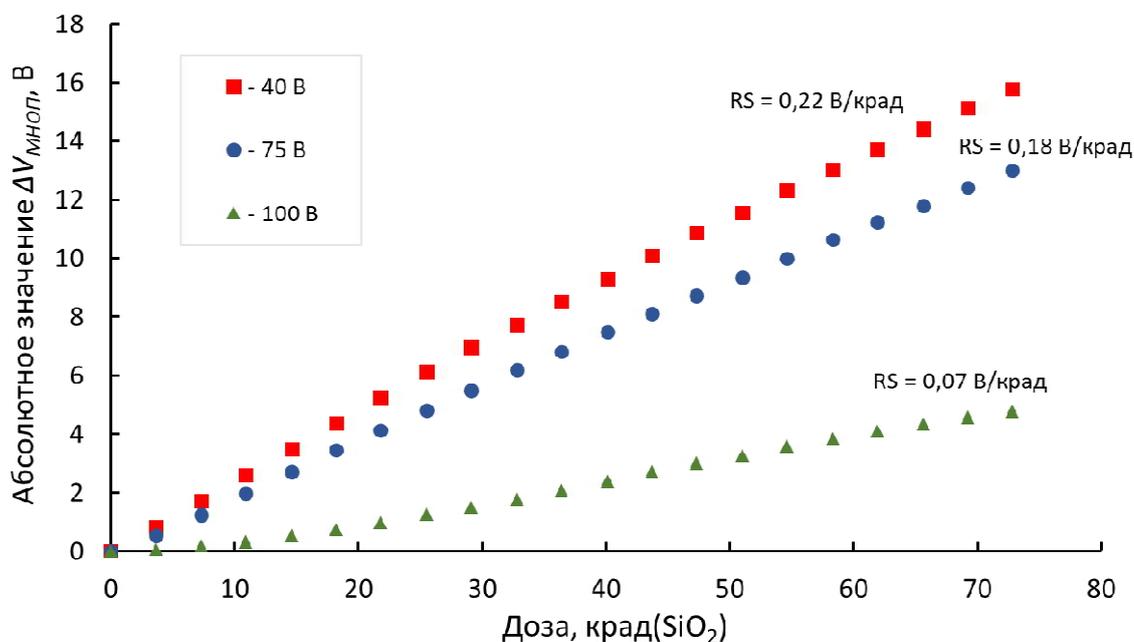


Рисунок 63 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, в режиме работы с постоянным отрицательным напряжением на затворе, в зависимости от поглощенной дозы ИИ

На рисунке 63 видно, что при увеличении абсолютного значения отрицательного напряжения на затворе детектора его чувствительность уменьшается: $0,22 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 40 В на затворе; $0,18 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 75 В на затворе и $0,07 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 100 В на затворе. Данная зависимость противоположна рисунку 19, где чувствительность детектора увеличивалась за счет увеличения выхода заряда при увеличении абсолютного значения отрицательного напряжения на затворе: $0,02 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 2 В на затворе; $0,05 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 4 В на затворе; $0,15 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 10 В на затворе и $0,22 \text{ В/крад}(\text{SiO}_2)$ при минус 40 В на затворе. При анализе изменения напряжения между затвором и истоком от дозы ионизирующего излучения рассматривалась средняя чувствительность детектора в диапазоне от 0 до $72,8 \text{ крад}(\text{SiO}_2)$, так как данные зависимости имеют характер близкий к линейному. Объясняется уменьшение чувствительности детектора при увеличении абсолютного значения отрицательного напряжения на затворе (минус 75 и

минус 100 В) тем, что напряженности электрических полей в SiO_2 и Si_3N_4 достигли критических значений, равных ≈ 5 МВ/см и ≈ 2 МВ/см, соответственно, еще до облучения и начался перенос заряда в диэлектриках. Можно сделать вывод, что зависимость чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT от постоянного отрицательного напряжения на затворе немонотонная и имеет максимум. Для детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, максимум чувствительности достигается при минус 40 В на затворе (рисунок 64). Также из рисунка 19 видно, что экспериментальная зависимость изменения напряжения между затвором и истоком при подаче на затвор напряжения минус 40 В начинает отклоняться в меньшую сторону по сравнению с расчетной при дозе ≈ 50 крад(SiO_2), это также означает, что напряженность электрического поля в Si_3N_4 достигла критического значения за счет накопления положительного заряда на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и начался процесс переноса заряда через данный диэлектрик.

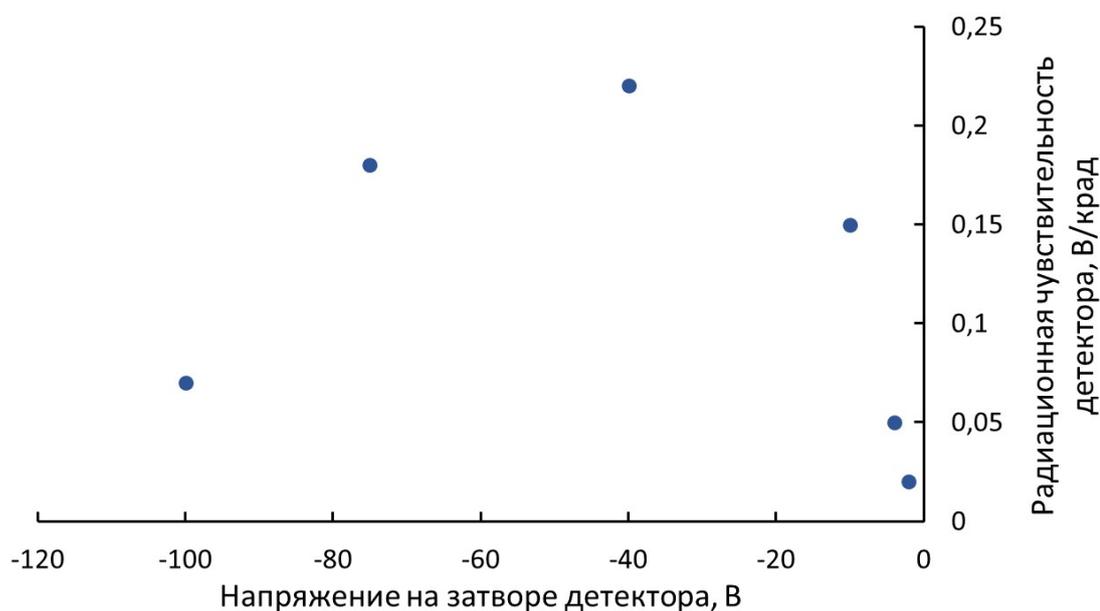


Рисунок 64 – зависимость радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-MHOPT, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, от отрицательного напряжения на затворе

4.4 Исследование зависимости радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе p-канального МНОП-транзистора от полярности напряжения на затворе

На границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ захватывается не только положительный, но и отрицательный заряд, поэтому при приложении к затвору детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе p-МНОПТ постоянного положительного напряжения, он тоже будет иметь чувствительность к ионизирующему излучению, но абсолютное значение отрицательного напряжения между затвором и истоком будет уменьшаться, а не увеличиваться, как в случае с приложением постоянного отрицательного напряжения на затвор. Но уменьшать абсолютное значение отрицательного напряжения между затвором и истоком будет до тех пор, пока не перейдет через нуль и станет не отрицательным, а положительным, что привнесет определенные сложности для его измерения. Поэтому, при использовании детекторов в данном режиме, рекомендуется учитывать данный факт, который может служить ограничением при использовании детектора в режиме с подачей постоянного положительного напряжения на затвор во время облучения.

На рисунке 65 представлена зависимость изменения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе p-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм в режиме с постоянным напряжением на затворе + 40 В (контакты истока, стока и подложки объединены и находятся под нулевым потенциалом), измерение информативного параметра проводилось в режиме с постоянным током стока равном 100 мкА и объединенных контактах затвора и стока. Облучение проводилось на изотопном источнике гамма-излучения ^{60}Co с мощностью экспозиционной дозы 6 Р/с до поглощенной дозы 63 крад(SiO_2).

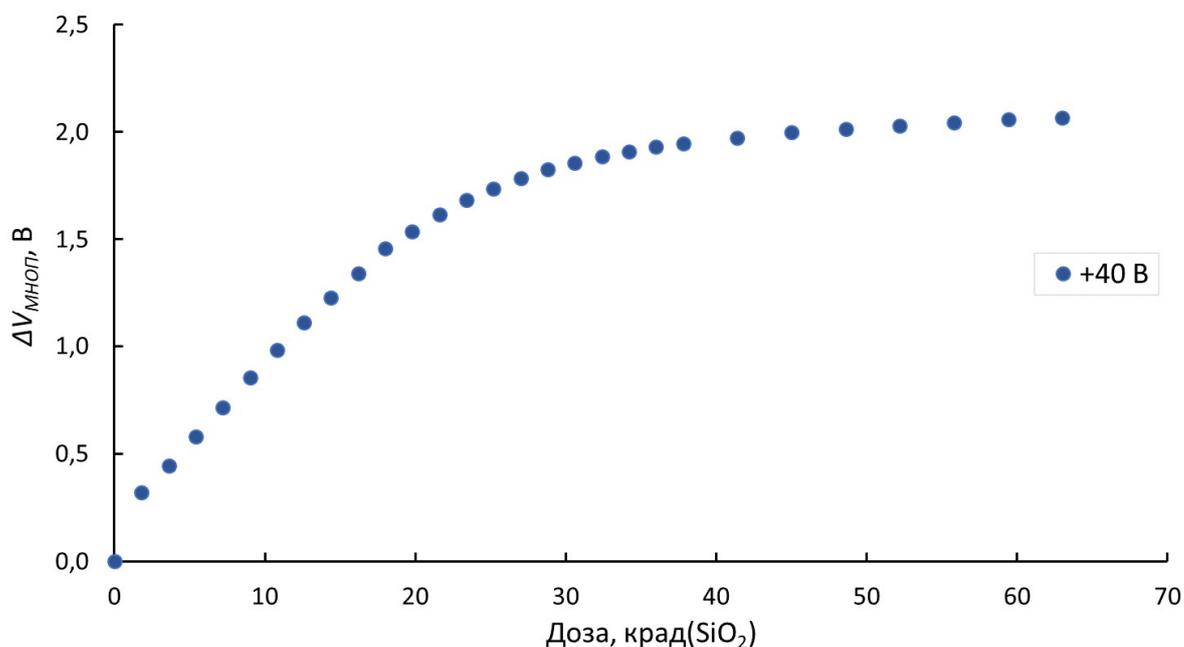


Рисунок 65 – Изменение напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм в режиме работы с постоянным напряжением на затворе + 40 В

Чувствительность детектора в режиме работы с постоянным напряжением на затворе + 40 В составила 0,074 В/крад(SiO₂) в начале облучения и после поглощения дозы ~ 20 крад(SiO₂) стала заметно снижаться. Связано снижение чувствительности в данном случае с уменьшением напряженности электрического поля в SiO₂ по мере накопления заряда на границе раздела диэлектриков и, соответственно, снижением выхода заряда.

На рисунке 66 приведена зависимость абсолютного значения напряжения между затвором и истоком ($V_{\text{МНОПТ}}$) детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм от дозы ИИ в режиме с постоянным напряжением минус 40 В, а затем + 40 В на затворе. Измерение информативного параметра проводилось в режиме с постоянным током стока равном 100 мкА и объединенных контактах затвора и стока. Облучение проводилось на изотопном источнике гамма-излучения ⁶⁰Со с мощностью экспозиционной дозы 6 Р/с до поглощенной дозы 64,8 крад(SiO₂).

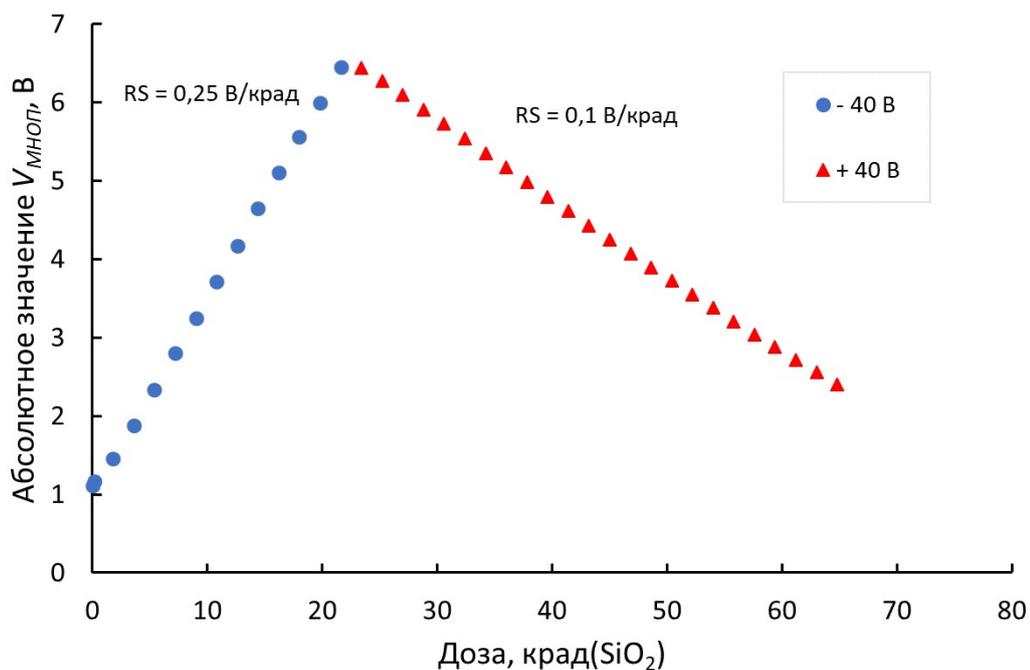


Рисунок 66 – Абсолютные значения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, в зависимости от дозы ионизирующего излучения в режиме с постоянным напряжением минус 40 В, а затем + 40 В на затворе

Чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм, составила 0,25 В/крад(SiO_2) в режиме с постоянным напряжением минус 40 В на затворе и 0,1 В/крад(SiO_2) в режиме с постоянным напряжением + 40 В на затворе. Как видно, чувствительность детектора при подаче постоянного положительного напряжения на затвор заметно меньше, чем при подаче постоянного отрицательного напряжения равного по абсолютному значению. Объясняется это тем, что при подаче положительного напряжения на затвор захватываются не только электроны на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, но и дырки в SiO_2 вблизи поверхности кремния, частично компенсируя захваченный отрицательный заряд. Данный факт, что на границе раздела диэлектриков захватывается и положительный и отрицательный заряд, увеличивая или уменьшая абсолютное значение напряжения между затвором и истоком при заданном токе,

открыл возможность восстановления характеристик детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ или подстройки пороговых напряжений МНОПТ путем их облучения при подаче отрицательного или положительного напряжения на затвор.

В работе [83], опубликованной автором диссертации описано, что при приложении положительного напряжения на затвор детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ направление сдвига информативного параметра может происходить как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных значений напряжения. Определяется величина и направление сдвига информативного параметра в данном случае захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si .

Используя возможность изменять напряжение между затвором и истоком в сторону уменьшения или увеличения значения, за счет подачи постоянного отрицательного или положительного напряжения на затвор во время облучения, предложен схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ. Суть метода состоит в том, что ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ является кристалл с изготовленными на нем двумя идентичными р-МНОПТ, электрически не связанными между собой, которые при облучении будут работать в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе (транзистор 1) и с постоянным положительным напряжением на затворе (транзистор 2), а информативным параметром будет напряжение между затворами данных транзисторов. Электрическая схема измерения информативного параметра детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, представлена на рисунке 67. Абсолютные значения напряжений между затвором и истоком р-МНОПТ чувствительного элемента детектора, работающих в режиме с разными по знаку напряжениями на затворе (минус 40 и + 40 В) с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 100 / 106,7$ нм будут выглядеть следующим образом, проиллюстрированном на рисунке 68, если бы оба транзистора имели радиационную чувствительность, как в эксперименте на рисунке 66. Общая

радиационная чувствительность такого детектора будет складываться из абсолютных значений чувствительности двух транзисторов.

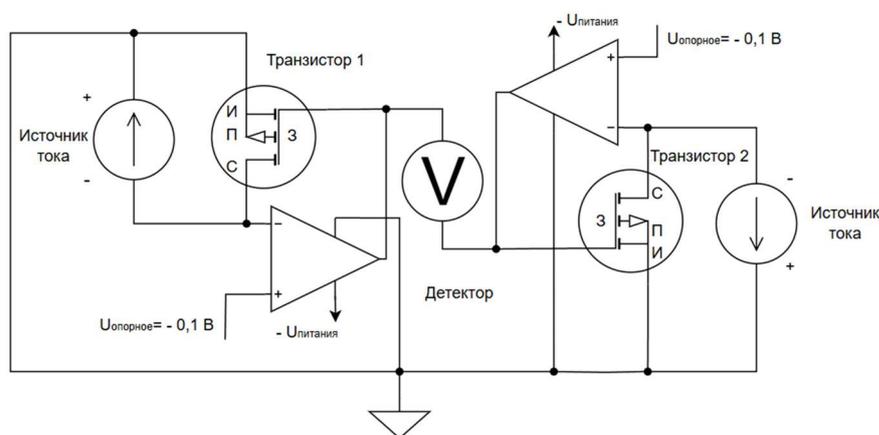


Рисунок 67 – Электрическая схема измерения информативного параметра детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле

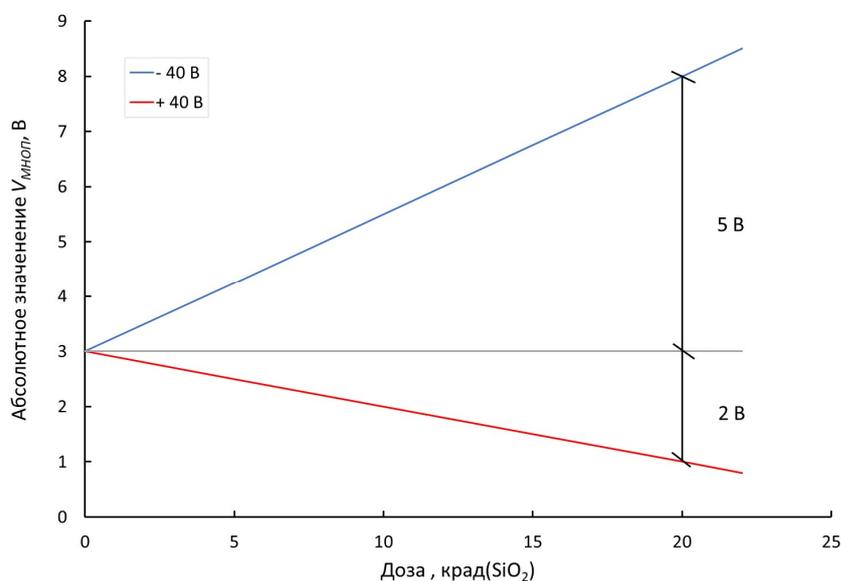


Рисунок 68 – Абсолютное значение напряжения между затвором и истоком в зависимости от дозы двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, являющимся ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ, работающих в режиме с разным по знаку напряжением на затворе (минус 40 и + 40 В), толщина подзатворных диэлектриков Si₃N₄ / SiO₂ = 100 / 106,7 нм

Как видно из рисунка 68, чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ в виде кристалла с двумя р-МНОПТ, складывающаяся из двух чувствительностей транзисторов при подаче минус 40 В и + 40 В, составляет 0,35 В/крад(SiO_2) и разница между напряжениями затворов двух транзисторов при достижении дозы 20 крад(SiO_2) равна 7 В.

4.5 Результаты измерения радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, изготовленных в соответствии с требуемыми характеристиками

Измерение радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ, изготовленных в соответствии с требуемыми характеристиками, проводилось при воздействии гамма-квантов ^{60}Co с мощностью экспозиционной дозы 0,32 Р/с. Первоначально для каждого измеренного детектора был найден рабочий ток, на котором проводилось измерение информативного параметра. Измерение информативного параметра проводилось на выбранном рабочем токе в соответствии с электрической схемой, когда на сток детектора подается постоянное напряжение минус 0,1 В

На рисунке 69 представлено абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 3,5 В и минус 1 В на затворе. Как видно из рисунка 68 радиационная чувствительность детекторов составила 0,014 В/крад(SiO_2) при минус 3,5 В на затворе и 0,008 В/крад(SiO_2) при минус 1 В на затворе.

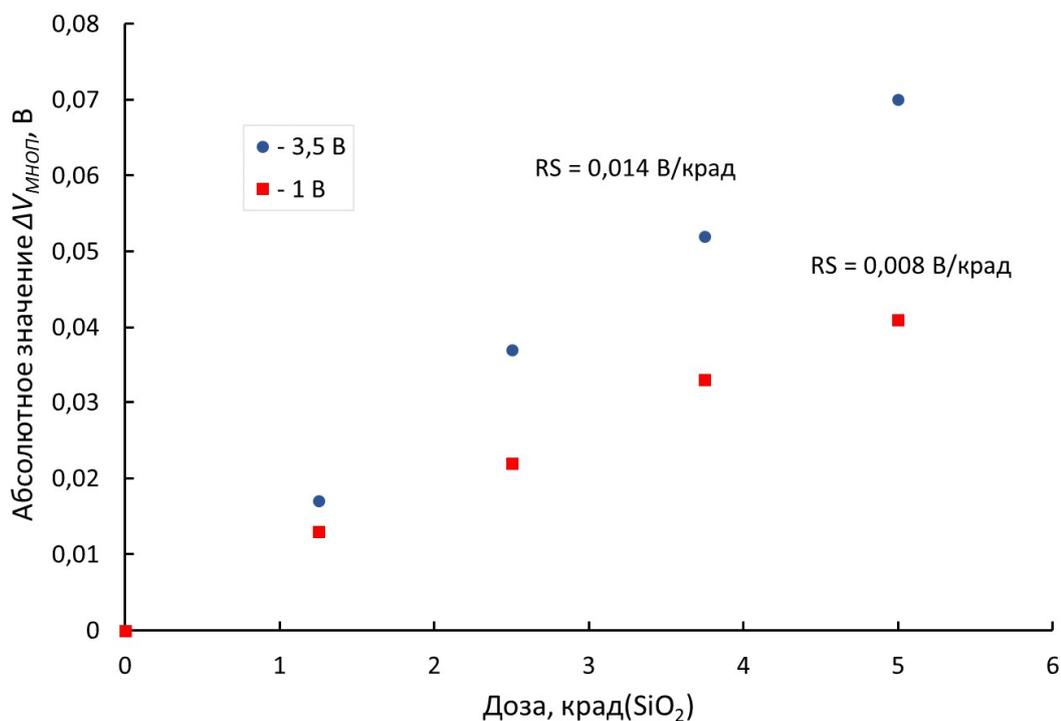


Рисунок 69 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 3,5 В и минус 1 В на затворе

На рисунке 70 представлено абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 15 В затворе. Как видно из рисунка 70 чувствительность детектора составила 0,44 В/крад(SiO₂) при напряжении минус 15 В на затворе.

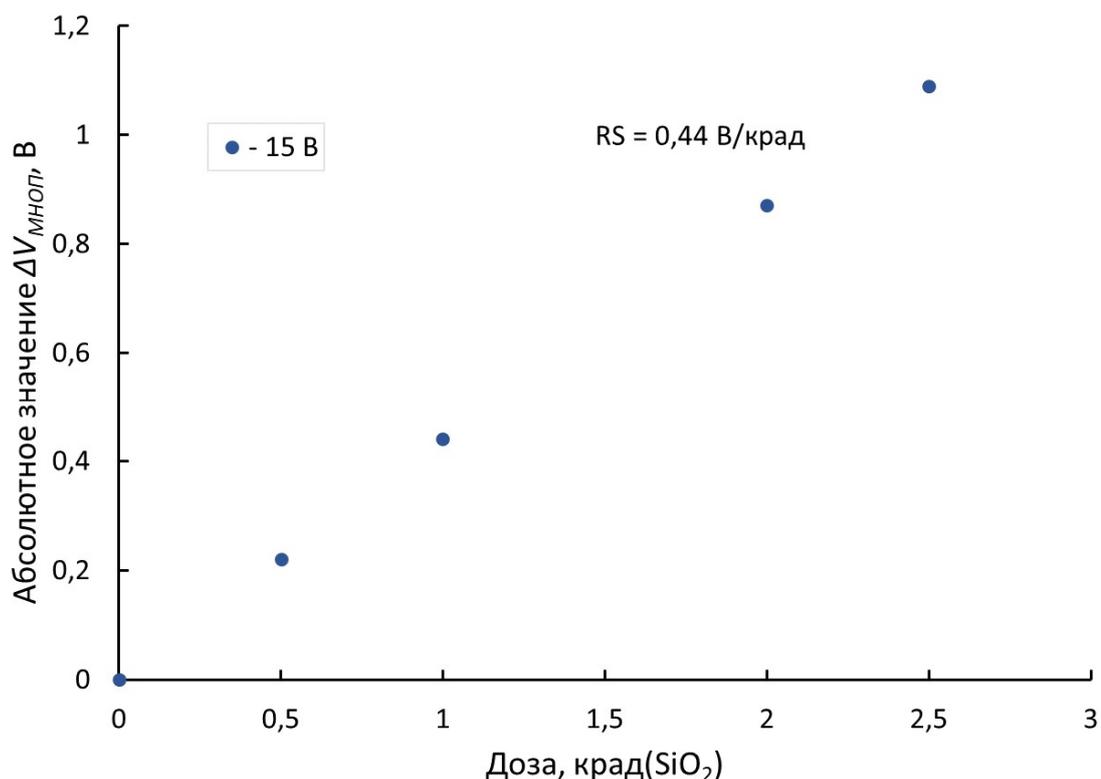


Рисунок 70 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 15 В затворе

На рисунке 71 представлено абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 25 В и минус 4 В на затворе. Как видно из рисунка 71 чувствительность детектора составила 1,06 В/крад(SiO_2) при минус 25 В на затворе и 0,61 В/крад(SiO_2) при минус 4 В на затворе.

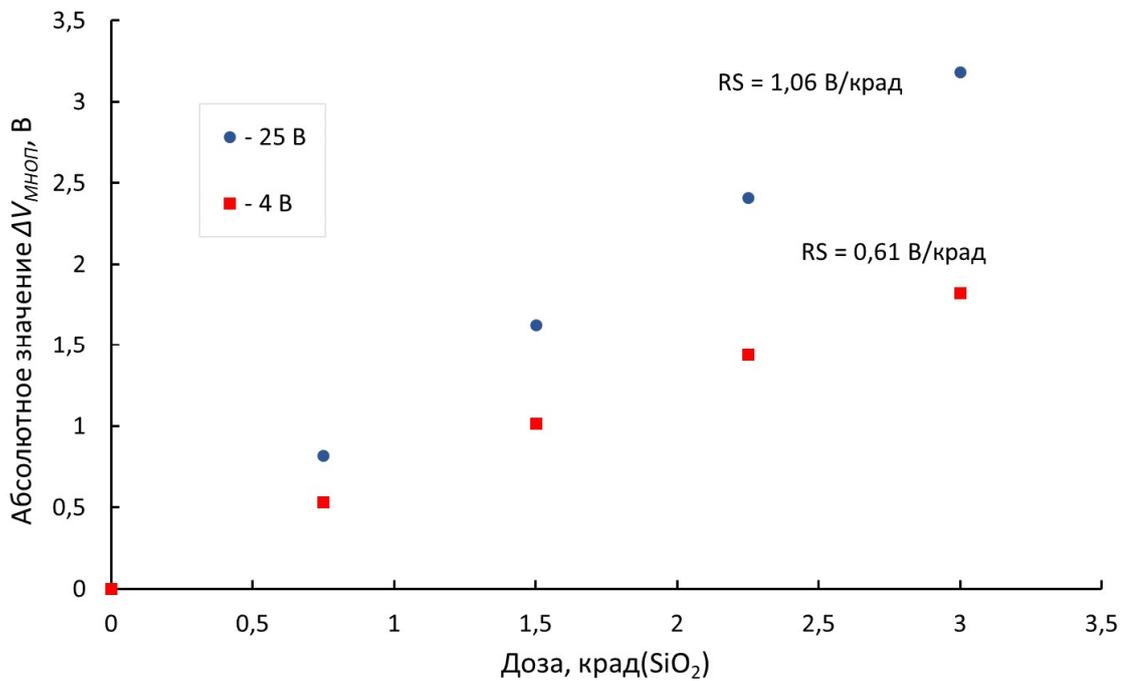


Рисунок 71 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 25 В и минус 4 В на затворе

На рисунке 72 представлено абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 40 В и минус 9 В на затворе. Как видно из рисунка 72 чувствительность детектора составила 5,77 В/крад(SiO_2) при минус 40 В на затворе и средняя чувствительность составила 3,38 В/крад(SiO_2) при минус 9 В на затворе (данная зависимость имеет нелинейность вследствие больших изменений напряжения между затвором из-за большого количества накопленного заряда и компенсации электрического поля в SiO_2 уже в начале облучения).

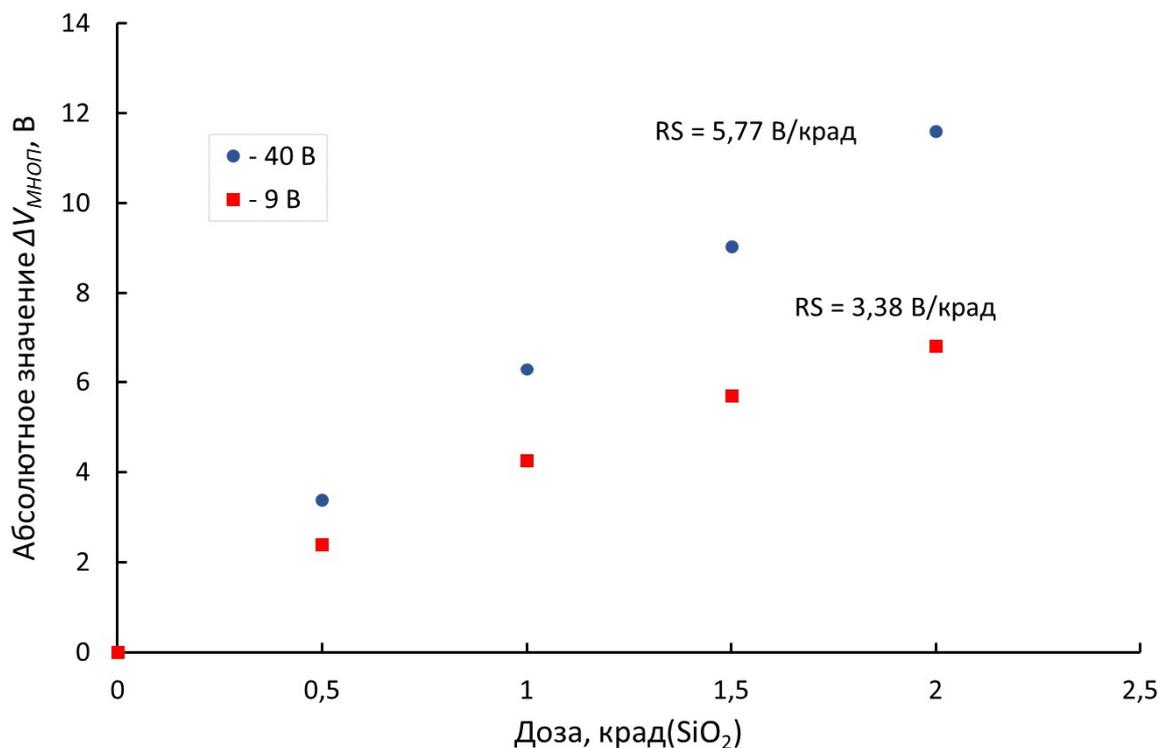


Рисунок 72 – Абсолютное значение изменения напряжения между затвором и истоком детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, в зависимости от дозы ИИ в режиме работы с постоянным напряжением минус 40 В и минус 9 В на затворе

В таблице 22 представлено сравнение расчетных и экспериментальных радиационных чувствительностей детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ, изготовленных в соответствии с требованиями.

Таблица 22 – Сравнение расчетных и экспериментальных радиационных чувствительностей детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, изготовленных в соответствии с требованиями

Толщина подзатворных диэлектриков, нм	Режим работы постоянным отрицательным напряжением на затворе		Режим работы с постоянным током стока	
	Начальная расчетная чувствительность RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))	Начальная измеренная чувствительность RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))	Расчетная чувствительность RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))	Измеренная чувствительность RS, В/крад(SiO ₂) (мВ/Гр(SiO ₂))
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 35 / 35	V _{зат} = минус 1 В 0,008 (0,8) V _{зат} = минус 3,5 В 0,024 (2,4)	V _{зат} = минус 1 В 0,008 (0,8) V _{зат} = минус 3,5 В 0,014 (1,4)	0,019 (1,9)	0,017 (1,7)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 150	V _{зат} = минус 15 В 0,44 (44,0)	V _{зат} = минус 15 В 0,44 (44,0)	0,16 (16,0)	0,16 (16,0)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 300	V _{зат} = минус 4 В 0,61 (61,0) V _{зат} = минус 25 В 1,06 (106,0)	V _{зат} = минус 4 В 0,61 (61,0) V _{зат} = минус 25 В 1,06 (106,0)	0,25 (25,0)	0,25 (25,0)
Si ₃ N ₄ / SiO ₂ = = 150 / 800	V _{зат} = минус 9 В 1,29 (129,0) V _{зат} = минус 40 В 2,46 (246,0)	V _{зат} = минус 9 В 3,38 (338,0) V _{зат} = минус 40 В 5,77 (577,0)	0,52 (52,0)	1,13 (113,0)

Как видно из таблицы 22 радиационные чувствительности детекторов поглощенной дозы ИИ расчетные и экспериментальные совпадают для детекторов с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих затворную систему Si₃N₄ / SiO₂ = 35 / 35 нм (при минус 1 В на затворе и в режиме с постоянным током стока), Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 150 нм и Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 300 нм. При расчете радиационной чувствительности использовался коэффициент модели $M = 0,015$ (как при валидации физической модели в главе 2), а для затворной системы Si₃N₄ / SiO₂ = 150 / 300 нм коэффициент модели составил $M = 0,068$. Объясняется использование другого коэффициента тем, что слои толстого SiO₂ выращивают в других режимах нежели тонкие слои, а от этого как раз и зависит коэффициент модели M .

Экспериментальная радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего затворную систему Si₃N₄ / SiO₂ =

= 35 / 35 нм, в режиме при минус 3,5 В на затворе имеет меньшую величину, нежели расчетная. Объясняется данный факт туннелированием носителей заряда через тонкие слои Si_3N_4 и SiO_2 при достаточно большой напряженности электрического поля.

Расчетная чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих затворную систему $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, значительно меньше, чем экспериментальная. И разумным изменением коэффициента модели M не удастся получить расчетные значения, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными. Данный факт скорее всего связан не только с технологией изготовления толстых слоев SiO_2 , достигающих толщины порядка 1 мкм, а, возможно, и с нарушением какого-либо технологического процесса и требует дополнительных исследований.

В таблице 23 представлено сравнение расчетных и экспериментальных верхних границ диапазонов измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для работы в режиме с постоянным током стока.

Таблица 23 – Сравнение расчетных и экспериментальных верхних границ диапазонов измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для работы в режиме с постоянным током стока

Толщина подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, нм	Режим работы с постоянным током стока	
	Расчетная верхняя граница диапазона измеряемых доз, крад(SiO_2) (Гр(SiO_2))	Измеренная верхняя граница диапазона измеряемых доз, крад(SiO_2) (Гр(SiO_2))
35 / 35	350 (3500)	Более 400 (4000)
150 / 150	185 (1850)	Более 250 (2500)
150 / 300	125 (1250)	Более 160 (1600)
150 / 800	67 (670)	40 (400)

Как видно из таблицы 23 верхняя граница диапазонов измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих затворные системы $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм и $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, измеренная в ходе эксперимента, превышает расчетную для режима работы с постоянным током стока. Это объясняется тем, что расчет верхней

границы диапазона проводился до значения электрического поля в Si_3N_4 равного 2,1 МВ/см, а на изготовленных транзисторах реальная величина критической напряженности электрического поля в Si_3N_4 оказалась выше. Такая же картина наблюдалась и во время измерений при приложении постоянного напряжения на затвор детектора: все измеренные верхние границы диапазонов измерений были превышены. Для детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющего затворную систему $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм, экспериментальная верхняя граница диапазона измеряемых доз значительно ниже расчетной. Это объясняется аномально высокой чувствительностью детектора, приводящей к превышению критической величины напряженности электрического поля в Si_3N_4 уже при достаточно малых значениях поглощенной дозы.

4.6 Выводы к главе 4

Глава была посвящена исследованию детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ. В данной главе показана методика выбора рабочего тока для измерения информативного параметра детектора, необходимая для минимизации погрешности измерений, которая может возникнуть вследствие изменения температуры детектора.

Были проведены измерения радиационной чувствительности изготовленных в соответствии с требованиями детекторов в различных режимах работы. Показано, что радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе вначале растет вследствие увеличения выхода заряда, связанного с ростом напряженности электрического поля в SiO_2 , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в SiO_2 и(или) в Si_3N_4 .

Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si . Используя данный эффект можно проводить подстройку порогового напряжения транзистора сдвигая его в сторону увеличения или уменьшения порогового напряжения. Чувствительность детектора при приложении постоянного положительного напряжения на затвор меньше, чем при приложении аналогичного отрицательного напряжения за счет захвата дырок в SiO_2 вблизи поверхности кремния, частично компенсирующих захваченный на границе раздела диэлектриков отрицательный заряд.

На основе эффекта сдвига порогового напряжения в сторону увеличения или уменьшения порогового напряжения детектора разработан оригинальный схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, заключающийся в приложении при облучении разного по знаку напряжения на затворы двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле, являющимся чувствительным элементом детектора. Метод позволяет повысить радиационную чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ до двух раз.

Измерения таких радиационных характеристик, как чувствительность и диапазон измеряемых доз, на изготовленных в соответствии с требованиями детекторах показали, что радиационные характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ с толщиной диэлектрических слоев $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм и $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм хорошо соответствуют расчетам, проведенным по разработанной в главе 2 физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в

подзатворных диэлектриках р-МНОПТ, за исключением случая при достаточно больших напряженностях электрических полей в тонких слоях подзатворных диэлектриков. В то время, как детекторы с чувствительными элементами основе р-МНОПТ с толщиной диэлектрических слоев $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 800$ нм имеют радиационную чувствительность, значительно превышающую расчетную, что может быть связано с особенностью технологии получения толстых слоев SiO_2 .

Радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ соответствуют требуемым характеристикам (таблица 2) для заданных условий применения и режимов эксплуатации: была получена радиационная чувствительность более $70 \text{ мВ/Гр}(\text{SiO}_2)$ и максимальный диапазон измеряемых доз составил от 4,8 до $4 \cdot 10^3 \text{ Гр}(\text{SiO}_2)$. При одновременном использовании двух разработанных детекторов с высокой и низкой радиационной чувствительностью диапазон измеряемых доз составит от 0,04 до $4 \cdot 10^3 \text{ Гр}(\text{SiO}_2)$, а радиационная чувствительность составит величину от 577 до $1,7 \text{ мВ/Гр}(\text{SiO}_2)$ при напряжении не более 40 В и токе потребления ниже 250 мкА.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ (ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ)

5.1 Дозиметр для работы с детекторами поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов

Для применения разработанных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения в различных областях науки и техники необходим дозиметр, который будет задавать режим работы детектора, а также считывать информативный параметр и переводить его с помощью калибровочной зависимости (изменения напряжения между затвором и истоком в зависимости от поглощенной дозы) в поглощенную дозу ИИ. В ходе данной работы был разработан и изготовлен дозиметр для работы с детекторами поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в режиме с постоянным током стока и напряжением на стоке минус 0,1 В, его электрическая принципиальная схема представлена на рисунке 73.

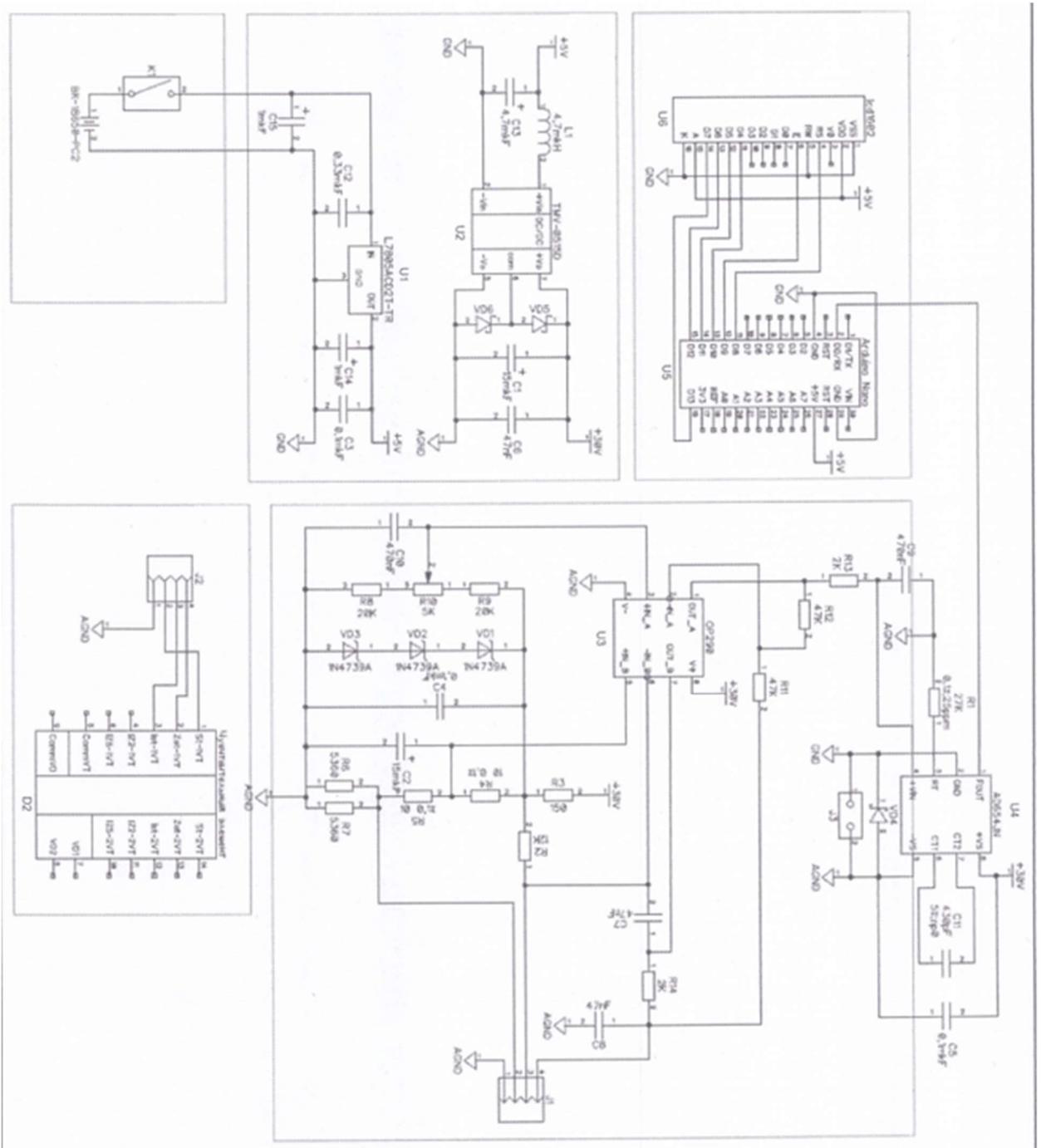


Рисунок 73 – Электрическая принципиальная схема дозиметра для работы с детекторами поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ

Дозиметр изготовлен с применением современной электронной компонентной базы и выполнен на высоком техническом уровне. Особенностью дозиметра является использование преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), что позволяет добиться широкого диапазона измерения напряжения,

характеризующего уровень поглощенной детектором дозы ионизирующего излучения.

Дозиметр имеет возможность корректировки диапазона измерения напряжения и режимов работы за счет выбора параметров RC-цепи и параметров цепи задания режима работы детектора и включает в себя следующие элементы:

- детектор с чувствительным элементом на основе p-MHOPT (D2), который выносится в зону воздействия и соединяется с макетом кабелем (разъемы J1 – J2);

- модуль управления детектором на основе операционного усилителя (U3), обеспечивающий задание режима работы;

- преобразователь напряжение-частота (ПНЧ) (U4), обеспечивающий прием информативного напряжения детектора и преобразование его в меандр с частотой, пропорциональной величине напряжения;

- вторичный источник питания (U2), обеспечивающий стабилизированное напряжение для работы макета;

- вычислительный модуль (U5), обеспечивающей обработку информации и выдачу ее пользователю.

Питание дозиметра осуществляется напряжением в диапазоне от 4,5 В до 5,5 В. Данное решение позволяет использовать питание от USB порта персонального компьютера и иметь автономное питание от аккумуляторных батарей или других химических источников тока.

Вторичный источник питания выполнен на базе модуля DC-DC преобразователя TMV-0515D (U2). Он обеспечивает компоненты датчика постоянным стабилизированным напряжением + 30 В. Диоды Шоттки (VD5 и VD6) служат для предотвращения появления отрицательного напряжения на линиях питания детектора при переходных процессах в момент включения преобразователя.

Модуль управления выполнен на базе операционного усилителя (ОУ) типа OP290 производства фирмы Analog Devices (U3). Для модуля управления используется один операционный усилитель из двух, расположенных в

микросхеме. Модуль служит для задания режима работы детектора и получения значений информативного параметра о поглощенной дозе в виде напряжения на линии V_{INF} (вывод 1). ОУ непосредственно управляет режимом работы детектора путем изменения напряжения на затворе (контакт 1 разъема J1), которое в свою очередь зависит от поглощенной детектором дозы ионизирующего излучения, работающим в режиме с постоянным током стока,

Второй операционный усилитель из двух, расположенных в микросхеме OP290, работает в качестве инвертора со смещением. Напряжение на линии V_{INF} увеличивается по мере увеличения поглощенной детектором дозы. Начальное напряжение V_{INF} при отсутствии поглощенной дозы определяется переменным резистором R10 и составляет от 1 до 2 В. Напряжение V_{INF} изменяется от $\cong 1$ В (при отсутствии поглощенной дозы) до $\cong 27$ В (при максимальной поглощенной дозе).

Преобразователь напряжение-частота выполнен на микросхеме AD654 (U4), которая представляет собой прецизионный однокристалльный преобразователь напряжение-частота с входным усилителем и частотным выходом с открытым коллектором.

На рисунке 74 представлен внешний вид дозиметра для работы с детекторами с чувствительными элементами на основе p-MHOPT.



Рисунок 74 – Дозиметр для работы с детекторами поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

Разработанные в рамках данной диссертационной работы детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ предназначены для различных применений:

- в *in vivo* дозиметрии;
- в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов;
- в дозиметрии на объектах использования атомной энергии;
- в дозиметрии при проведении радиационных испытаний;
- в персональной дозиметрии для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ.

И поэтому для различных применений были изготовлены свои дозиметры, на базе разработанного.

5.2 Применение детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний

Для работы на борту космических аппаратов были выбраны детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющих толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм. Для работы с данными детекторами на основе разработанного дозиметра был изготовлен дозиметр для применения в составе РЭА КА (рисунок 75).

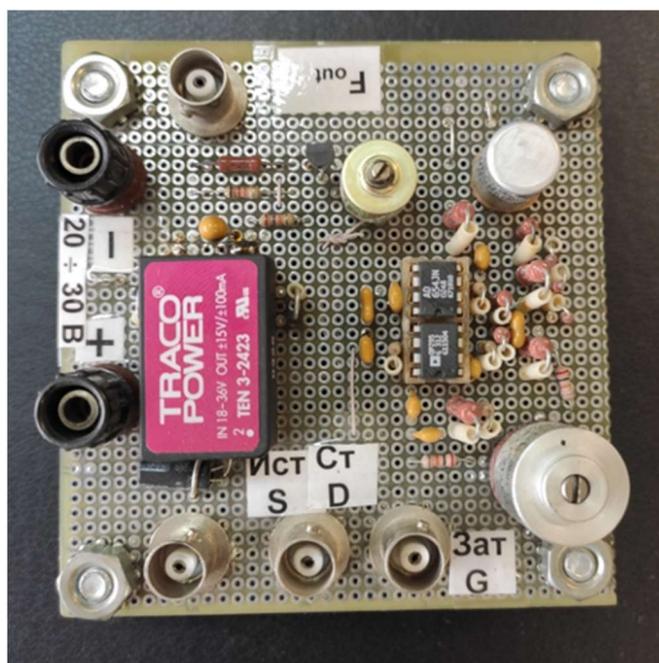


Рисунок 75 – Дозиметр для применения в составе РЭА КА

Данный дозиметр не имеет корпуса, так как встраивается в аппаратуру, изготовленную для применения на борту космического аппарата. Детекторы с данным дозиметром работают в режиме с постоянным током стока и с напряжением на стоке минус 0,1 В, что позволяет иметь линейную калибровочную кривую с максимальным диапазоном измеряемых доз.

Изготовленные дозиметры с выбранными детекторами были смонтированы в радиоэлектронную аппаратуру нескольких космических аппаратов и в данный момент бесбойно работают в космическом пространстве. Также партия изготовленных детекторов была откалибрована в АО «НИИП» и отправлена заказчику для установки на борт космического аппарата для определения поглощенной дозы в наиболее чувствительных к радиационному воздействию приборах космического аппарата.

Для использования на ОИАЭ и для радиационных испытаний были выбраны детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющие толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $150 / 150$ нм, $150 / 300$ нм. Для работы с данными детекторами также был изготовлен 5-ти канальный дозиметр на основе ранее разработанного (рисунок 76).



Рисунок 76 – Дозиметр для использования на ОИАЭ и для радиационных испытаний

Изготовленные дозиметры с выбранными детекторами с 2024 года используются в АО «НИИП» для контроля поглощенной дозы ИИ в ходе радиационных испытаний и для контроля радиационной обстановки в зоне контролируемого доступа. По сравнению с термолюминесцентными детекторами

они показали высокую точность измерения поглощенной дозы и что, не менее важно, была использована функция «online» дозиметрии, позволившая еще больше увеличить точность дозы, получаемой объектом испытаний.

5.3 Применение детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов в *in vivo* дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ

Детекторы, предназначенные для работы в *in vivo* дозиметрии и для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ должны обладать высокой чувствительностью (не менее 70 мВ/Гр(SiO_2)) и для применения в этих областях были выбраны детекторы поглощенной дозы с ЧЭ на основе р-МНОПТ, имеющие толщину подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, 150 / 800 нм. Для того, чтобы детекторы имели необходимую чувствительность, они должны работать в режиме с постоянным отрицательным напряжением на затворе, поэтому, для работы с данными детекторами был изготовлен дозиметр, основанный на ранее разработанном, но позволяющий работать детектору в режиме постоянного отрицательного напряжения на затворе (рисунок 77).



Рисунок 77 – Дозиметр для применения в *in vivo* дозиметрии

Особенность дозиметра для *in vivo* дозиметрии заключается не только в режиме работы детектора, но и в том, что обработка и вывод информации реализован на устройстве с операционной системой Android, в данном случае плеера. Также он имеет 5 каналов обработки информации с детекторов. В АО «НИИП» были проведены максимально приближенные к условиям сеанса лучевой терапии испытания данного дозиметра с изготовленными детекторами, в ходе которых была продемонстрирована необходимая для лучевой терапии погрешность измерения поглощенной дозы не более 1 %. До конца 2025 года несколько *in vivo* дозиметров с детекторами будут переданы в центры радиотерапии и ядерной медицины для проведения исследований и испытаний.

Для регистрации аварийных доз персонала на ОИАЭ можно использовать изготовленный *in vivo* дозиметр, так как он имеет автономность работы до 8 часов, но он имеет достаточно большие габаритные размеры порядка $150 \times 100 \times 18$ мм и 5 каналов для работы с детекторами, что является избыточным для данного применения. Учитывая данные недостатки, в настоящее время ведется разработка портативного персонального дозиметра с изготовленными детекторами для применения в качестве персонального дозиметра для регистрации «аварийных» доз персонала.

5.4 Выводы к главе 5

В данной главе было описано применение разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения в рамках единой конструктивно-технологической концепции на основе р-МНОПТ для различных применений со специально разработанными дозиметрами.

Были продемонстрированы дозиметры, применяющиеся в составе радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов и на объектах использования атомной энергии, в том числе для радиационных испытаний.

Также был продемонстрирован *in vivo* дозиметр, подготовленный для проведения исследований и испытаний в центрах радиотерапии и ядерной медицины, который может также использоваться в качестве персонального дозиметра для регистрации «аварийных» доз персонала.

Необходимо отметить, что все разработанные и изготовленные в ходе данной диссертационной работы детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-МНОПТ с толщиной подзатворных диэлектриков $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $150 / 150$ нм, $150 / 300$ нм и $150 / 800$ нм нашли свое применение в одной или нескольких заявленных областях науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен детальный анализ, рассмотрены принципы работы полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, проведена классификация детекторов в зависимости от технологии изготовления и приведены их основные конструкции и области применения. Обосновано применение МДП-транзисторов в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения, описаны принципы работы детекторов с чувствительными элементами на основе МОП- и МНОП-транзисторов и приведены основные требования к детекторам данного типа.

2. Разработана физическая модель, позволяющая прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая, в отличие от ранее существующих моделей, учитывает влияние накопленного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ на напряженность электрического поля в слоях диэлектрика и на выход заряда в SiO_2 . Модель применима, в том числе, при слабых электрических полях в SiO_2 с напряженностью менее 10^3 В/см. Экспериментальные данные, полученные на изготовленных детекторах хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных по разработанной модели.

3. Показано, что нелинейный характер дозовой зависимости напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока является следствием накопления радиационно-индуцированного заряда на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, приводящего к снижению выхода заряда за счет уменьшения напряженности электрического поля в SiO_2 и критическому увеличению напряженности электрического поля в Si_3N_4 .

4. Продемонстрирована возможность создания в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ

для применения в различных областях науки и техники, имеющих равнозначные электрические характеристики, но различные радиационные чувствительности и диапазоны измеряемых доз. В рамках исследования возможности создания р-МНОПТ с заданными характеристиками для применения в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы был выбран вариант технологического исполнения и в соответствии с ним проведены расчеты основных электрических характеристик. Разработано пять вариантов топологии р-МНОПТ с кольцевой и полосковой конструкцией, разработан технологический маршрут их изготовления, включающий в себя 62 технологические операции, в том числе 8 фотолитографий, проведено приборно-технологическое моделирование, результаты которого очень хорошо согласуются с измерениями электрических характеристик, проведенными на изготовленных транзисторах.

5. Определены и научно обоснованы конструкции затворных систем р-МНОПТ, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения и режимы работы детекторов для получения необходимой радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз при заданных условиях применения. Показано, что радиационную чувствительность более 70 мВ/Гр(SiO_2), вплоть до 246 мВ/Гр(SiO_2), можно получить на детекторах с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ при приложении на затвор не более 40 В отрицательного напряжения, имеющих следующие параметры затворной системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, $150 / 800$ нм, при этом диапазон измерения доз составит от 0,04 до 390 Гр(SiO_2). Максимальный диапазон регистрируемых доз от 5 до 10^3 Гр(SiO_2), вплоть до $3,5 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2), возможно получить на детекторах с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ, имеющих следующие затворные системы: $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 35 / 35$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 150$ нм, $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 = 150 / 300$ нм, при этом радиационная чувствительность будет варьироваться от 1,0 до 27 мВ/Гр(SiO_2).

6. Впервые в рамках единой конструктивно-технологической концепции созданы и исследованы детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ с заданными

характеристиками, оптимизированные для применения в *in vivo* дозиметрии, контроле дозовых нагрузок на РЭА КА, проведении радиационных испытаний, измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения на ОИАЭ и измерении поглощенной дозы ионизирующего излучения, при получении персоналом «аварийных» доз. Систематически изучено влияние конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для широкого спектра применений.

7. Показано, что радиационная чувствительность детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора при увеличении отрицательного напряжения на затворе вначале растет вследствие увеличения выхода заряда, связанного с ростом напряженности электрического поля в SiO_2 , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в SiO_2 и(или) в Si_3N_4 . Также показано, что детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ имеют большую радиационную чувствительность, чем детекторы с ЧЭ на основе МОП-транзисторов при равной или даже меньшей толщине SiO_2 .

8. Установлено, что детектор поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канального МНОП-транзистора может характеризоваться близкими значениями радиационной чувствительности как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе, приложенном во время облучения. Величина и направление сдвига информативного параметра при отрицательном напряжении на затворе определяется захватом радиационно-индуцированных дырок на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$, а при положительном – захватом радиационно-индуцированных электронов на границе $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2$ и дырок на границе SiO_2 / Si . На основе этого эффекта разработан оригинальный схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ, заключающийся в приложении при облучении разного по знаку напряжения на затворы двух р-МНОПТ, расположенных на одном кристалле,

являющимся чувствительным элементом детектора. Метод позволяет повысить радиационную чувствительность детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ до двух раз.

9. Радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ соответствуют требуемым характеристикам для заданных условий применения и режимов эксплуатации: максимальная радиационная чувствительность составила 577 мВ/Гр(SiO_2), а максимальный диапазон измеряемых доз составил от 4,8 до $4 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2). При одновременном использовании двух разработанных детекторов с высокой и низкой радиационной чувствительностью диапазон измеряемых доз составит от 0,04 до $4 \cdot 10^3$ Гр(SiO_2), а радиационная чувствительность составит величину от 577 до 1,7 мВ/Гр(SiO_2) при напряжении не более 40 В и токе потребления ниже 250 мкА.

10. Научно-техническая значимость работы подтверждена практическим применением разработанных и изготовленных детекторов совместно с разработанными и изготовленными дозиметрами в *in vivo* дозиметрии, радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, дозиметрии на объектах использования атомной энергии, дозиметрии при проведении радиационных испытаний и в персональной дозиметрии для регистрации «аварийных» доз персонала на ОИАЭ.

Благодарности

Автор считает своим долгом выразить огромную благодарность и признательность своему научному руководителю Таперо К.И. и главному научному сотруднику АО «НИИП» Емельянову В.В. за научное руководство, передачу знаний и опыта, обсуждение полученных результатов и становлении автора, как ученого и профессионала в своей трудовой деятельности.

Также автор искренне благодарит:

- Лапшина А.П., генерального директора АО «НИИП» за предоставленную возможность работать в коллективе АО «НИИП» и мотивацию написания данной диссертации;

- Зольникова В.К. за ценные советы при подготовке данной работы;

- Сиделеву Н.П и Сиделева В.Ф., своих родителей, за всестороннюю поддержку и помощь не только при написании диссертации, но и в жизни;

- Сиделеву В.А., свою дочь, за то, что вдохновляет меня в новых свершениях и, надеюсь, что я всегда буду для нее примером в покорении новых вершин;

- своих коллег по работе за поддержку и понимание;

- своих родственников и друзей за сопереживание и моральную поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Группен, К. Детекторы элементарных частиц: справочное издание / К. Группен. – Перевод с английского. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – ISBN 5-87550-099-9.
2. Клайнхт, К. Детекторы корпускулярных излучений / К. Клайнхт. – Перевод с немецкого. – М.: Мир, 1990. – 224 с., ил.
3. Knoll, Glen F. Radiation detection and measurement/ Glenn F. Knoll. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 1999. – 802 p. – ISBN 0-471-07338-5.
4. Горн, Л.С. Современные приборы для измерения ионизирующих излучений / Л.С. Горн, Б.И. Хазанов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.: ил.
5. Lutz, G. Semiconductor radiation detectors: device physics / Gerhard Lutz. – 2nd printing of the 1st ed. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. – ISBN 978-3-540-71678-5.
6. Сиделев, А.В. Разработки АО «НИИП» в области детекторов ионизирующего излучения / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.
7. Romashka, M. Yu. Multiscale Modeling of Accumulation of Radiation Defects in Silicon Detectors Under Alpha Particle Irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Member, IEEE, Alexey V. Sidelev, and Dmitry Yu. Mokeev // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2016. – Vol. 63, № 4, P. 2029 – 2038.
8. Romashka, M. Yu. Multiscale modeling of accumulation of radiation defects in silicon detectors under alpha particle irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Alexey V. Sidelev, Dmitry Yu. Mokeev // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). – Moscow (Russia), 2015.
9. Леготин, С.А. Моделирование характеристик гамма-детекторов на основе кремниевых p-i-n-структур / С.А. Леготин, С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашев,

М.П. Коновалов, К.И. Таперо, А.В. Сиделев, Е.П. Сиделева, Н.С. Хрущев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2024. – Т. 27, № 3, С. 232 – 244.

10. Леготин, С.А. Архитектура монолитного матричного чувствительного элемента рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашев, М.П. Коновалов, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

11. Мурашев, В.Н. Структура и конструкция монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений / В.Н. Мурашев, К.И. Таперо, С.А. Леготин, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

12. Леготин, С.А. Определение оптимальных параметров ячейки матричного чувствительного элемента детектора рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

13. Кремниевые детекторы альфа-излучения ПДПА-1К. – Ядерно-физическая аппаратура. – Дубна. :ИФТП. – https://iftp.ru/images/docs/product_rus.pdf?ysclid=mbjd6ndue325471069

14. Акимов, Ю.К. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К. Акимов, О.В. Игнатьев, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 344 с. – ISBN 5-283-02944-1.

15. Кольцов, Г.И. Исследование спектральных характеристик детекторов ядерных излучений на GaAs, полученном методом хлоридной эпитаксии / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.– 2010.– № 3.– С. 66 - 71.

16. Кольцов, Г.И. VPE GaAs как материал для детекторов излучений / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Тезисы докладов НКРК-2010. Том II. – М.: ИК РАН, 2010. – С. 314-315.

17. Кольцов, Г.И. Детекторы быстрых нейтронов на основе GaAs структур / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, С.В. Черных, А.В. Черных, А.В. Сиделев, Г.И. Бритвич, А.П. Чубенко // Вестник ИКСИ. Серия «с». – 2012. – Вып. № 9. – С. 79-90. Инв. № 19648. (закрытый перечень ВАК).

18. Koltsov, G.I. Ion Implanted GaAs Detectors for Registration of Heavy Charged Particles and γ -quanta / G.I. Koltsov, S.I. Didenko, A.V. Chernykh, S.V. Chernykh, A.V. Sidelev // 18th International Conference on Ion Implantation Technology. Program and Abstracts. Kyoto, Japan, 2010. – P1-50.

19. Ayzenshtat, G. GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors / G. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Vol. 487, № 1 – 2, P. 96 – 101.

20. Tyazhev, A. GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1mm / A. Tyazhev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 509, № 1, P. 34—39.

21. Брацук, А.В. Изменение параметров бета-вольтаических полупроводниковых преобразователей на основе наноструктурированного диоксида титана при воздействии ионизирующего излучения космического пространства / А.В. Брацук, А.В. Сиделев, Д.С. Киселёв, С.Ю. Ковтун, Е.Н. Фёдоров, А.А. Урусов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2024. – № 1 (272). – С. 31-39.

22. Зуев, А.С. Оценка дефектообразования и ионизационных эффектов в полупроводниковом преобразователе бета-вольтаического источника питания при работе в космическом пространстве / А.С. Зуев, Р.Г. Усеинов, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции

«Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

23. Черных, А.В. Выбор контакта Шоттки к VPE-GaAs для создания поверхностно-барьерных детекторов ядерного излучения / А.В. Черных, С.В. Черных, С.И. Диденко, А.В. Сиделев, Г.И. Кольцов. // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 291-295.

24. Диденко, С.И. Исследование радиационной чувствительности полевых транзисторов с барьером Шоттки / С.И. Диденко, М.П. Коновалов, А.А. Дорофеев, А.В. Сиделев, Н.Б. Гладышева // Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 245-247.

25. Диденко, С.И. Создание детекторов ядерного излучения на основе полупроводниковых соединений АЗВ5 для регистрации слабозаимодействующих частиц и квантов / А.В. Сиделев, С.И. Диденко, Г.И. Кольцов, М.П. Коновалов, Ю.В. Осипов, А.В. Черных, С.В. Черных // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2009.– С. 239-241.

26. Сиделев, А.В. Исследование рабочих характеристик детекторов ядерных излучений на VPE GaAs / А.В. Сиделев, А.В. Черных, С.В. Черных // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С. 131-133.

27. Ciarlo, D.R. Metal-Oxide-Semiconductor X-Ray Detectors / D.R. Ciarlo et al.// IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1972. – Vol. 19, № 1, P. 350 – 355.

28. Holmes-Siedle, A. The Space-Charge Dosimeter: General Principles of a New Method of Radiation Detection / A. Holmes-Siedle // Nucl. Instr. & Methods. – 1974. Vol. 121, P.169 – 179.

29. Adams, L. The Development of an MOS Dosimetry Unit for Use in Space / L. Adams, A. Holmes-Siedle // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1978. – Vol. 25, № 6, P. 1607 – 1612.

30. Fraass, R. G. Use of a Metal-Nitride-Oxide-Semiconductor as the Detector for a Radiation Dosimeter / R.G. Fraass, R.W. Tallon // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1978. – Vol. 25, № 6, P. 1613 – 1618.

31. Dawes, W. R. An IC compatible ionizing radiation detector / W.R. Dawes, J.R. Schwank // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1981. – Vol. 28, № 6, P. 4152 – 4155.

32. Ito, T. Experimental evaluation of the GE NM/CT 870 CZT clinical SPECT system equipped with WEHR and MEHRS collimator / Toshimune Ito, Yohji Matsusaka, Masahisa Onoguchi, Hajime Ichikawa, Koichi Okuda, Takayuki Shibutani, Masaaki Shishido, Kozo Sato // Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2021. – Vol. 22, № 2, P. 165 – 177.

33. Santarelli, M. F. CZT Detectors-Based SPECT Imaging: How Detector and Collimator Arrangement Can Determine the Overall Performance of the Tomograph / Maria Filomena Santarelli et al. // Electronics. – 2021. – Vol. 10, № 18, 2230.

34. Jacob, G. A tissue equivalent semiconductor detector for in-vivo dosimetry / G. Jacob, G. Forcinal, J. Meuleman // Nuclear Instruments and Methods. – 1972. – Vol. 101, № 1, P. 51 – 54.

35. Rosenfeld, A.B. Miniature semiconductor detectors for in vivo dosimetry / A. B. Rosenfeld, D. Cutajar, M. L. F. Lerch, G Takacs, I. M. Cornelius, M Yudelev, M Zaider // Radiation protection dosimetry. – 2006. – Vol. 120, № 1 – 4, P. 48 – 55.

36. Poonam, Y. MOSFET dosimeter characterization in MR-guided radiation therapy (MRgRT) Linac / Radiation measurements / Yadav Poonam et al./ Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2019. – Vol. 21, № 1, P. 127–135.

37. Iniewski, K. CZT sensors for Computed Tomography: from crystal growth to image quality / K. Iniewski // Journal of Instrumentation. – 2016. –Vol. 11, № 12.

38. Ayzenshtat, G. Charge collection in X-ray pixel detectors based on semiinsulating GaAs doped with Cr / G. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2002. – Vol. 494, № 1, P. 210 – 213.

39. Черняев, А. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А. Черняев. – М.: Физматлит, 2004.

40. Cherpak, A. Mosfet detectors in quality assurance of tomotherapy treatments / Amanda Cherpak et al. // *Radiotherapy and Oncology*. – 2008. – Vol. 86, № 2, P. 242 – 250.

41. Butson, M.J. A new radiotherapy surface dose detector: the MOSFET / M.J. Butson, A. Rozenfeld, J.N. Mathur, M. Carolan, T.P. Wong, P.E. Metcalfe // *Medical Physics*. – 1996. – Vol. 23, № 5, P. 655–658.

42. Bloemen-van Gulp, E. Clinical dosimetry with MOSFET dosimeters to determine the dose along the field junction in a split beam technique / E. Bloemen-van Gulp, W. du Bois, P. Visser, I. Bruinvis, D. Jalink, J. Hermans, P. Lambin // *Radiotherapy and Oncology*. – 2003. – Vol. 67, № 3, P. 351–357.

43. Kron, T. Measurements in radiotherapy beams using on-line MOSFET detectors / T. Kron, A. Rosenfeld, M. Lerch, S. Bazley // *Radiation Protection Dosimetry* – 2002. – Vol. 101, № 1 – 4, P. 445 – 448.

44. Rosenfeld, A. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities / A. Rosenfeld // *Radiation Protection Dosimetry* – 2002. – Vol. 101, № 1 – 4, P. 393 – 398.

45. Dybek, M. MOSFET detectors as a tool for the verification of therapeutic doses of electron beams in radiotherapy / M. Dybek, W. Lobodziec, A. Kawa-Iwanicka, T. Iwanicki // *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*. – 2005. – Vol. 10, № 6. P. 301 – 306.

46. MacKay, G. F. Applications of MOSFET dosimeters on MIR and BION satellites / G.F. MacKay, I. Thomson, A. Ng, N. Sultan // *IEEE Transaction on Nuclear Science*. – 1997. – Vol. 44, № 6, P. 2048 – 2051.

47. Bradley, P. D. Charge collection and radiation hardness of a SOI microdosimeter for medical and space applications / P.D. Bradley, A.B. Rosenfeld, K.K. Lee, D.N. Jamieson, G. Heiser, S. Satoh // *IEEE Transaction on Nuclear Science*. – 1998. – Vol. 45, № 6, P. 2700 – 2710.

48. Schwank, J. R. A dose rate independent pMOS dosimeter for space applications / J.R. Schwank, S.B. Roeske, D.E. Beutler, D.J. Moreno, M.R. Shaneyfelt // IEEE Transaction on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, № 6, P. 2671 – 2678.

49. Емельянов, В.В. Гибридная микросхема для мониторинга дозовых и температурных нагрузок при эксплуатации электронного оборудования на борту космических аппаратов / В.В. Емельянов, К.И. Таперо, О.В. Мещуров, И.Ю. Калинин, В.Н. Улимов, Ю.А. Афанасьев, В.П. Яромской // Вопросы Атомной Науки и Техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2003. – Вып. 4, С. 81 – 84.

50. Мещуров, О.В. Полупроводниковые детекторы дозы ионизирующего излучения на основе МНОП-структур / О.В. Мещуров, В.В. Емельянов, К.И. Таперо, В.Н. Улимов, Ю.А. Афанасьев, С.А. Романов // Вопросы Атомной Науки и Техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 3, С. 30 – 34.

51. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider / ATLAS Collaboration // Journal of Instrumentation. – 2008. – 3 S08003.

52. Болдырев, А. Трековый детектор переходного излучения ATLAS / А. Болдырев и др. // Приборы и Техника Эксперимента. – 2012. Вып. 3, 27.

53. Unno, Y. Novel P-stop Structure in the N-side of Silicon Microstrip Detector / Y. Unno et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Vol. 541, P. 40 – 46.

54. Shchemerov, I.V. Radiation effect on the polymer-based capacitive relative humidity sensors / I.V. Shchemerov, S.A. Legotin, P.B. Lagov, Y.S. Pavlov, K.I. Tapero, A.S. Petrov, A.V. Sidelev, V.S. Stolbunov, T.V. Kulevoy, M.E. Letovaltseva, V.N. Murashev, M.P. Konovalov, V.N. Kirilov // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, № 8, P. 2871 – 2876.

55. Быстрицкий, В.М. Применение метода меченых нейтронов для обнаружения алмазов в кимберлите / В.М. Быстрицкий, Ю.Н. Рогов,

М.Г. Сапожников, Г.М. Никитин // ЭКОНОМИКА ВОСТОКА РОССИИ. – 2018. – № 1 (9), С. 84 - 87.

56. Сиделев, А.В. Совершенствование конструкции альфа-детекторов для использования в газонаполненных трубках нейтронных генераторов / А.В. Сиделев // Сборник тезисов VII научно-технической конференции молодых ученых ВНИИА. – Москва (Россия), 2013.

57. Poch, W. The mosimeter - a new instrument for measuring radiation dose / W. Poch, A.G. Holmes-Siedle // RCA Eng. – 1970. – Vol. 16, P. 56 – 59.

58. Gregory, B.L. Radiation Effects on Semiconductor Devices / B.L. Gregory, C. W. Gwyn. // Proceedings of the IEEE. – 1974. – Vol. 62, № 9, P. 1264 – 1273.

59. Kliment, D.C. Architecture and Performance of Radiation-Hardened 64-Bit SOS/MNOS Memory / D. C. Kliment; R. S. Ronen; R. L. Nielsen; R. N. Seymour; M. R. Splinter // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1976. – Vol. 23, № 6, P. 1749 – 1755.

60. Sampaio, J.M. Dose measurements and simulations of the RADFETs response onboard the Alphasat CTTB experiments / J. M. Sampaio // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2020. – Vol. 67, № 9, P. 2028 – 2033.

61. Holmes-Siedle, A.G. RADFET dosimeters in the belt: The Van Allen Probes on day 365 / A. G. Holmes-Siedle et al. / IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2014. – Vol. 61, № 2, P. 948 – 954.

62. Type RFT300-CC10G1. REM low-fade silicon mosfet dosimeter. – REM Data Sheet – RFTDAT-CC10 - Rev W. – 2010.

63. Сёмкин, Н.Д. Устройства для контроля радиационной обстановки на космическом аппарате / Н. Д. Сёмкин и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14, № 1, С. 58 – 72.

64. Butson, M.J. Peripheral dose measurement with a MOSFET detector / Martin J. Butson, Tsang Cheung, Peter K.N. Yu. // Applied Radiation and Isotopes. – 2005. – Vol. 62, № 4, P. 631 – 634.

65. Hubert, N. RadFET dose monitor system for soleil / N. Hubert, F. Dohou, D. Pedeau. – 7th Int. Beam Instrumentation Conf IBIC2018, Shanghai (China), 2018. – ISBN: 978-3-95450-201-1.

66. Schwank, J.R. Total Dose Effects in MOS Devices / J.R. Schwank // IEEE NSREC Short Course Notes.– Phoenix (Arizon, USA), 2002. – P. III-1 – III-123.

67. Brucoli, M. Total ionizing dose monitoring for mixed field environments / Matteo Brucoli. – Electronics. Universite Montpellier, 2018. – HAL Id: tel-02155482, <https://theses.hal.science/tel-02155482v1>.

68. Jaksic, A. RADFET development and calibration / Aleksandar Jaksic // CNES/ESA Final Presentation Days ESTEC. – Noordwijk (The Netherlands), 2011.

69. Schwank, J.R. Radiation Effects in MOS Oxides / James R. Schwank et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Vol. 55, № 4, P. 1833 – 1853.

70. Pejovic, M.M. P-channel mosfet as a sensor and dosimeter of ionizing radiation / Milic M. Pejovic // Facta universitatis. Series: Electronics and Energetics. – 2016. – Vol. 29, № 4, P. 509 – 541.

71. Емельянов, В.В. Определение выхода заряда в диоксиде кремния при воздействии гамма-излучения с помощью МНОП-структуры / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 28-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2025» – Лыткарино (Россия), 2025.

72. Jaksic, A. Characterisation of Radiation Response of 400nm Implanted Gate Oxide RADFETs / Aleksandar Jaksic et al. // 2002 23rd International Conference on Microelectronics. Proceedings. – Nis (Yugoslavia), 2002.

73. Goncalves, P. Modeling the response of the ESAPMOS4 RADFETs for the ALPHASAT CTTB experiment / Patricia Goncalves et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2014. – Vol. 61, № 3, P. 1439 – 1443.

74. Lordi, R.J. MNOS-BORAM memory characteristics / R.J. Lodi, H.A.R. Wegener, M.B. Borovicka, B.B. Kosicki, T.A. Pogemiller, M.W. Eklund // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1976. – Vol. 11, № 5, P. 622 – 630.

75. Никашевич, С.С. Электронная структура нитрида кремния по данным *ab initio* квантово-химических расчетов и эксперимента / С.С. Никашевич, В.А. Гриценко, Р. Клаузер, С. Гво // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2010. – Т. 138, № 4, С. 745 – 753.

76. Nasyrov, K.A. Two-bands charge transport in silicon nitride due to phonon-assisted trap ionization / K. A. Nasyrov et al. // Journal of applied physics. – 2004. – Vol. 96, № 8, P. 4293 – 4296.

77. Гриценко, В.А. Электронная структура нитрида кремния / В.А. Гриценко // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, №5, С. 531 – 541.

78. Сиделев, А.В. Сравнение радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МОП и МНОП-транзисторов / А.В. Сиделев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 5 – 8.

79. Насыров, К.А. Перенос заряда в диэлектриках туннелированием между ловушками / К.А. Насыров, В.А. Гриценко // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 139, № 6, С. 1172 – 1181.

80. Shaneyfelt, M.R. Charge yield for cobalt-60 and 10-keV X-ray irradiations of MOS devices / M. R. Shaneyfelt, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1991. – Vol. 38, № 6, P. 1187 – 1194.

81. Емельянов, В.В. Повышение чувствительности детектора на основе МНОП-структуры с помощью оптимизации выхода заряда в SiO_2 / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2021». – Лыткарино (Россия), 2021.

82. Сиделев, А.В. Оценка предельной чувствительности детекторов ионизирующих излучений на основе МНОП-структур / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

83. Сиделев, А.В. Радиационная чувствительность детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов при различной полярности напряжения на затворе / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 23 – 27.

84. Емельянов, В.В. Радиационный отклик МНОП-структуры на воздействие стационарного гамма-излучения при различной полярности напряжения на затворе / В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

85. Zimin, P.A. Calibration and electric characterization of p-MNOS RADFETs at different dose rates and temperatures / P.A. Zimin, E.V. Mrozovskaya, P.A. Chubnov, V.S. Anashin, G.I. Zebrev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Vol. 940, P. 307 – 312.

86. Емельянов, В.В. Модель накопления радиационно-индуцированного заряда в детекторах поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МНОП-транзисторов / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 1, С. 24 – 31.

87. Емельянов, В.В. Модель накопления радиационно-индуцированных зарядов в затворной системе МНОП-транзистора / В.В. Емельянов, Е.П. Матюхина, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

88. Хорошков, В.С. Физико-технические аспекты дистанционной лучевой терапии: от рентгена к адронам : учебное пособие / В.С. Хорошков, Г.И. Кленов. – М.: Физический факультет им. М.В. Ломоносова, 2018. – 104 с.

89. Канаев, С.В. Лучевая терапия злокачественных опухолей головы и шеи / С.В. Канаев // Практическая онкология. – 2003. – Т.4, № 1, С. 15 – 24.

90. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С.М. Зи. – Кн. 2. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с., ил.

91. Boch, J. Temperature effect on geminate recombination / J. Boch, F. Saigne, L. Dusseau, R.D. Schrimpf // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89, № 4.

92. Johnston, A.H. Field Dependence of Charge Yield in Silicon Dioxide / A.H. Johnston; R.T. Swimm; D.O. Thorbourn; P.C. Adell; B.G. Rax // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2014. – Vol. 61, № 6, P. 2818 – 2825.

93. Сиделев, А.В. Оптимизационные расчеты конструкции затворной системы МДП-детекторов дозы типа МНОП / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, Е.П. Сиделева // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

94. Колосницын, Б.С. Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем: в 2 ч. Ч.2: Расчет и проектирование полевых транзисторов : учеб. пособие / Б.С. Колосницын, Н.В. Гапоненко. – Минск: БГУИР, 2012. – 96 с., ил.

95. Колосницын, Б.С. Полупроводниковые приборы микро- и наноэлектроники : учебное пособие / Б.С. Колосницын, А.А. Степанов. – Минск: БГУИР, 2018. – 196 с.: ил.

96. Baker, R.J. CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation / R. Jacob Baker. – 3rd ed. – Wiley - IEEE Press, 2010. – 1208 p.

97. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С.М. Зи. – Кн. 1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с., ил.

98. Петров, Б.К. Электрические параметры нано-МОП-транзисторов : учебное пособие для вузов / Б.К. Петров, В.В. Воробьев. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. – 61 с.

99. Ватуев, А.С. Технологические возможности АО «НИИП» для испытаний и исследований радиационной стойкости ЭКБ в бескорпусном исполнении.

Направления и перспективы развития / А.С. Ватуев, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

100. Ilic, S. Floating-Gate MOS Transistor with Dynamic Biasing as a Radiation Sensor / Stefan Ilic, Aleksandar Jevtic, Srboljub Stankovic and Goran Ristic // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 11.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Модель накопления радиационно-индуцированного заряда в детекторах поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МНОП-транзисторов / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 1, С. 24 – 31.

2. Сравнение радиационной чувствительности детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МОП- и МНОП-транзисторов / А.В. Сиделев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 5 – 8.

3. Радиационная чувствительность детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов при различной полярности напряжения на затворе / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – Выпуск 2, С. 23 – 27.

4. Моделирование характеристик гамма-детекторов на основе кремниевых р-і-п-структур / С.А. Леготин, С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашев, М.П. Коновалов, К.И. Таперо, А.В. Сиделев, Е.П. Сиделева, Н.С. Хрущев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2024. – Т. 27, № 3, С. 232 – 244.

5. Изменение параметров бета-вольтаических полупроводниковых преобразователей на основе наноструктурированного диоксида титана при воздействии ионизирующего излучения космического пространства / А.В. Брацук, А.В. Сиделев, Д.С. Киселёв, С.Ю. Ковтун, Е.Н. Фёдоров, А.А. Урусов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2024. – № 1 (272). – С. 31-39.

6. Детекторы быстрых нейтронов на основе GaAs структур / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, С.В. Черных, А.В. Черных, А.В. Сиделев, Г.И. Бритвич, А.П. Чубенко // Вестник ИКСИ. Серия «с». – 2012. – Вып. № 9. – С. 79-90. Инв. № 19648. (закрытый перечень ВАК).

7. Исследование спектральных характеристик детекторов ядерных излучений на GaAs, полученном методом хлоридной эпитаксии / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2010. – № 3. – С. 66 - 71.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science

8. Radiation effect on the polymer-based capacitive relative humidity sensors / I.V. Shchemerov, S.A. Legotin, P.B. Lagov, Y.S. Pavlov, K.I. Tapero, A.S. Petrov, A.V. Sidelev, V.S. Stolbunov, T.V. Kulevoy, M.E. Letovaltseva, V.N. Murashev, M.P. Konovalov, V.N. Kirilov // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, № 8, P. 2871 – 2876.

9. Multiscale Modeling of Accumulation of Radiation Defects in Silicon Detectors Under Alpha Particle Irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Member, IEEE, Alexey V. Sidelev, and Dmitry Yu. Mokeev // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2016. – Vol. 63, № 4, P. 2029 – 2038.

Материалы российских и международных конференций

10. Определение выхода заряда в диоксиде кремния при воздействии гамма-излучения с помощью МНОП-структуры / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 28-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2025» – Лыткарино (Россия), 2025.

11. Оптимизационные расчеты конструкции затворной системы МДП-детекторов дозы типа МНОП / А.В. Сиделев, В.В. Емельянов, Е.П. Сиделева // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции

«Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

12. Модель накопления радиационно-индуцированных зарядов в затворной системе МНОП-транзистора / В.В. Емельянов, Е.П. Матюхина, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

13. Радиационный отклик МНОП-структуры на воздействие стационарного гамма-излучения при различной полярности напряжения на затворе / В.В. Емельянов, А.Е. Нестеренко, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

14. Оценка предельной чувствительности детекторов ионизирующих излучений на основе МНОП-структур / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

15. Повышение чувствительности детектора на основе МНОП-структуры с помощью оптимизации выхода заряда в SiO_2 / В.В. Емельянов, А.В. Сиделев, А.Е. Нестеренко // Тезисы докладов 24-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2021». – Лыткарино (Россия), 2021.

16. Архитектура монолитного матричного чувствительного элемента рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашев, М.П. Коновалов, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

17. Технологические возможности АО «НИИП» для испытаний и исследований радиационной стойкости ЭКБ в бескорпусном исполнении. Направления и перспективы развития / А.С. Ватуев, А.В. Сиделев // Тезисы

докладов 27-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2024». – Лыткарино (Россия), 2024.

18. Разработки АО «НИИП» в области детекторов ионизирующего излучения / А.В. Сиделев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

19. Определение оптимальных параметров ячейки матричного чувствительного элемента детектора рентгеновского излучения / С.А. Леготин, А.В. Сиделев, С.Ю. Юрчук, Н.С. Хрущев // Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2023». – Лыткарино (Россия), 2023.

20. Оценка дефектообразования и ионизационных эффектов в полупроводниковом преобразователе бета-вольтаического источника питания при работе в космическом пространстве / А.С. Зуев, Р.Г. Усеинов, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

21. Структура и конструкция монолитного матричного чувствительного элемента для квантовых координатных детекторов ионизирующих излучений / В.Н. Мурашев, К.И. Таперо, С.А. Леготин, А.В. Сиделев // Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «Стойкость-2022». – Лыткарино (Россия), 2022.

22. Multiscale modeling of accumulation of radiation defects in silicon detectors under alpha particle irradiation / Mikhail Yu. Romashka, Alexey V. Yanilkin, Alexander I. Titov, Dmitry V. Gusin, Alexey V. Sidelev, Dmitry Yu. Mokeev // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). – Moscow (Russia), 2015.

23. Совершенствование конструкции альфа-детекторов для использования в газонаполненных трубках нейтронных генераторов / А.В. Сиделев // Сборник

тезисов VII научно-технической конференции молодых ученых ВНИИА. – Москва (Россия), 2013.

24. Ion Implanted GaAs Detectors for Registration of Heavy Charged Particles and γ -quanta / G.I. Koltsov, S.I. Didenko, A.V. Chernykh, S.V. Chernykh, A.V. Sidelev // 18th International Conference on Ion Implantation Technology. Program and Abstracts. Kyoto, Japan, 2010. – P1-50.

25. VPE GaAs как материал для детекторов излучений / Г.И. Кольцов, С.И. Диденко, А.В. Черных, С.В. Черных, А.В. Сиделев // Тезисы докладов НКРК-2010. Том II. – М.: ИК РАН, 2010. – С. 314-315.

26. Выбор контакта Шоттки к VPE-GaAs для создания поверхностно-барьерных детекторов ядерного излучения / А.В. Черных, С.В. Черных, С.И. Диденко, А.В. Сиделев, Г.И. Кольцов. // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 291-295.

27. Исследование радиационной чувствительности полевых транзисторов с барьером Шоттки / С.И. Диденко, М.П. Коновалов, А.А. Дорофеев, А.В. Сиделев, Н.Б. Гладышева // Материалы III международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2010.– С. 245-247.

28. Создание детекторов ядерного излучения на основе полупроводниковых соединений АЗВ5 для регистрации слабозаимодействующих частиц и квантов / А.В. Сиделев, С.И. Диденко, Г.И. Кольцов, М.П. Коновалов, Ю.В. Осипов, А.В. Черных, С.В. Черных // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы международной научно-технической конференции– Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2009.– С. 239-241.

29. Исследование рабочих характеристик детекторов ядерных излучений на VPE GaAs / А.В. Сиделев, А.В. Черных, С.В. Черных // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С. 131-133.

Приложение 1

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НИИП»

А.П. Ланшин

«03» июня 2025 г.

АКТ

внедрения результатов диссертации Сиделева Алексея Владимировича «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

Комиссия в составе:

председатель: Заместитель генерального директора по науке и инновациям, д.т.н., К.И. Таперо

члены комиссии:

- Заместитель генерального директора по качеству – главный метролог, Д.К. Котов,

- Начальник управления радиационных испытаний – испытательного центра, к.т.н., П.В. Рубанов,

составили настоящий акт о внедрении результатов диссертации Сиделева Алексея Владимировича.

Диссертация А.В. Сиделева выполнена на базе Управления научных исследований и инновационных разработок Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборов» (АО «НИИП»).

А.В. Сиделев руководил и принимал непосредственное участие в разработке детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов в рамках НИОКР Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом» (ЕОТП ВНЕ-506) и ряде других НИОКР, направленных на разработку, исследование и применение полупроводниковых детекторов и микроэлектронных устройств. Принимал активное участие в определении направлений исследований, обосновании и реализации технических,

технологических и управленческих решений по основным проблемам разработки, а также применению разработки в АО «НИИП».

Наиболее важными практическими результатами диссертации А.В. Сиделева являются:

- разработанные и изготовленные детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов для широкого спектра применений;

- разработанная физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда, в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора, позволяющая прогнозировать радиационный отклик детекторов, при использовании данного транзистора в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения;

- полученные результаты комплексного исследования влияния конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на характеристики детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов.

Разработанные и изготовленные детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов внедрены в АО «НИИП» в практику радиационных испытаний ЭКБ космического назначения и использовались при проведении испытаний изделий ЭКБ и конструкционных материалов, предназначенных для применения в бортовой аппаратуре экспериментального космического аппарата «СКИФ-Д» в рамках выполнения СЧ ОКР «Проведение испытаний на радиационную стойкость образцов ФП и защитного стекла К-208» и проведения испытаний на радиационную стойкость БС КА «Марафон» в рамках выполнения СЧ ОКР «Разработка космического аппарата глобальной низкоорбитальной многоспутниковой системы передачи данных «Марафон IoT». Использование разработанных детекторов при внедрении позволяет снизить затраты на радиационные испытания, повысить точность измерения поглощенной дозы и достоверность получаемых результатов.

Автором опубликовано 9 научных работ, сделано 20 докладов на российских и международных научно-технических конференциях по теме диссертации.

Председатель комиссии

К.И. Таперо

Члены комиссии

Д.К. Котов

П.В. Рубанов

Приложение 2

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)»



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертации Сиделева Алексей Владимировича «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе r-канальных МНОП-транзисторов»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертации А.В. Сиделева «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе r-канальных МНОП-транзисторов» на соискание ученой степени кандидата технических наук были внедрены в учебный процесс НИТУ МИСИС при разработке учебно-методического комплекса по дисциплине «Основы надёжности элементной базы электроники в условиях ионизирующего излучения космического пространства» по направлению подготовки магистров 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», а также при разработке рабочей программы дисциплины «Основы радиационной стойкости приборов и изделий электронной техники» по направлению подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

Внедрение результатов диссертации в учебный процесс НИТУ МИСИС способствует повышению качества подготовки студентов.

Заведующий кафедрой полупроводниковой электроники и физики полупроводников,
к.ф.-м.н., доцент

С.И. Диденко

Приложение 3

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ ИМ. Н.Л. ДУХОВА»
(ФГУП «ВНИИА»)**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного
конструктора

В.В. Карушев

«16» 07 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Сиделева Алексея Владимировича на тему
«Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с
чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов»
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертации А.В. Сиделева на тему «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» на соискание ученой степени кандидата технических наук были внедрены в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Л.Н. Духова» (ФГУП «ВНИИА им. Л.Н. Духова») и использованы при исследованиях стойкости к воздействию специальных факторов перспективных элементов, материалов и изделий ЭКБ, проводившихся в рамках НИР «Стойка-А» и НИР «Инструкция-А-Связь».

Внедрение результатов диссертации А.В. Сиделева в процесс выполнения научных исследований и разработок в ФГУП «ВНИИА им. Л.Н. Духова» способствует повышению информативности и достоверности получаемых результатов, сокращению сроков выполнения исследований за счет снижения времени на обработку результатов дозиметрического сопровождения облучений, снижению затрат на привлечение внешней экспериментальной базы при проведении исследований.

Начальник отделения 007

Начальник НИО-241



В.И. Бутин

А.А. Малышев

Приложение 4

Акционерное общество
«Российская корпорация ракетно-космического
приборостроения и информационных систем»



Авиакотельная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, с. Москва, 111250
тел: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.spacecorp.ru, contact@spacecorp.ru
ОКПО11477389 ОГРН1097746649681 ИНН7722698789 КПП774550001

№ РКС _____

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора
АО «Российские космические системы»,
К.Т.Н., доцент



Handwritten signature of V.B. Steshenko

В.Б. Стешенко

2025 г.

АКТ

внедрения результатов диссертации Сиделева Алексея Владимировича
«Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с
чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

Наиболее значимыми практическими результатами диссертации
А.В. Сиделева являются:

- разработка и изготовление двух типов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с высокой радиационной чувствительностью и широким диапазоном измеряемых доз с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов;
- разработка и изготовление дозиметров, работающих с детекторами поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов, для широкого спектра применений;
- определение оптимальные сочетаний конструктивно-технологических параметров и электрических режимов работы детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами

на основе р-канальных МНОП-транзисторов в зависимости от требований и условий применения.

Результаты диссертационной работы Сиделева Алексея Владимировича были внедрены в НИР «Сопровождение-20»(2). «Научно-техническое сопровождение разработки и создания радиоэлектронной продукции в обеспечение импортозамещения изделий электронной компонентной базы иностранного производства для применения в ракетно-космической технике». Внедрение результатов диссертации позволило повысить точность измерения поглощенной дозы при проведении радиационных испытаний, что в целом помогло повысить достоверность получаемых результатов и улучшить качество разрабатываемых АО «Российские космические системы» изделий.

Начальник отдела радиационной стойкости,
д.т.н., доцент



П.Б. Лагов

Приложение 5

УТВЕРЖДАЮ

Ректор
ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», д.т.н.

М.В. Драпалюк

« 11 » июля 2025 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс

результатов диссертации Сиделева Алексея Владимировича «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

В ходе написания диссертации автором были выполнены следующие разработки и исследования:

- исследованы физические основы создания и разработаны в рамках единой конструктивно-технологической концепции новые детекторы поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для широкого спектра применений;

- разработана физическая модель накопления радиационно-индуцированного заряда, в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ, позволяющая прогнозировать радиационный отклик детекторов, при использовании данного транзистора в качестве ЧЭ детектора поглощенной дозы ИИ;

- разработан оригинальный схмотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ;

- исследована возможность создания и разработан технологический маршрут изготовления р-канальных МНОП-транзисторов в рамках единой конструктивно-технологической концепции для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с требуемыми характеристиками;

- впервые систематически изучено влияние конструктивно-технологических параметров и условий эксплуатации на характеристики детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ для широкого спектра применений.

Они положены в основу создания обучающих программно-технических комплексов, которые используются в учебном процессе для проведения лекций, выполнения лабораторных работ, курсового и дипломного проектирования по дисциплинам «Инструментальные средства информационных систем», «Программирование на языке VHDL и проектирование микроэлектронных устройств», «Алгоритмы проектирования микроэлектронных устройств», а также проведения научно-исследовательских работ аспирантами, докторантами и соискателями.

Кроме того они использовались в ОКР «Разработка и изготовление полнофункциональных полноразмерных образцов детекторов ионизирующего излучения на основе МДП-транзисторов с затворной системой MNOS и SONOS», которую выполнял ВГЛТУ.

Внедрение результатов диссертации А.В. Сиделева способствует повышению качества проведения НИР и обучения студентов.

Директор
института цифровых и
интеллектуальных систем ВГЛТУ



В.К.Зольников