

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 537.9

Рощенко  
Полина Сергеевна

Полупроводниковые микростриповые детекторы и  
сенсорные системы на их основе

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации  
на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 «Микро- и наноэлектроника»

Научный руководитель:  
ст. преподаватель каф. МНЭ  
И. Ю. Ловшенко

Минск 2022

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории 4.4 «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Ловшенко Иван Юрьевич,**

старший преподаватель кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Прищепа Сергей Леонидович,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «27» января 2022 года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: [kafme@bsuir.by](mailto:kafme@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Резервы развития нынешней и будущей микроэлектроники кроются в разработке и использовании в системах компьютерного проектирования физических моделей технологии и приборов, обеспечивающих точность и, следовательно, надежность компьютерного проектирования интегральных микросхем с характерными размерами вплоть до атомарного уровня.

Обеспечение работоспособности интегральных схем в условиях воздействия ядерного излучения естественного и искусственного происхождения становится все более актуальной проблемой вследствие расширения области применения микроэлектронной техники в промышленных, военных и космических объектах.

В зависимости от типа и характеристик падающего излучения и «поражения» в устройстве могут возникать различные эффекты: обратимые и необратимые; начиная от сбоя в цифровых и аналоговых схемах, увеличения энергопотребления и снижения скорости работы прибора, до полной потери функциональности в самых тяжёлых случаях.

При исследовании в физике высоких энергий применяется большое количество методов регистрации частиц, ни один из которых не является универсальным. Для выбора метода необходимо учитывать такие критерии, как практическая реализуемость, точность и ограничения применения. Полупроводниковые микростриповые детекторы обеспечивают наилучшую точность определения координаты частицы в детектирующих системах, способны работать в сильных магнитных полях и в достаточно жёстких радиационных условиях.

Таким образом, определение радиационной стойкости полупроводниковых приборов и интегральных схем является одним из важных элементов задачи обеспечения надежности и безотказности работы в целом.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы магистерской диссертации.* Актуальность темы заключается в определении зависимости эксплуатационных характеристик кремниевых микростриповых детекторов от конструктивно-технологических параметров, а также разработке электрических (компактных) моделей детекторов, учитывающих физические процессы, происходящие в приборных структурах с учетом влияния радиационных внешних воздействующих факторов, и позволяющие прогнозировать поведение интегральных микросхем обработки данных. Данная особенность приведет к существенному сокращению сроков разработки новых изделий микроэлектроники

специального назначения и позволит провести модернизацию (повысить эксплуатационные характеристики) уже существующих приборных и схемотехнических решений.

### ***Степень разработанности проблемы.***

Влиянию проникающей радиации на материалы электронной техники, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в настоящее время в научно-техническом мире уделяется достаточно большое внимание, поскольку наличие ядерного излучения может представлять значительную угрозу для правильной работы электронных устройств. Как правило, исследования по данной тематике ведутся по трем основным направлениям:

- физика взаимодействия ионизирующего излучения с твердым телом;
- применение проникающей радиации в технологии микро- и наноэлектроники;
- исследование деградации полупроводниковых приборов и микросхем при их эксплуатации в условиях воздействия проникающей радиации.

В настоящее время проектированием микростриповых детекторов занимается ряд исследовательских центров: односторонний детектор компании «*Hamamatsu*» (Япония), двухсторонние детекторы компаний «*Micron Semiconductor*» (Англия) и *IRST*, «*Divisione Microsistemi*» (Италия).

***Цель и задачи исследования.*** Целью магистерской диссертации является определение посредством компьютерного моделирования оптимальных конструктивных и технологических параметров приборных структур кремниевых микростриповых детекторов, обеспечивающих их эффективное функционирование с учетом влияния радиационных внешних воздействующих факторов и интеграцию в состав систем обработки данных.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- посредством компьютерного моделирования провести настройку методов и моделей, описывающих технологический маршрут изготовления и физические процессы, протекающие в приборных структурах кремниевых микростриповых детекторов;
- разработать типовой технологический маршрут формирования приборных структур одно- и двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов с проектными нормами 1,5 мкм и провести его компьютерное моделирование;
- исследовать эксплуатационные характеристики приборных структур одно- и двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов, сформированных по технологическому процессу с проектными нормами 1,5 мкм;
- определить режимы технологических операций процесса изготовления и геометрические параметры конструкции кремниевых микростриповых

детекторов, обеспечивающие улучшение эксплуатационных характеристик с учетом особенностей их функционирования при радиационном воздействии;

– разработать и реализовать на языке описания аппаратуры *Verilog-A*, обеспечивающем интеграцию в программные продукты схемотехнического моделирования, компактную модель приборной структуры одностороннего кремниевого микрострипового детектора, учитывающую изменение эксплуатационных характеристик в результате воздействия тяжелых заряженных частиц.

**Объект и предмет исследования.** В качестве объекта исследования выступают три различные структуры кремниевых микростриповых детекторов с проектными нормами 1,5 мкм. Предметом исследования является взаимосвязь физических процессов, происходящих в приборных структурах кремниевых микростриповых детекторов при воздействии ядерного излучения.

**Теоретическая и методологическая основа исследования** В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных специалистов в области микро- и нанoeлектроники и физики.

**Научная новизна.** Научная новизна магистерской диссертации заключается в комплексном описании (разработке соответствующих подходов для проведения компьютерного моделирования) зависимости эксплуатационных характеристик при совместном влиянии различных радиационных внешних воздействующих факторов на приборные структуры кремниевых микростриповых детекторов.

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

Обобщенная электрическая модель, реализованная на языке описания аппаратуры *Verilog-A*, предназначенная для математического описания статических и динамических характеристик одностороннего кремниевого микрострипового детектора, сформированного по технологическому процессу с проектными нормами 1,5 мкм, отличающаяся учетом типа тяжелых заряженных частиц (азота  $^{15}\text{N}^{+4}$ , железа  $^{56}\text{Fe}^{+15}$ , ксенона  $^{131}\text{Xe}^{+35}$ ), траекторией пролета частицы (от  $\lambda = 0^\circ$  до  $\lambda = 15^\circ$  с шагом  $5^\circ$ ) и температуры (от  $T = 123$  К до  $T = 373$  К), и обеспечивающая возможности схемотехнического моделирования данного типа устройств в программных комплексах проектирования интегральных микросхем.

**Научно-практическая значимость.** Научно-практическая значимость результатов диссертации заключается в получении новых результатов в области проектирования одно- и двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов с проектными нормами 1,5 мкм с повышенными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающих возможность замены газонаполненных координатных детекторов в экспериментах физики высоких энергий и физики космических лучей, а также верификации физико-

математических моделей, предназначенных для описания процессов, происходящих в исследуемых приборных структурах при влиянии радиационных внешних воздействующих факторов, и моделей кремниевых микростриповых детекторов, обеспечивающих возможность прогнозирования поведения систем обработки данных в условиях влияния данных факторов.

**Личный вклад соискателя.** В настоящую диссертационную работу вошли результаты как личных исследований автора, так и его совместной деятельности с научным руководителем Ловшенко И. Ю.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях: 56-ая научно-техническая конференция магистрантов, аспирантов и студентов (2020, Минск); 30-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2020, Севастополь); XII Международная научно-технической конференция Медэлектроника – 2020; 31-ая Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2021, Севастополь).

**Публикации результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в сборниках материалов: 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов; 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2020, Севастополь); XII Международной научно-технической конференции Медэлектроника – 2020; Semiconductor Science and Technology (2020); 31-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2021, Севастополь).

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из общей характеристики работы, введения, шести глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем магистерской диссертации – 73 страницы. Работа содержит 44 иллюстрации, 9 таблиц, библиографический список из 54 наименований, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние разработки приборных структур полупроводниковых микростриповых детекторов с учетом влияния радиационных внешних воздействующих факторов, позволяющих прогнозировать поведение интегральных микросхем обработки данных; определены основные направления исследований; дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными исследованиями, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объем диссертации.

В первой главе рассматриваются виды и источники радиационных внешних воздействующих факторов, принцип работы полупроводниковых микроstriповых детекторов и их конструктивные решения, а также информация о сенсорной системе преобразования сигналов с полупроводниковых микроstriповых детекторов.

Во второй главе описаны системы автоматизированного проектирования в микроэлектронике, используемые при работе над магистерской диссертацией.

В третьей главе представлены результаты приборно-технологического моделирования трех различных структур кремниевого микроstriпового детектора с проектными нормами 1,5 мкм.

В четвертой главе приведены эксплуатационные характеристики одно- и двухсторонних кремниевых микроstriповых детекторов с учётом воздействия на приборную структуру тяжелых заряженных частиц.

В пятой главе представлена оптимизация эксплуатационных характеристик кремниевого микроstriпового детектора.

Шестая глава – разработка и интеграция в программный продукт компании *Cadence* моделей приборных структур кремниевых микроstriповых детекторов, учитывающих воздействие тяжелых заряженных частиц на эксплуатационные характеристики.

В приложениях приведены отчет проверки магистерской диссертации на заимствования в системе «Антиплагиат» и полупроводниковый координатный детектор ионизирующего излучения (патент РФ 2306633).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения цели магистерской диссертации, был проведён анализ и изучение научно-технической литературы, связанной, непосредственно, с полупроводниковыми микроstriповыми детекторами. Были изучены основные параметры и характеристики полупроводниковых микроstriповых детекторов, их преимущества и разновидности приборных структур.

Проведён выбор и настройка моделей переноса носителей заряда, обеспечивающих адекватное моделирование электрических характеристик кремниевых микроstriповых детекторов. Проведено приборно-технологическое моделирование трех приборных структур кремниевых

микростриповых детекторов в программном комплексе компании *Silvaco*; приведены основные этапы технологических маршрутов создания структур, с проектными нормами 1,5 мкм. Установлено, что при номинальных режимах технологических операций и конструктивных параметров, значение напряжения пробоя для полученной структуры одностороннего кремниевого микрострипового детектора составляет 700 В, а для двухстороннего кремниевого микрострипового детектора – 630 В.

Также проведено моделирование эксплуатационных характеристик кремниевых микростриповых детекторов с учётом воздействия тяжелых заряженных частиц. Показаны временные зависимости тока через стриповые контакты для трёх частиц при вариации угла падения тяжелых заряженных частиц на приборную структуру и температуры окружающей среды.

Для повышения эксплуатационных характеристик одностороннего кремниевого микрострипового детектора проведён отсеивающий эксперимент по методу Плакетта-Бермана с использованием матрицы Адамара. В качестве входных факторов использовались 10 параметров, которые могли влиять на характеристики структуры. После проведения эксперимента были выделены 3 основных фактора, оказывающих наибольшее влияние на временное разрешение. Проведённые оптимизационные расчёты по этим параметрам позволили уменьшить временное разрешение детектора на 11,77% от номинального значения.

Разработана на языке описания аппаратуры *Verilog-A* электрическая модель кремниевого микрострипового детектора, задающая ток стриповых контактов, с дополнительным блоком определения поправочных коэффициентов параметров наиболее подверженных изменениям при воздействии тяжелых заряженных частиц. Такой блок реализован для частицы азота  $^{15}\text{N}^{+4}$ .

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[А.-1] Рощенко, П. С. Полупроводниковый детектор ядерного излучения / П. С. Рощенко // 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов : сб. тез. док. / Минск : БГУИР, 2020. – С. 92–93.

[А.-2] Рощенко, П. С. Полупроводниковый детектор ядерного излучения / П. С. Рощенко, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Слемпицкий, В. Т. Шандарович // Материалы 30-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь : СГУ. – 2020. – с. 342.

[А.-3] Рощенко, П. С. Оптимизация конструктивных параметров и режимов технологических операций формирования приборных структур кремниевых микростриповых детекторов / П. С. Рощенко, И. Ю. Ловшенко, В.

Р. Стемпицкий // Медэлектроника – 2020. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XII Международной научно-технической конференции. - Минск : БГУИР, 2020. – С.145-151.

[A.-4] Computer simulation of the operational characteristics of a microstrip silicon detector / I. Lovshenko, P. Roshchenko, V. Shandarovich, V. Stempitsky, Tuan Trung Tran, Ha Dao // Semiconductor Science and Technology. – 2020. – Vol. 36. –N 9. – P. 6.

[A.-5] Рощенко, П. С. Двухсторонний кремниевый микростриповый детектор тяжелых заряженных частиц / П. С. Рощенко, И. Ю. Ловшенко // Материалы 31-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь : СГУ. – 2021. – с. 325.

[A.-6] The proton flux influence on electrical characteristics of a dual-channel HEMT based on GaAs / I. Lovshenko, A. Voronov, P. Roshchenko, R. Ternov, V. Stempitsky // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021 : тез. докл. XIX Междунар. симпозиума (Республика Беларусь, Минск, 28-29 октября 2021 года). – Минск: БГУИР, 2021. – С. 66 - 68.

[A.-7] The proton flux influence on electrical characteristics of a dual-channel HEMT based on GaAs / I.Yu. Lovshenko, A.Yu. Voronov, P.S. Roshchenko, R.E. Ternov, Y.D. Galkin, A.V. Kunts, V.R. Stempitsky, J. Bi // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 8. – С. 81-86.