

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ОБЪЕДИНЕНИЕ «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»

Объект авторского права

УДК [621.382.232/.323+621.383.523]:539.16.04

**ОГОРОДНИКОВ**

**Дмитрий Александрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ  
В КРЕМНИЕВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУРАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Минск 2024

Научная работа выполнена в Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению».

Научный руководитель	<b>Ластовский Станислав Брониславович</b> , кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отраслевой лаборатории радиационных воздействий Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»
Официальные оппоненты:	<b>Гременок Валерий Феликсович</b> , доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики полупроводников Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» <b>Просолович Владислав Савельевич</b> , кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников Белорусского государственного университета
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится «21» ноября 2024 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» по адресу: 220072, Беларусь, Минск ул. Петруся Бровки, д. 19, пом. 5. Тел. +375 (17) 378-11-68 (ученый секретарь совета), e-mail: [ifttpanb@physics.by](mailto:ifttpanb@physics.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан «19» октября 2024 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук

Д. В. Карпинский

## ВВЕДЕНИЕ

Воздействие проникающей радиации в настоящее время необходимо учитывать в различных областях науки и техники. Длительные полеты космических аппаратов, работа оборудования в радиационных полях ядерных установок (атомные электростанции, подводные и надводные корабли с ядерными реакторами), необходимость контроля и управления современной измерительной техникой предъявляют серьезные требования к радиоэлектронной аппаратуре, используемой на указанных объектах. Наиболее уязвимыми составляющими аппаратуры к воздействию проникающей радиации являются изделия полупроводниковой электроники, без которых немислимо создание современных радиоэлектронных средств обеспечения работоспособности указанной техники. Поэтому вопросы, связанные с воздействием радиации на полупроводниковые приборы, являются весьма актуальными.

Применение технологии «кремний на изоляторе» перспективно для производства интегральных МОП-схем с повышенной радиационной стойкостью, особенно к импульсной радиации. Наличие диэлектрической изоляции и уменьшение размеров активных областей МОП/КНИ-транзисторов способствует снижению фототоков и позволяет избавиться от тиристорного эффекта при высоких интенсивностях ионизирующих излучений.

Кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ) предназначены для регистрации предельно слабого оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, ионизирующих излучений и единичных фотонов. Данный тип устройств используется в различных областях промышленности, научных исследованиях, медицинской технике, квантовой криптографии, приемниках детектирования ионизирующих частиц, ЛИДАРах, биофотонике и др. Применение SiФЭУ в условиях воздействия ионизирующих излучений повышенной интенсивности ведет к деградации их счетных характеристик. Степень радиационной деградации зависит от конструктивных особенностей приборов и электрического режима облучения.

Данная работа посвящена исследованию электрических характеристик МОП/КНИ-транзисторных структур, счетных триггеров, кремниевых фотоумножителей в зависимости от их конструктивно-технологических особенностей и электрических режимов облучения, а также изучению процессов радиационного дефектообразования в кристаллах кремния *p*-типа в условиях сильных электрических полей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа выполнена в Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» (ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению») в рамках научно-исследовательских работ по следующим темам: ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов» задание 1.3 «Дефектно-примесное взаимодействие и инжекционно-стимулированные реакции в кристаллах кремния, кремний-германиевых сплавах и приборных структурах на их основе» 2016–2020 гг. (№ г.р. 20160304 от 09.03.2016 г.); ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения» Задание 1.3.1 «Дефектно-примесная инженерия радиационно-индуцированных центров в кремниевых приборных структурах» 2021–2025 гг. (№ г.р. 20210549 от 07.04.2021 г.); проект Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № T23MЭ-024 «Влияние ионизирующих излучений на электрические характеристики кремниевых фотоумножителей» (№ г.р. 20230989 от 22.06.2023 г.).

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь: направлению – «Технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника» перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166); направлению – «Микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика» перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. №156).

### **Цель, задачи, объект и предметы исследования**

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании и численном моделировании влияния гамма-квантов  $Co^{60}$  и альфа-частиц на параметры кремниевых приборных структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**: определить влияние различных конструктивно-технологических особенностей и условий облучения на параметры кремниевых МОП/КНИ-структур и интегральных микросхем, а также кремниевых фотоэлектронных умножителей; методом численного моделирования рассчитать плотность накопленного заряда и напряженность электрического поля в диэлектрических слоях кремниевых МОП/КНИ-

структур и SiФЭУ при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах в результате воздействия ионизирующих излучений; исследовать влияние облучения альфа-частицами с энергией 5 МэВ на параметры SiФЭУ и кремниевых *p-n*-структур при различных электрических режимах облучения.

**Объект исследования** – МОП/КНИ-транзисторные структуры, интегральные микросхемы счетных триггеров, кремниевые фотоумножители и кремниевые *p-n*-структуры.

**Предмет исследования** – электрические характеристики объектов исследования в зависимости от их конструктивно-технологических особенностей и электрических режимов облучения, а также процессы радиационного дефектообразования в кристаллах кремния *p*-типа в условиях сильных электрических полей.

### **Научная новизна**

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Подача на подложку отрицательного смещения ( $-2,5$  В) позволяет на порядок повысить радиационную стойкость счетных триггеров на основе МОП/КНИ-структур по сравнению с режимом облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  без дополнительного смещения.

2. Темновой ток SiФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками экспоненциально увеличивается на четыре порядка в результате облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  дозой  $D = 1,0 \cdot 10^5$  рад в режиме лавинного пробоя у приборов с положительным потенциалом на электроде канавки и в 3–4 раза – у приборов с отрицательным потенциалом.

3. Радиационная деградация темнового тока SiФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками обусловлена скоростью накопления положительного заряда в диэлектрических слоях канавок под действием электрических полей, распределение которых зависит как от электрического режима облучения, так и от конструктивных особенностей образцов.

4. Скорость удаления дырок в области пространственного заряда кремниевых  $n^+p$ -структур, облучаемых под обратным смещением ( $-5 \dots -10$  В) альфа-частицами с энергией 5 МэВ, уменьшается по сравнению с нейтральной частью *p*-базы, что связано с высокой термической стабильностью собственных междоузельных атомов кремния в двукратно положительном зарядовом состоянии в материале *p*-типа и высокой подвижностью в положительном зарядовом состоянии.

5. Энергия активации эмиссии электронов из дважды положительно заряженного состояния собственных междоузельных атомов кремния равна  $E_c = 0,43$  эВ, а сечение захвата электронов  $\sigma_e = 1,2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Наиболее «жестким» электрическим режимом облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$   $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторов является режим, при котором на сток и исток подается напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В, что связано с эффективным накоплением положительного заряда на границе раздела кремний/захороненный окисел, величину которого удастся существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла транзисторных структур.

2. Темновой ток SiФЭУ с оптической изоляцией металлизированными канавками ячеек в виде диодных  $n^+p-p^+$ -структур экспоненциально увеличивается в результате облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  дозой  $D = 10^5$  рад в режиме лавинного пробоя на четыре порядка у приборов с положительным потенциалом на электроде канавки и в 3–4 раза – с отрицательным потенциалом в результате разной скорости накопления дырочного заряда в слоях окислов разделительных канавок под действием электрических полей.

3. Результаты численного моделирования распределения плотности накопленного заряда  $Q$  в диэлектрических слоях металлизированной разделительной канавки ячеек SiФЭУ в виде  $n^+p-p^+$ -структур, показывающие, что при облучении мягким рентгеновским излучением дозой  $10^5$  рад максимальные значения  $Q$  в слое  $\text{SiO}_2$  достигаются вблизи границы с областью  $p-p^+$ -перехода ячейки и возрастают по сравнению с пассивным режимом облучения в 5,9 раза при положительном потенциале на металле и в 2,5 раза при отрицательном.

4. В области пространственного заряда обратносмещенных кремниевых диодных  $n^+p-p^+$ -структур при облучении альфа-частицами с энергией 5,1 МэВ скорость удаления основных носителей заряда снижается до двух раз по сравнению с нейтральной частью  $p$ -базы, что связано с переходом из стабильного двукратно положительного зарядового состояния в нестабильное однократное основного компенсирующего радиационно-индуцированного дефекта междоузельного атома кремния.

## **Личный вклад соискателя ученой степени**

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены лично соискателем. Научный руководитель кандидат физико-математических наук С. Б. Ластовский сформулировал задачи и направления исследования, участвовал в обсуждении и представлении полученных результатов для печати. Доктор технических наук Ю. В. Богатырев, а также кандидаты физико-математических наук В. П. Маркевич и С. В. Шпаковский участвовали в обсуждении результатов, полученных экспериментально и при

численном моделировании. Результаты исследований других соавторов не включены в работу.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих Международных и Республиканских научных конференциях, форумах и тематических семинарах: международная конференция «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2021 г.); 14-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2021 г.); 6-я Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2021 г.); SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus» (Minsk, 2021), X международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2022 г.); Восьмой Белорусский космический конгресс (Минск, 2022 г.); XIX международная научная конференция «Молодежь в науке», (Минск, 2022 г.); Седьмая международная научно-практическая конференция. (Минск, 2023 г.); 15-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2023); Минск, X Международная научная конференция (Минск, 2023).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, отражены в 20 публикациях, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах (3,86 авторского листа) в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. В сборниках трудов и материалов конференций опубликовано 10 статей и 3 тезиса докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, 5 глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 128 страниц, включая 64 рисунка на 48 страницах текста, список использованных источников на 11 страницах, содержащий 116 наименований библиографического списка и 20 наименований публикаций соискателя, два приложения на четырех страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В главе 1 приведен обзор литературных источников по теме диссертационной работы. В ней кратко проанализированы работы,

посвященные исследованию особенностей МОП/КНИ-транзисторов, а также изменения их параметров при воздействии ионизирующих излучений. В МОП/КНИ-структурах возникает паразитный транзистор с каналом вблизи границы захороненного оксида. Под воздействием ионизирующего излучения на границе слоя Si/SiO<sub>2</sub> накапливается положительный заряд, который в *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторах снижает пороговое напряжение паразитного транзистора, что в конечном итоге ведет к увеличению тока утечки прибора.

Особое внимание уделено кремниевым фотоумножителям. Наиболее критическим радиационным эффектом в SiФЭУ, облученных протонами, нейтронами, электронами и гамма-квантами, является увеличение темнового счета – DCR (Dark Count Rate). DCR – это количество сигналов в единицу времени на выходе SiФЭУ в отсутствие световых сигналов на входе. Темновой счет определяется темновым током и связан с умножением носителей, которые генерируются в области пространственного заряда (ОПЗ) *p-n*-переходов ячеек в результате теплового возбуждения или туннельного эффекта.

Один из недостатков SiФЭУ – перекрестные оптические помехи. Для подавления этого эффекта ячейки оптически изолируют разделительными канавками, которые пассивируют слоем оксида. В условиях воздействия ионизирующих излучений наличие слоя SiO<sub>2</sub> также снижает счетные характеристики прибора.

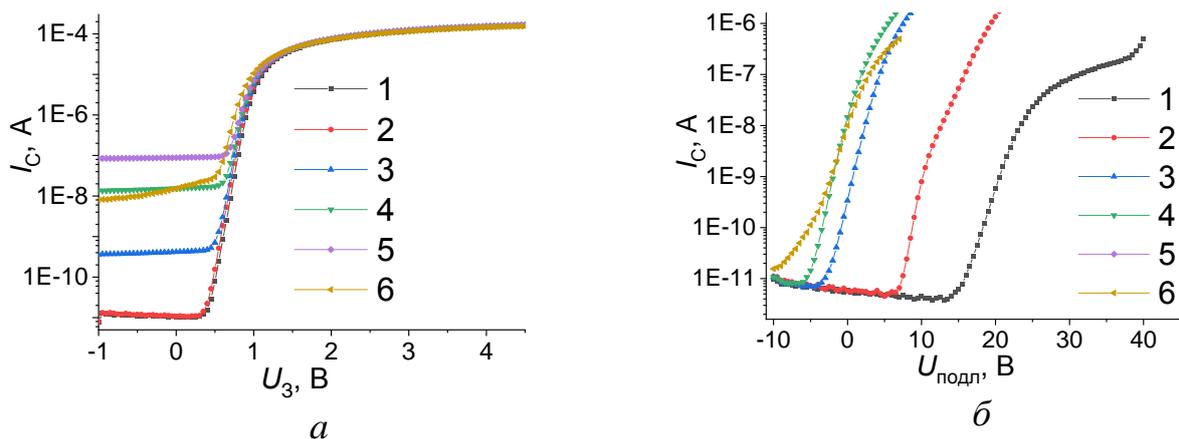
Образцы SiФЭУ с ячейками в виде *n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>*-структур в активном электрическом режиме облучаются под обратным смещением. В этой связи возникает вопрос влияния электрического поля на процессы радиационного дефектообразования в области пространственного заряда обратносмещенных диодных *n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>*-структур. На основании анализа результатов сделан вывод об актуальности задачи исследования поведения МОП/КНИ-транзисторов и кремниевых фотоумножителей в полях ионизирующих излучений.

В **главе 2** изложены особенности исследованных образцов МОП/КНИ-транзисторов, их структура, внешний вид, особенности запитки в разных проекциях, приведены детали электрических режимов облучения. Приведены внешний вид и структура счетных триггеров на МОП/КНИ-транзисторах, описаны электрические режимы облучения.

Описаны кремниевые фотоумножители, их внешний вид и структура, приведены конструктивные особенности, связанные с наличием оптической экранировки ячеек друг от друга металлизированными канавками. Приведены параметры кремниевых *n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>*-структур. Описана методика измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6, а также методики измерения вольт-фарадных характеристик и спектров DLTS барьерных структур. Приведены методики облучения исследуемых образцов гамма-квантами Co<sup>60</sup> и альфа-частицами.

В главе 3 приведены результаты исследования воздействия гамма-излучения на параметры транзисторных МОП/КНИ-структур и счетного триггера на их основе, а также результаты численного моделирования накопления заряда в облученных  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторах.

В разделе 3.1 установлено, что сток-затворные ВАХ рабочих транзисторов при облучении значительно изменились: существенно возросли токи утечек (рисунок 1, а). У паразитных транзисторов токи утечки изменились незначительно, но происходит большой сдвиг ВАХ (порогового напряжения) в сторону отрицательных напряжений (рисунок 1, б).

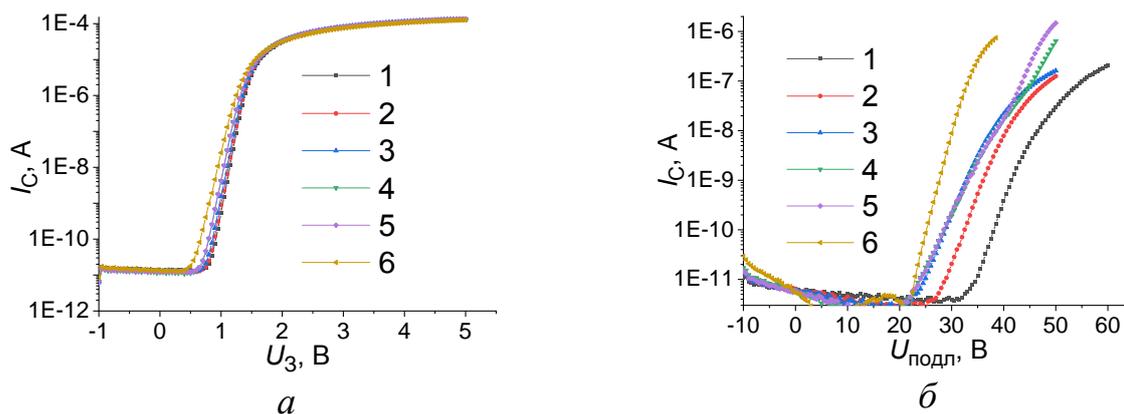


1 –  $D = 0$ ; 2 –  $1 \cdot 10^3$ ; 3 –  $2 \cdot 10^3$ ; 4 –  $4 \cdot 10^3$ ; 5 –  $5 \cdot 10^3$ ; 6 –  $1,2 \cdot 10^4$  Гр  
 Рисунок 1 – Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ( $d_{Si} = 0,2$  мкм;  $U_C = +5$  В;  $U_{подл} = 0$  В)

Наблюдается корреляция радиационных изменений ВАХ рабочего и паразитного транзисторов: токи утечки рабочего транзистора начинают резко возрастать, как только ВАХ паразитного транзистора сдвинется в область  $U_{подл} < 0$ .

На рисунке 2 показано влияние гамма-облучения на сток-затворные ВАХ рабочих и паразитных МОП/КНИ-транзисторов с более толстой пленкой кремния ( $d_{Si} = 0,3$  мкм,  $L = 0,6$  мкм), когда исток и сток не достигают границы с окислом, при отрицательном смещении подложки  $U_{подл} = -3$  В. Видно, что ВАХ рабочих транзисторов (токи утечки) изменились незначительно вплоть до максимальной дозы  $D = 1,2 \cdot 10^4$  Гр (рисунок 2, а), что обусловлено относительно небольшим сдвигом ВАХ паразитного транзистора только в области  $U_{подл} > 0$  (рисунок 2, б).

Полученные результаты объясняются повышенным выходом дырочного заряда в электрическом поле в окисле у границы раздела кремний/окисел. В случае с более толстой пленкой кремния отрицательное смещение подложки эффективно подавляет поле стока и истока в заглубленном окисле. Дырки оттягиваются к подложке и не накапливаются на границе с пленкой кремния.



1 –  $D = 0$ ; 2 –  $1 \cdot 10^3$ ; 3 –  $2 \cdot 10^3$ ; 4 –  $4 \cdot 10^3$ ; 5 –  $5 \cdot 10^3$ ; 6 –  $1,2 \cdot 10^4$  Гр  
**Рисунок 2 – Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ( $d_{Si} = 0,3$  мкм,  $U_C = +5$  В;  $U_{подл} = -3$  В)**

Таким образом, в результате воздействия гамма-излучения  $Co^{60}$  при напряжении на стоке и истоке +5 В происходит значительное изменение ВАХ  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторов с толщиной пленки кремния  $d_{Si} = 0,2$  мкм (увеличение токов утечки на несколько порядков). Более высокую радиационную стойкость (до  $D = 1,2 \cdot 10^4$  Гр) показали МОП/КНИ-транзисторы с  $d_{Si} = 0,3$  мкм. При этом при отрицательном смещении подложки  $U_{подл} = -3$  В величина сдвига порогового напряжения паразитного транзистора еще дополнительно снижается на 10–15 В с ростом длины канала от 0,6 до 1,2 мкм или с уменьшением ширины канала от 10 до 1,4 мкм.

В разделе 3.2 установлено, что форма выходных сигналов исследуемого счетного триггера (амплитуда и скважность) практически не изменилась после гамма-облучения  $Co^{60}$  дозой  $D = 6$  Мрад как в режиме холодного резерва, так и в ждущем и нормальном режимах при  $D = 3$  Мрад.

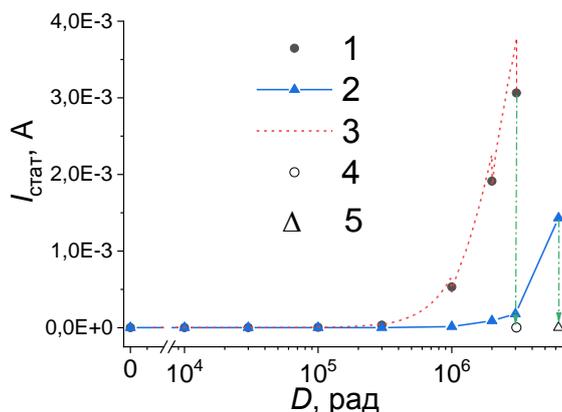
Статический ток потребления  $I_{стат}$  (рисунок 3) максимально увеличился в ждущем режиме с  $0,9 \cdot 10^{-6}$  до  $3,1 \cdot 10^{-3}$  А при  $D = 3$  Мрад, а динамический ток потребления при той же дозе – с 4,0 до 6,8 мА в нормальном режиме.

В режиме холодного резерва (полное обесточивание СБИС) микросхема оказывается работоспособной после облучения дозой до 6 Мрад. Этот факт может быть использован для конструирования аппаратуры, длительно работающей в условиях интенсивного облучения.

После выдержки при +125 °С в течение 24 ч в обесточенном состоянии все параметры образцов счетных триггеров, облученных в различных режимах, практически восстановились до исходных значений. Более медленное восстановление (релаксация) параметров облученных триггеров также наблюдается и при комнатной температуре.

Показано, что причиной увеличения токов потребления микросхем КНИ с накоплением дозы ионизирующего излучения является рост токов утечки паразитных придонных  $n$ -канальных транзисторов. Режим облучения счетных триггеров с дополнительным отрицательным смещением на

подложке позволяет повысить их радиационную стойкость более чем в десять раз по сравнению с режимом облучения без дополнительного смещения.



1 и 3 – ждущий режим; 2 – режим холодного резерва; 4 и 5 – после отжига при  $+125\text{ }^\circ\text{C}$ , 24 ч

Рисунок 3 – Дозовые зависимости статического тока потребления, измеренного в процессе облучения (3) и после отдельных доз (1 и 2)

Таким образом, все статические и динамические параметры, а также функционирование счетного триггера в составе микросхемы КНИ остаются в норме при накопленных дозах гамма-излучения до 3 Мрад (в ждущем и нормальном режимах при наличии отрицательного смещения на подложке) и до 6 Мрад (в режиме холодного резерва).

В разделе 3.3 с помощью программного комплекса «Silvaco» были проведены расчеты накопления встроенного в окисел заряда у границы раздела кремний/скрытый окисел в тестовых  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторах при разных геометрических параметрах и электрических режимах в ходе облучения. Показано, что наиболее «жестким» является режим TG (рисунок 4), при котором во время облучения на сток и исток подается напряжение  $+5\text{ В}$ , а на подложку, затвор и запитку канала –  $0\text{ В}$ .

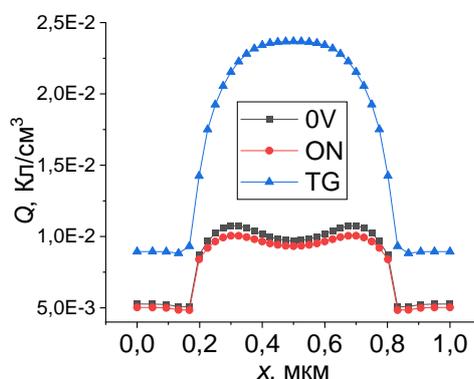


Рисунок 4 – Распределение заряда после облучения в разных режимах

При этом величину накопленного заряда удастся существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла транзисторных структур. Также определенное влияние

на стойкость оказывает изменение толщины пленки активного кремния и длины канала. Причем зависимости изменения величины накопленного заряда  $Q$  от варьирования длины канала имеют немонотонный вид и не оказывают столь значительного влияния на радиационную стойкость, как уменьшение толщины слоя скрытого окисла.

Результаты выполненного численного моделирования согласуются с экспериментальными результатами изменения параметров  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторов при облучении в зависимости от их геометрических размеров и электрического режима.

Полученные результаты численного моделирования могут быть использованы испытателями электронных компонентов для предварительной оценки стойкости МОП/КНИ-приборов к накопленной дозе ионизирующего излучения. Эти результаты также являются полезными для разработчиков радиационно-стойких МОП-интегральных схем на основе КНИ-структур.

В главе 4 представлены результаты исследования влияния гамма-квантов  $Co^{60}$  на обратную вольт-амперную характеристику кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) с 1004 ячейками, представляющими собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$  заполнялись вольфрамом.

В разделе 4.1 исследовались SiФЭУ двух вариантов конструктивного исполнения. В первом варианте (ВІ) вывод металла канавки электрически соединялся через гасящий поликремниевый резистор с  $n^+$ -областью ячейки, во втором (ВІІ) – с  $p^+$ -областью. Напряжение пробоя исследуемых SiФЭУ составляло  $U_{проб} = 34 \pm 1,0$  В. Образцы облучались в режиме лавинного пробоя при значениях перенапряжения  $\Delta U_{обр} = 1-5$  В (активный электрический режим) и при обратном смещении  $U_{обр} = 0$  В (пассивный режим).

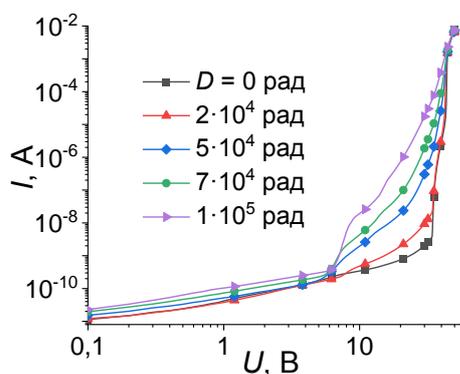
С ростом поглощенной дозы  $D$  основные изменения обратной ВАХ образцов SiФЭУ (ВІ) наблюдаются в предпробойной области при обратных смещениях 8–34 В, соответствующей полному обеднению  $p$ -области  $n^+p-p^+$ -ячеек (рисунок 5).

При  $D = 1 \cdot 10^5$  рад темновой ток при  $U_{обр} = 30$  В возрос по сравнению с необлученным образцом в  $10^4$  раз. Установлено, что при всех значениях  $\Delta U_{обр}$  зависимость темнового тока от  $D$  при  $U_{обр} = 30$  В можно аппроксимировать выражением

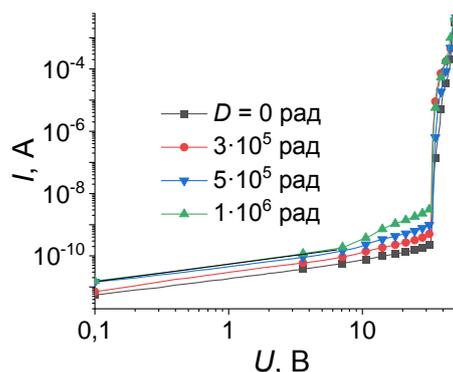
$$I = I_0 \exp(k \cdot D),$$

где  $I_0 = 2,0$  нА,  $k = 9,47 \cdot 10^{-5}$  рад $^{-1}$ .

С ростом поглощенной дозы темновой ток SiФЭУ (ВІІ) монотонно увеличивается (рисунке 6). После поглощенной дозы  $D = 1 \cdot 10^6$  рад его значение при  $U_{обр} = 30$  В возросло в 15–16 раз.



**Рисунок 5 – Обратные вольт-амперные характеристики образцов SiФЭУ (VI) до и после облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  при значениях обратного смещения  $U_{\text{обр}} = 37,2 \text{ В}$**



**Рисунок 6 – Обратные вольт-амперные характеристики образцов SiФЭУ (VII) до и после облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  при значениях обратного смещения  $U_{\text{обр}} = 38,4 \text{ В}$**

В пассивном режиме облучения конструктивные особенности исследуемых образцов не влияют на характер дозовых зависимостей темновых токов. Для SiФЭУ (VI) и (VII) значение темнового тока при  $U_{\text{обр}} = 30 \text{ В}$  увеличивается в 6–7 раз при  $D = 1 \cdot 10^6 \text{ рад}$ .

Увеличение лавинного тока при  $D = 10^6 \text{ рад}$  составило 1,5–2 раза для всех образцов в пассивном режиме облучения и SiФЭУ (VII) в активном режиме. Для SiФЭУ (VI) в активном режиме облучения значение лавинного тока с ростом  $D$  на начальном этапе облучения уменьшается на 20–25 %, а потом монотонно увеличивается.

Наличие границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в фотоактивной части каждой ячейки SiФЭУ с разделительными металлизированными канавками может быть основным фактором радиационной деградации приборов из-за накопления поверхностного заряда при воздействии ионизирующих излучений. Скорость накопления поверхностного заряда увеличивается при наличии электрических полей в слоях диэлектриков.

В разделе 4.2 в программном комплексе «Silvasco» рассмотрено изменение распределения плотности накопленного заряда  $Q$  и напряженности электрического поля  $E$  в окисле металлизированных разделительных канавок ячеек кремниевых фотоэлектронных умножителей в результате облучения мягким рентгеновским излучением с энергией квантов 10 кэВ дозой  $10^5 \text{ рад}$ . Ячейки представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -кремниевые структуры (рисунок 7). Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоем  $\text{SiO}_2$  заполнялись металлом. Облучению подвергались два различных варианта структур: в первом (VI) металл канавки соединялся с  $n^+$ -областью ячейки, во втором (VII) – с  $p^+$ -областью. Облучение SiФЭУ проводилось в активном электрическом режиме (при обратном электрическом смещении  $U_{\text{обр}} = -30 \text{ В}$ ) и в пассивном режиме ( $U_{\text{обр}} = 0$ ).

Показано, что максимальные значения плотности накопленного заряда и напряженности электрического поля в слое  $\text{SiO}_2$  достигаются вблизи границы с областью  $p$ - $p^+$ -перехода ячейки и зависят как от электрического режима облучения, так и от структуры SiФЭУ (рисунок 8).

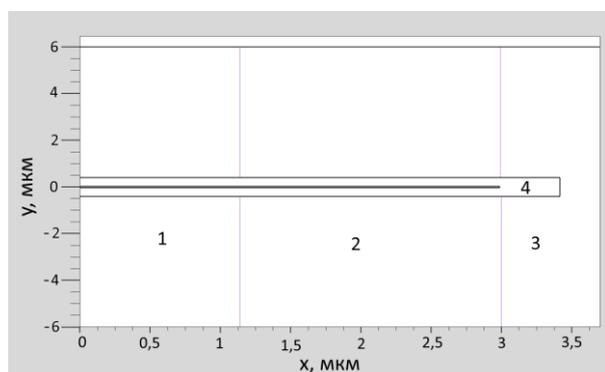


Рисунок 7 – Двумерная модель двух ячеек SiФЭУ с разделительной канавкой между ними

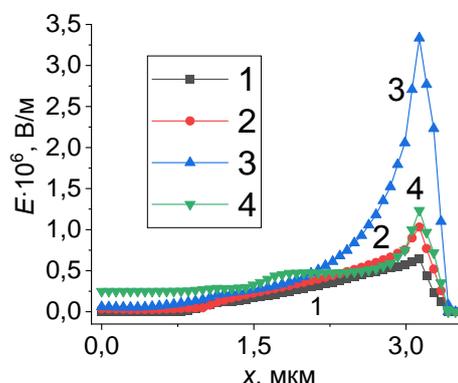


Рисунок 8 – Зависимости  $E(x)$  в окисле канавки ( $Y = 0,005$  мкм) для SiФЭУ до (кривая 1) и после (2–4) облучения рентгеновскими квантами в различных электрических режимах: 2 – пассивный, 3 – активный для SiФЭУ (VI), 4 – активный для (VII)

При пассивном режиме облучения значение  $Q$  не зависит от того, с какой областью активной ячейки соединена канавка прибора. При облучении SiФЭУ (VI) при  $U_{\text{обр}} = -30$  В максимальное значение  $Q$  увеличивается по сравнению с пассивным режимом в 5,9 раза, а второго варианта в 2,5 раза. Максимальное значение  $E$  в слоях  $\text{SiO}_2$  возрастает в результате облучения SiФЭУ в пассивном электрическом режиме в 1,4 раза и в активном в 4,4 и 1,6 раза для первого и второго вариантов структур соответственно.

Полученный результат объясняется усилением выхода дырочного заряда под действием соответствующим образом распределенных электрических полей в слоях окислов разделительных канавок ячеек SiФЭУ, облучаемых под обратным смещением.

В разделе 4.3 проводится обсуждение экспериментальных данных, приведенных в разделе 4.1. Согласно результатам моделирования, накопленный в объеме диэлектрика положительный заряд  $Q_{\text{ок}}$  усиливает напряженность электрического поля вблизи границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>. Максимальное значение  $Q_{\text{ок}}$  для SiФЭУ (VI) достигается в области слоя SiO<sub>2</sub>, граничащей с  $p$ - $p^+$ -переходом. В данном месте облученных  $n^+$ - $p$ - $p^+$ -диодных структур при измерении ВАХ возможно образование инверсного слоя электронной проводимости. В соответствии с зависимостью  $Q_{\text{ок}}(D)$  меняется положение квазиуровня Ферми для электронов  $E_{Fn}$  в запрещенной зоне кремния на границе с SiO<sub>2</sub>. Значение обратного тока определяется

концентрацией электронов в инверсном слое, которая экспоненциально зависит от величины  $E_{Fn}-E_i$ , где значение  $E_i$  соответствует середине запрещенной зоны кремния. Поэтому в эксперименте наблюдаются экспоненциальные зависимости темнового тока при  $U_{обр} = 30$  В от  $D$ .

В главе 5 представлены результаты исследования особенности влияния облучения альфа-частицами с энергией 5 МэВ на обратные (темновые) ВАХ SiФЭУ (VI), изготовленных в таком же конструктивном исполнении, что и в разделе 4.1. Вывод металла разделительной канавки был электрически соединен с  $n^+$ -областью. Образцы облучались в режиме лавинного пробоя и в пассивном электрическом режиме. Установлено, что наибольшие изменения обратной ВАХ наблюдаются у SiФЭУ, облучаемых в режиме лавинного пробоя. Показано, что обратный ток утечки возрастает на четыре порядка при флюенсе альфа-частиц  $\Phi = 2,2 \cdot 10^{10}$  см $^{-2}$ , а последующее дополнительное облучение в пассивном режиме снижает его до значений, близких к исходным.

Полученные результаты также объясняются влиянием на обратную ВАХ накапливаемых в процессе облучения зарядов в диэлектрических слоях (SiO $_2$  и Si $_3$ N $_4$ ) разделительных канавок и поверхностных состояний на границах раздела этих слоев с  $p$ -Si активных ячеек.

В разделе 5.2 исследовалось влияние облучения альфа-частицами на характеристики диодных  $n^+p-p^+$ -структур, изготовленных на эпитаксиальном  $p$ -Si (КДБ-18). Облучение проводилось в режимах обратных смещений ( $U_{см} = -5 \dots -10$  В), а также без смещения при температуре 290 К. На основании анализа вольт-фарадных зависимостей рассмотрено изменение распределения концентрации дырок  $p(x)$  в базовых  $p$ -областях структур в результате облучения (рисунок 9).

Установлено, что на зависимостях  $p(x)$   $n^+p-p^+$ -структур, облучаемых под обратным смещением, возникает участок немонотонности, обусловленный уменьшением скорости удаления дырок в области пространственного заряда по сравнению с нейтральной частью  $p$ -базы. Участок немонотонности исчезает после инъекции неосновных носителей заряда в базовую  $p$ -область.

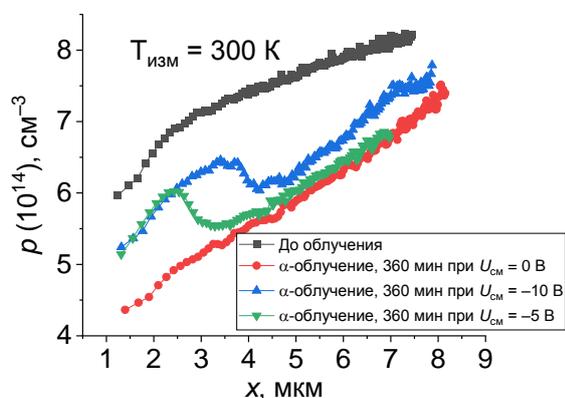
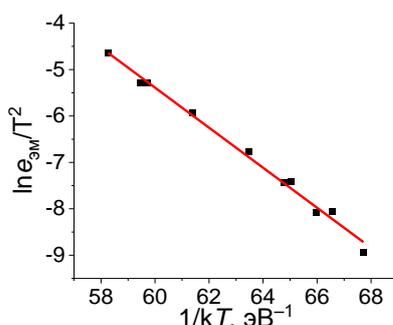


Рисунок 9 – Профили распределения дырок в диодах до облучения и после облучения в различных режимах

Методом *DLTS*-спектроскопии определены энергии активации эмиссии дырок и электронов с глубоких уровней ловушек, вводимых в процессе облучения в *p*-область. Полученные значения энергии активации эмиссии дырок с глубоких уровней удалось соотнести с донорными уровнями дивакансии ( $V_2$ ) и тривакансии ( $V_3$ ) ( $E_v + 0,19$  эВ), междоузельного атома углерода ( $C_i$ ) ( $E_v + 0,29$  эВ), комплексов, состоящих из междоузельных атомов углерода и кислорода в двух конфигурациях ( $C_iO_i$  и  $C_iO_i^*$ ) ( $E_v + 0,365$  эВ), а также междоузельных атомов бора и кислорода ( $B_iO_i$ ) ( $E_c - 0,23$  эВ). Показано, что различие в скорости удаления дырок в ОПЗ и нейтральной части *p*-базы в процессе облучения связано с особенностями свойств собственных междоузельных атомов кремния  $I_{Si}$ : достаточно высокой термической стабильностью в двукратно положительном зарядовом состоянии в кремнии *p*-типа и высокой подвижностью в положительном зарядовом состоянии, то есть в условиях инжекции неосновных носителей заряда электронов. Энергия активации эмиссии электронов из дважды положительно заряженного состояния  $I_{Si}$  равна  $E_c - 0,43$  эВ, а сечение захвата электронов  $\sigma_e = 1,2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup> (рисунок 10).



**Рисунок 11 – График Аррениуса скорости эмиссии электронов из ловушки глубокого уровня, появившихся в объемных нейтральных областях  $n^+$ -*p*-диодов при облучении альфа-частицами**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что в результате воздействия гамма-излучения  $Co^{60}$  при напряжении на стоке и истоке +5 В происходит увеличение токов утечки на несколько порядков *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторов с толщиной пленки кремния  $d_{Si} = 0,2$  мкм. Более высокую радиационную стойкость (до  $D = 1,2 \cdot 10^6$  рад) показали МОП/КНИ-транзисторы с  $d_{Si} = 0,3$  мкм. При отрицательном смещении подложки  $U_{подл} = -3$  В величина сдвига порогового напряжения паразитного транзистора снижается с ростом длины канала от 0,6 до 1,2 мкм или с уменьшением ширины канала от 10 до 1,4 мкм [1–А; 8–А].

2. Режим облучения счетных триггеров на основе МОП/КНИ-транзисторов с дополнительным отрицательным смещением на подложке (–2,5 В) позволяет повысить их радиационную стойкость более чем в десять

раз по сравнению с режимом облучения без дополнительного смещения. Расчетными методами показано, что в  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторах, с параметрами аналогичными транзисторам в составе исследуемых триггеров, отрицательное смещение на подложке существенно увеличило вертикальную составляющую напряженности электрического поля в заглубленном окисле, в результате чего генерируемые при облучении дырки более эффективно оттягиваются к подложке и не накапливаются на границе с активной пленкой кремния [2–А; 9–А; 18–А].

3. Расчетными методами показано, что скорость накопления заряда  $Q$  у границы раздела скрытый окисел/кремний при облучении тестовых  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторов зависит от электрического режима облучения и геометрических параметров структур. Наиболее «жестким» является режим, при котором во время облучения на сток и исток подается напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В. Величина  $Q$  существенно снижается при отрицательном смещении на подложке и уменьшении толщины слоя захороненного окисла [3–А; 10–А].

4. Степень радиационной деградации темнового тока  $I_{\text{темн}}$  с ростом поглощенной дозы  $D$  гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  у кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) с 1004 ячейками в виде  $n^+p-p^+$ -структур, оптически изолированных друг от друга металлизированными канавками, максимальна при облучении в режиме лавинного пробоя и зависит от конструктивного исполнения приборов. У SiФЭУ (ВI), вывод металла канавки которых электрически соединен через гасящий поликремниевый резистор с  $n^+$ -областью ячейки, значение  $I_{\text{темн}}$  возрастает в  $10^4$  раз при дозе  $D = 10^5$  рад и зависимость  $I_{\text{темн}}(D)$  описывается выражением:

$$I_{\text{темн}} = I_0 \exp(k \cdot D),$$

где  $I_0 = 2,0$  нА,  $k = 9,47 \cdot 10^{-5}$  рад $^{-1}$ .

У SiФЭУ (ВII), металл канавки которых соединен с  $p^+$ -областью ячейки, значение  $I_{\text{темн}}$  увеличивается в 15–16 раз при  $D = 10^6$  рад. Облучение приборов обоих вариантов конструктивного исполнения без обратного смещения приводит к увеличению темнового тока в 6–7 раз при  $D = 10^6$  рад [4–А; 6–А; 11–А–13–А; 15–А; 16–А; 20–А].

5. Расчет распределения плотности накопленного заряда  $Q$  и напряженности электрического поля  $E$  в окисле металлизированных разделительных канавок ячеек SiФЭУ в результате воздействия ионизирующих излучений показал, что максимальные значения  $Q$  и  $E$  в слое  $\text{SiO}_2$  достигаются вблизи границы с областью  $p-p^+$ -перехода ячейки и зависят как от электрического режима облучения, так и от структуры SiФЭУ. При пассивном режиме облучения значение  $Q$  не зависит от того, с какой областью активной ячейки соединена канавка прибора. При облучении SiФЭУ со структурой первого варианта под обратным смещением  $U_{\text{обр}} = -30$  В максимальное значение  $Q$  увеличивается по сравнению с пассивным режимом в 5,9 раза, а второго варианта – 2,5 раз. Максимальное значение  $E$  в слоях  $\text{SiO}_2$  возрастает в результате облучения SiФЭУ в

пассивном электрическом режиме в 1,4 раза и в активном в 4,4 и 1,6 раза для первого и второго вариантов структур, соответственно. Полученный результат объясняется усилением выхода дырочного заряда под действием соответствующим образом распределенных электрических полей в слоях окислов разделительных канавок ячеек SiФЭУ, облучаемых под обратным смещением. Дозовые зависимости темнового тока SiФЭУ (VI) обусловлены экспоненциальной зависимостью концентрации инверсных электронов вблизи границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> ячеек от поверхностного потенциала, создаваемого положительным зарядом в объеме оксида [5–А; 14–А; 19–А].

6. Исследовано изменение распределения концентрации дырок  $p(x)$  в базовых областях кремниевых диодных  $n^+$ - $p$ -структур, изготовленных на эпитаксиальном  $p$ -Si КДБ-18, в результате облучения  $\alpha$ -частицами в режимах обратных смещений ( $U_{см} = -5... -10$  В), а также без смещения, при температуре 290 К. На основании анализа вольт-фарадных зависимостей установлено, что на зависимостях  $p(x)$   $n^+$ - $p$ -структур, облучаемых под обратным смещением, возникает участок немонотонности, обусловленный уменьшением скорости удаления дырок в области пространственного заряда  $n^+$ - $p$ -структур по сравнению с нейтральной частью  $p$ -базы. Участок немонотонности исчезает после инжекции неосновных носителей заряда в базовую  $p$ -область [7–А; 17–А].

7. Методом *DLTS*-спектроскопии показано, что различие в скорости удаления дырок в ОПЗ и нейтральной части  $p$ -базы в процессе облучения связано с особенностями свойств собственных междоузельных атомов кремния  $I_{Si}$ : высокой термической стабильностью в двукратно положительном зарядовом состоянии в кремнии  $p$ -типа и высокой подвижностью в положительном зарядовом состоянии, то есть в условиях инжекции неосновных носителей заряда. Энергия активации эмиссии электронов из дважды положительно заряженного состояния  $I_{Si}$  равна  $E_{эм} = E_c - 0,43$  эВ, а сечение захвата электронов  $\sigma_e = 1,2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup> [7–А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации**

Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования нашли практическое применение в:

– ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» для предварительной оценки стойкости МОП/КНИ-приборов к накопленной дозе ионизирующего излучения. Эти результаты также полезны для разработчиков радиационно-стойких МОП-интегральных схем на основе КНИ-структур и кремниевых фотоэлектронных умножителей;

– ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» в рамках выполнения хоздоговорных работ для филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по радиационной обработке кремниевых пластин с диодными и транзисторными структурами для получения требуемых по ТУ электрических параметров полупроводниковых приборов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

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

2–А. Воздействие гамма-излучения на параметры счетного триггера / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, Д. А. Огородников, В. А. Чеховский, М. С. Темирбулатов, В. И. Эннс, В. Н. Шмигельский // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2018. – № 2. – С. 25–30.

3–А. Огородников, Д. А. Моделирование накопления заряда в облученных МОП/КНИ транзисторах / Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский // Изв. НАН Беларуси, сер. физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 498–504.

4–А. Влияние гамма-облучения на обратные вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей / Д. А. Огородников, С. Б. Ластовский, Ю. В. Богатырев, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал, С. В. Шпаковский / Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2024. – Т. 60, № 3. – С. 256–262.

5–А. Огородников, Д. А. Моделирование накопления заряда в кремниевых фотоэлектронных умножителях под воздействием мягкого рентгеновского излучения // Д. А. Огородников // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 337–343.

6–А. Влияние облучения альфа-частицами на обратные вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей / Д.А. Огородников, Ю.В. Богатырев, С. Б. Ластовский, А. В. Кетько, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал, С. В. Шпаковский, П. В. Рубанов, С. Е. Луконин // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. № 3. – С. 28–32.

7–А. The role of Si self-interstitial atoms in the formation of electrically active defects in reverse-biased silicon  $n^+p$  diodes upon irradiation with alpha particles / D. A. Aharodnikau, S. B. Lastovskii, S. V. Shpakovski, V. P. Markevich, M. P. Halsall, A. R. Peaker / Physica Status Solidi A. – 2021. – 2100104 (1 of 7).

### Статьи в сборниках трудов и материалов научных конференций

8–А. Радиационные эффекты в МОП-транзисторах с КНИ-структурой / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, Д. А. Огородников, С. А. Сорока, С. В. Шведов // Материалы VII Международной конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА» (ФТТ-2016). – Минск, 22–25 ноября 2016 г. – Т. 3. – С. 107–109.

9–А. Радиационное воздействие на параметры счетного триггера / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, В. А. Чеховский, Д. А. Огородников, М. С.

Темирбулатов, В. И. Эннс // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. Минск, 12–13 окт. 2016 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2016. – С. 150–153.

10–А. Влияние гамма-излучения на параметры n-канальных МОП-транзисторов с КНИ-структурой / Ф. П. Коршунов, Д. А. Огородников, С. А. Сорока, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский // Материалы Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». – Витебск, 22–26 мая 2017 г. – Ч. 2. – С. 125–127.

11–А. Радиационные эффекты в кремниевых фотоэлектронных умножителях / Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, А. В. Кетько, С.Б. Ластовский, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, БГУ. – 14–17 окт. 2020 г.

12–А. Влияние гамма-квантов на темновой ток кремниевых фотоумножителей / Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал, А. В. Кетько, С. В. Шпаковский // Восьмой Белорусский космический конгресс, 25–27 октября 2022 г., Минск: материалы конгресса: в 2 т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022 – Т. 2. – С. 87–90.

13–А. Огородников, Д. А. Влияние гамма-квантов на темновой ток кремниевых фотоумножителей / Д. А. Огородников // Молодежь в науке - 2022: тезисы докладов XIX Международной научной конференции «Молодежь в науке» (Минск, 25–28 октября 2022 г.) : аграрные, биологические, гуманитарные науки и искусства, медицинские, физико-математические, физико-технические, химия и науки о Земле / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2022. – С. 510–513.

14–А. Огородников, Д. А. Моделирование влияния рентгеновского излучения на распределение электрических полей в ячейке SiФЭУ с металлизированными разделительными канавками / Д. А. Огородников // Материалы 14-й Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 21–24 сентября) / редкол.: В. В. Углов (отв.ред. [и др.]. – Минск, БГУ, 2021. – С. 191–195.

15–А. Вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей, облученных альфа-частицами / Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, П. С. Ластовский, А. В. Кетько, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал // Материалы 6-ой Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 20–21 мая), Минобр РБ., НИУ ИПФП им. А.Н. Севченко БГУ / редкол.: В. И. Попечиц (гл.ред.) [и др.]. – Минск, БГУ, 2021. – С. 228–231.

16–А. Влияние облучения альфа-частицами на вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей / Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, А. В. Кетько, А. М. Лемешевская, В. С.

Цымбал, С. В. Шпаковский // Радиационная физика твердого тела: труды 31 Междунар. Конференции, Севастополь, 05–10 июля 2021 г. / под ред. Г. Г. Бондаренко – Москва, 2021. – С. 231–240.

17–А. Влияние электрического поля на образование радиационно-индуцированных центров в кремнии *p*-типа при облучении  $\alpha$ -частицами / Д. А. Огородников, Д. Н. Жданович, А. С. Якушевич, С. Б. Ластовский, Л. И. Мурин, В. П. Маркевич, С. В. Шпаковский // Труды 29-ой Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 8–13 июля 2019 г.), под ред. Г. Г. Бондаренко – Москва, 2019. – С. 160–169.

#### **Тезисы докладов на научных конференциях**

18–А. Воздействие гамма-излучения на параметры счетного триггера / Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, В. А. Чеховский, Д. А. Огородников, М. С. Темирбулатов, В. И. Эннс // Сб. тезисов докл. 20-й Всероссийской науч.-техн. конф. по радиационной стойкости электронных систем – «Стойкость-2017», г. Лыткарино, 6–7 июня 2017 г. – 2017. – С. 17–18.

19–А. Огородников, Д. А. Влияние рентгеновского излучения на напряженность электрического поля в ячейке SiФЭУ с разделительными канавками / Д. А. Огородников // Тезисы докладов XVIII Международной научной конференции молодых ученых «Молодежь в науке – 2021», г. Минск, 27–30 сентября 2021 г., в 2-ч частях. – 2021. – ч. 2. – С. 280–283.

20–А. Влияние альфа-частиц на ВАХ кремниевых фотоумножителей с оптической экранировкой ячеек / П. В. Рубанов, С. Е. Луконин, Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский, А. В. Кетько, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал // Сб. тезисов докл. 24-й Всероссийской науч.-техн. конф. по радиационной стойкости электронных систем – «Стойкость-2021», г. Лыткарино, 4–5 июня 2021 г. – 2021. – С. 24–25.

## РЭЗІЮМЭ

Агароднікаў Дзмітрый Аляксандравіч

### Эксперыментальнае даследаванне і лікавае мадэляванне радыяцыйных эфектаў ў крамяневых прыборных структурах

**Ключавыя словы:** «крэмній на ізалятары», крамяневы фотапамнажальнік, вольт-амперныя характарыстыкі, альфа-часціцы, гама-кванты, напружанасць электрычнага поля, назапашаны зарад

**Мэта працы:** эксперыментальнае даследаванне і лікавае мадэляванне ўплыву гама-квантаў  $\text{Co}^{60}$  і альфа-часціц на параметры крамяневых прыборных структур пры розных канструктыўна-тэхналагічных асаблівасцях і электрычных рэжымах апрамянення.

**Метады даследавання:** вызначэнне вольт-амперных і вольт-фарадных характарыстык прыбораў, DLTS-спектраскапія, лікавае мадэляванне.

**Асноўныя вынікі:** даследаваны розныя электрычныя рэжымы апрамянення гама-квантамі  $\text{Co}^{60}$  МВП/КНІ-транзістараў і падліковых трыгераў. Праведзена мадэляванне структур транзістараў, што дазволіла прапанаваць спосабы павышэння радыяцыйнай стойкасці прыбораў. Праведзена апрамяненне ў розных электрычных рэжымах гама-квантамі  $\text{Co}^{60}$  і альфа-часціцамі з энергіяй 5,1 МэВ крамяневых фотапамнажальнікаў з ячэйкамі, аптычна ізаляванымі металізаванымі канаўкамі. Устаноўлены найбольш уразлівыя да ўздзеяння іянізавальных выпраменьванняў у актыўным электрычным рэжыме варыянты канструктыўнага выканання прыбораў. Вынікі лікавага мадэлявання пацвердзілі атрыманыя эксперыментальныя дадзеныя і дазволілі растлумачыць механізм радыяцыйнай дэградацыі цёмнавых токаў прыбораў. Праведзена апрамяненне альфа-часціцамі крамяневых  $n^+p-p^+$ -структур пад зваротным напружаннем і без напружання. З аналізу вольт-фарадных характарыстык апрамененых прыбораў усталявана, што ў вобласці прасторавага зарада хуткасць выдалення асноўных носбітаў зарада ніжэй у параўнанні з нейтральнай часткай  $p$ -базы. Метадам DLTS-спектраскапіі паказана, што дадзены эфект звязаны з асаблівасцямі ўласцівасцяў уласных міжвузлавых атамаў крэмнію  $I_{\text{Si}}$ : высокай тэрмічнай стабільнасцю ў двухразова дадатным зарадовым стане ў крэмніі  $p$ -тыпу і высокай рухомасцю ў дадатным зарадавым стане.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** атрыманыя вынікі могуць быць скарыстаны для папярэдняй ацэнкі ўстойлівасці паўправадніковых прыбораў да назапашанай дозе іянізавальнага выпраменьвання.

**Вобласць прымянення:** фізіка паўправаднікоў, электронная прамысловасць.

## РЕЗЮМЕ

Огородников Дмитрий Александрович

### Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборных структурах

**Ключевые слова:** «кремний на изоляторе», кремниевый фотоумножитель, вольт-амперные характеристики, альфа-частицы, гамма-кванты, напряженность электрического поля, накопленный заряд

**Цель работы:** экспериментальное исследование и численное моделирование влияния гамма-квантов  $Co^{60}$  и альфа-частиц на параметры кремниевых приборных структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения.

**Методы исследования:** измерение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик приборов, DLTS-спектроскопия, численное моделирование.

**Основные результаты:** исследованы различные электрические режимы облучения гамма-квантами  $Co^{60}$  МОП/КНИ-транзисторов и счетных триггеров. Проведено моделирование структур транзисторов, что позволило предложить способы повышения радиационной стойкости приборов. Проведено облучение в различных электрических режимах гамма-квантами  $Co^{60}$  и альфа-частицами с энергией 5,1 МэВ кремниевых фотоумножителей с ячейками, оптически изолированными металлизированными канавками. Установлены наиболее уязвимые к воздействию ионизирующих излучений в активном электрическом режиме варианты конструктивного исполнения приборов. Результаты численного моделирования подтвердили полученные экспериментальные данные и позволили объяснить механизм радиационной деградации темновых токов приборов. Проведено облучение альфа-частицами кремниевых  $n^+p-p^+$ -структур под обратным смещением и без смещения. Из анализа вольт-фарадных характеристик облученных образцов установлено, что в области пространственного заряда скорость удаления основных носителей заряда ниже по сравнению с нейтральной частью  $p$ -базы. Методом DLTS-спектроскопии показано, что данный эффект связан с особенностями свойств собственных междоузельных атомов кремния  $I_{Si}$ : высокой термической стабильностью в двукратно положительном зарядовом состоянии в кремнии  $p$ -типа и высокой подвижностью в положительном зарядовом состоянии.

**Рекомендации по использованию:** полученные результаты могут быть использованы для предварительной оценки стойкости полупроводниковых приборов к накопленной дозе ионизирующего излучения.

**Область применения:** физика полупроводников, электронная промышленность.

## SUMMARY

Aharodnikau Dzmitryi Aliaksandravich

### **Experimental study and numerical simulation of radiation effects in silicon device structures**

**Key words:** “silicon on insulator”, silicon photomultiplier, volt-ampere characteristics, alpha particles, gamma-quanta, electric field intensity, accumulated charge

**Aim of the work:** experimental study and numerical simulating of the influence of gamma-quanta  $\text{Co}^{60}$  and alpha particles on the parameters of silicon device structures under different design and technological features and electrical irradiation modes.

**Research methods:** definition of volt-ampere and capacitance-voltage characteristics of devices, DLTS spectroscopy, numerical simulating.

**Obtained results:** various electrical modes of gamma-quantum irradiation of MOS/SOI transistors and counting triggers have been studied. Simulation of the transistor structures has been carried out to suggest ways of improving the devices' radiation stability. Irradiation of silicon photomultipliers with cells optically isolated by metallized trenches by gamma-quanta  $\text{Co}^{60}$  and alpha particles with energy of 5.1 MeV was carried out in different electrical modes. The most vulnerable to the impact of ionizing radiation in the active electric mode variants of the devices design were identified. The results of numerical simulation confirmed the obtained experimental data and allowed to explain the mechanism of radiation degradation of dark currents of the devices. Alpha-particle irradiation of silicon  $n^+p$ -structures under reverse bias and unbiased conditions was performed. From the analysis of the volt-farad characteristics of the irradiated samples, it is found that the removal rate of the majority carriers is lower in the spatial charge region compared to the neutral part of the  $p$ -base. It is shown by DLTS spectroscopy that this effect is related to the properties of the intrinsic interstitial atoms of silicon  $I_{\text{Si}}$ : high thermal stability in the doubly positive charge state in  $p$ -type silicon and high mobility in the positive charge state.

**Recommendations for use:** The obtained results can be used for preliminary assessment of semiconductor devices resistance to accumulated dose of ionizing radiation.

**Applications:** semiconductor physics, electronic industry.