

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

### Актуальность темы диссертации

Детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов нашли свое применение в различных областях науки и техники: ядерная медицина (*in vivo* дозиметрия при проведении сеансов лучевой терапии), космическое приборостроение, радиационные испытания и другие научные и производственные сферы. В качестве чувствительных элементов таких детекторов возможно использовать серийные МОП- и МНОП-транзисторы, но они будут обладать не самыми лучшими характеристиками. Для того чтобы получить высокую радиационную чувствительность или широкий диапазон измеряемых доз, для каждой конкретной задачи требуется разработка МДП-транзисторов, использующихся в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы. **Актуальность** данной работы заключается в решении важной **научно-технической задачи**, которая заключалась в разработке детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для широкого спектра условий применения в рамках единой конструктивно-технологической концепции.

### Общая характеристика диссертации

**Во введении** обоснована актуальность работы, представлены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** посвящена обзору полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений. В данной главе рассмотрен принцип работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МОП-транзистора, а также приведены особенности работы детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительным элементом на основе МНОП-транзистора и его преимущества. Приведены характеристики детекторов с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов 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.

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. В соответствии с которой автор решил следующие **задачи**:

- определил требования к характеристикам детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе МДП-транзисторов для различных применений;
- разработал физическую модель накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-МНОПТ;
- провел расчет конструкции слоев подзатворного диэлектрика, состоящего из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ , для получения требуемых характеристик детекторов;
- разработал топологию р-МНОПТ для использования в качестве чувствительного элемента детектора;
- разработал технологию изготовления р-МНОПТ;
- исследовал радиационную чувствительность изготовленных детекторов;
- исследовал радиационную чувствительность детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ в зависимости от напряжения на затворе при облучении;
- разработал схемотехнический метод увеличения радиационной чувствительности детектора поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ.

**Вторая глава** посвящена выбору конструкции МНОП-транзистора для использования в качестве чувствительного элемента детектора поглощенной дозы ионизирующего излучения и разработке физической модели накопления радиационно-индуцированного заряда в подзатворных диэлектриках р-канального МНОП-транзистора и расчету радиационных характеристик детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов.

Расчеты показали, что радиационную чувствительность детектора более 70 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ), вплоть до 246 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ), 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, не превышая напряжение питания минус 40 В, при этом минимальная регистрируемая доза составит 0,04 Гр( $\text{SiO}_2$ ), а максимальная 390 Гр( $\text{SiO}_2$ ). Диапазон регистрируемых доз от 5 до  $10^3$  Гр( $\text{SiO}_2$ ), вплоть до 3500 Гр( $\text{SiO}_2$ ), 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( $\text{SiO}_2$ ).

**Третья глава** посвящена разработке и изготовлению р-канальных МНОП-транзисторов для использования в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения и, соответственно, самих детекторов. Измеренные электрические характеристики изготовленных р-канальных МНОП-транзисторов хорошо согласуются с результатами расчетов и приборно-технологическим моделированием.

**Четвертая глава** посвящена исследованию радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз детекторов с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов.

Радиационная чувствительность и диапазон измеряемых доз разработанных и изготовленных детекторов поглощенной дозы ИИ с ЧЭ на основе р-МНОПТ соответствуют требуемым характеристикам для заданных условий применения и режимов эксплуатации. Была получена радиационная чувствительность более 70 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ), вплоть до от 577 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ), и максимальный диапазон измеряемых доз составил от 4,8 до  $4 \cdot 10^3$  Гр( $\text{SiO}_2$ ).

**Пятая глава** посвящена применению изготовленных детекторов совместно с разработанными дозиметрами в *in vivo* дозиметрии, радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, дозиметрии на объектах использования атомной энергии, дозиметрии при проведении радиационных испытаний и персональной дозиметрии для регистрации «аварийных» доз персонала.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

Полный объем диссертации составляет 186 страниц, содержит 77 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 100 наименований.

**В автореферате диссертации** изложены все основные результаты работы, и он полностью соответствует содержанию диссертации.

### Научная новизна

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  $\text{SiO}_2$ .

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  $\text{SiO}_2$  и критическому увеличению напряженности электрического поля в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

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  $\text{SiO}_2$ , а затем снижается вследствие достижения предельно допустимой напряженности электрического поля в  $\text{SiO}_2$  и(или) в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

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  $\text{SiO}_2 / \text{Si}$ .

## Основные результаты

К основным результатам диссертации можно отнести:

1. Физическую модель, позволяющую прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов.

2. Разработанную топологию и маршрут изготовления р-канальных МНОП-транзисторов, используемых в качестве чувствительных элементов детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения.

3. Созданные в рамках единой конструктивно-технологической концепции детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-МНОПТ для применения в различных областях науки и техники.

4. Достигнутые требуемые радиационные характеристики на изготовленных детекторах поглощенной дозы с высокой чувствительностью более 70 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ), имеющих диапазон измеряемых доз от 0,2 до 100 Гр( $\text{SiO}_2$ ), и с низкой чувствительностью не менее 1 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ) с диапазоном измеряемых доз от 5 до  $10^3$  Гр( $\text{SiO}_2$ ).

5. Практическое применение 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.

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.

## Достоверность результатов исследования

Достоверность результатов исследования подтверждается корректностью применяемых для расчета формул, справочных величин и электрических схем измерения, а также представленных расчетных и экспериментальных данных.

## Теоретическая значимость

Теоретическая значимость диссертации в первую очередь заключается в разработанной физической модели, позволяющей прогнозировать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе р-канальных МНОП-транзисторов, которая дополняет уже имеющиеся знания о влиянии ионизирующего излучения на МНОП-транзисторы. Полученные автором зависимости радиационной

чувствительности детекторов от напряжения на затворе и дозовая зависимость напряжения затвор-исток р-канального МНОП-транзистора при постоянном токе стока, объяснены с точки зрения происходящих в чувствительном элементе физических процессов.

### **Ценность данной работы для практики**

Данная диссертационная работа содержит не только научную новизну, но и практическую значимость, заключающуюся в том, что были созданы новые детекторы поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов с характеристиками, превосходящими аналоги по радиационной чувствительности, максимальное значение которой составило 577 мВ/Гр( $\text{SiO}_2$ ). Разработанная физическая модель накопления заряда в подзатворных диэлектриках р-канальных МНОП-транзисторов позволяет заранее оценивать радиационную чувствительность и диапазон измеряемых доз детекторов и выбирать толщины  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$  до начала изготовления чувствительных элементов.

Практическая ценность работы подтверждается актами внедрения, полученными от промышленных предприятий и высших учебных заведений, которые использовали результаты диссертации при выполнении НИР и ОКР, а также в учебных процессах при подготовке студентов.

### **Замечания по диссертации**

1. На рисунке 20 представлен узкий экспериментальный набор дозы, всего до 6 крад.

2. При проведении измерений радиационной чувствительности и диапазона измеряемых доз не указана температура в ходе эксперимента, влияющая на значение выхода заряда.

3. В таблице 23 (глава 4) указаны верхние границы диапазонов измеряемых доз, разработанных детекторов, при этом ни одного графика, демонстрирующего данные значения не представлено.

4. На рисунке 68 в главе 4 представлены теоретические зависимости абсолютного значения 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. Экспериментальные результаты выглядели бы предпочтительнее.

Данные замечания нельзя отнести к критичным и на общую положительную оценку диссертации они не влияют.

### **Заключение**

Диссертация Сиделева А.В. «Разработка детекторов поглощенной дозы ионизирующего излучения с чувствительными элементами на основе р-канальных МНОП-транзисторов» является научной работой с обоснованной

актуальностью, обоснованной научной новизной, выраженной практической значимостью и полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Сиделев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент,  
д.ф.-м.н., доцент



Зольников Константин Владимирович

05.12.2025г.

### Сведения об оппоненте

Ученая степень: доктор физико-математических наук по специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий инженер-конструктор дизайн-центра проектирования ИМС

Организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники»

Адрес: 394033, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д.5

Телефон: +7(473) 226-20-35

Адрес электронной почты: kvzolnikoff@yandex.ru

Сайт: <https://niiet.ru/>

Подпись Зольникова Константина Владимировича заверяю:

Директор по работе с персоналом

