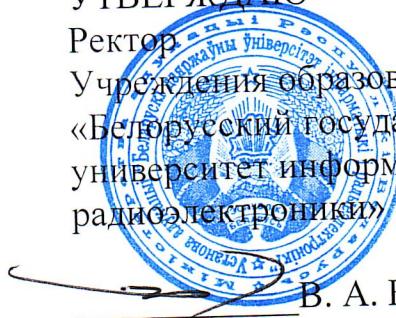


УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Учреждения образования

«Белорусский государственный  
университет информатики и  
радиоэлектроники»



В. А. Богуш

12 ноября 2024 г.

## ОТЗЫВ

оппонирующей организации – Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», на диссертационную работу ОГОРОДНИКОВА Дмитрия Александровича «Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборных структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

### 1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Д. А. Огородникова содержит результаты выполненного им экспериментального исследования и численного моделирования влияния гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  и альфа-частиц на параметры кремниевых приборных структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения. В качестве основных объектов исследования выбраны МОП/КНИ-транзисторные структуры, интегральные микросхемы триггеров, кремниевые фотоумножители. В процессе проведенного исследования установлены: влияние названных видов радиационного воздействия на электрические характеристики исследуемых приборных структур, а также особенности и роль процессов дефектообразования в них при различных электрических режимах их в процессе облучения. Полученные результаты представляют фундаментальный научный интерес для понимания механизмов радиационного дефектообразования в облучаемых кремниевых приборных структурах, что актуально для оценки их радиационной стойкости.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.10 – Физика полупроводников и физико-математической отрасли наук. Область исследований соответствует п.5 Модификация химического состава, структуры и физических свойств полупроводниковых материалов и полупроводниковых приборов внешними воздействиями и п.6. Явления на поверхности полупроводников и границах их раздела (контакта) с веществами в твердом, жидким, плазменном и газообразном агрегатных состояниях» названного паспорта.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Текст диссертации включает введение, общую характеристику работы, обзорную главу и четыре главы с материалами выполненного исследования, заключение, библиографический список использованных источников (116 наименований), список публикаций соискателя (20 научных работ) и 2 приложения – Акт о практическом использовании результатов исследования на ОАО “Интеграл” и Акт о внедрении научных результатов в практическую деятельность в НПЦ НАН Беларусь по материаловедению. Общий объем диссертации 128 страниц, включая 64 рисунка. Изложение результатов дано грамотным научным русским языком и исчерпывающе проиллюстрировано. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание самой диссертации.

## **2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости**

Научный вклад соискателя заключается в экспериментальном установлении и физической интерпретации закономерностей изменения параметров исследованных кремниевых приборных структур в зависимости от поглощенной дозы радиационного воздействия и от электрических режимов их работы в процессе облучения. К наиболее значимым результатам работы, отличающимся существенной научной новизной, следует отнести следующие:

2.1. Повышение на порядок радиационной стойкости интегральных счетных триггеров на основе МОП/КНИ-структур, облучаемых гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$ , за счет подачи на подложку отрицательного смещения величиной 2,5 В.

2.2. Экспоненциальное увеличение темнового тока в кремниевых ФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками в результате их облучения гамма-квантами, зависящее, как от электрического режима их работы, так и от полярности потенциала на электроде канавки.

2.3. Представления о радиационной деградации темнового тока кремниевых ФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками, отличающиеся учетом скорости накопления положительного заряда в диэлектрических слоях канавок под действием электрических полей, распределение которых зависит как от электрического режима облучения, так и от конструктивных особенностей таких структур.

2.4. Уменьшение скорости удаления дырок в области пространственного заряда кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур, облучаемых альфа-частицами с энергией 5 МэВ при их обратном смещении, чему дано объяснение в рамках представлений о повышенной термической стабильности образующихся в этих условиях собственных междоузельных атомов кремния в двукратно ионизированном положительном зарядовом состоянии, характеризуемом энергией активации эмиссии электронов 0,43 эВ и сечением захвата электронов  $1,2 \times 10^{-13} \text{ см}^2$ .

### **3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень**

Соискателю может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников за полученные новые научно обоснованные результаты, среди которых наиболее значимыми являются следующие:

3.1. Установленную возможность влияния на радиационную стойкость *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторов электрического режима их работы при облучении гамма-квантами Со<sup>60</sup> контролем накопления положительного заряда на границе раздела кремний/захороненный окисел, величину которого удается существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла транзисторных структур.

3.2. Обнаруженное экспериментально экспоненциальное увеличение темнового тока в кремниевых ФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками после облучения гамма-квантами, зависящее от электрического режима их работы в процессе облучения, контролирующего скорость накопления положительного заряда в окисле разделительных канавок под действием электрических полей.

3.3. Модель и результаты расчетов по ней распределения плотности накопленного заряда в диэлектрическом слое (SiO<sub>2</sub>) разделительной канавки ячеек кремниевых ФЭУ, показавшие, что при их облучении мягким рентгеновским излучением максимальный заряд образуется вблизи границы диэлектрика с областью *p-p*<sup>+</sup>-перехода ячейки и возрастает по сравнению с пассивным режимом облучения в 5,9 раза при положительном потенциале на металлическом слое разделительной канавки и в 2,5 раза при отрицательном.

3.4. Экспериментальные результаты, обнаружившие, что при облучении альфа-частицами с энергией 5,1 МэВ обратносмешенных кремниевых диодных *n*<sup>+</sup>-*p-p*<sup>+</sup>-структур в их области пространственного заряда скорость удаления основных носителей заряда снижается до двух раз по сравнению с нейтральной частью *p*-базы, что связано с переходом образующихся при облучении междуузельных атомов кремния из стабильного двукратно заряженного положительного зарядового состояния в нестабильное однократно заряженное.

Совокупность названных результатов является существенным вкладом в радиационную физику полупроводниковых приборов в части понимания взаимосвязи радиационного дефектообразования в них с электрическими режимами работы приборов при облучении.

### **4. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

Представленную к защите диссертацию отличает выбор актуального с научной точки зрения объекта исследования – кремниевые приборные структуры. Обширный экспериментальный материал, полученный с использованием современных методов исследования полупроводниковых структур, его обстоятельный анализ и предложенные соискателем

оригинальные модели обладают новизной на мировом уровне. Это подтверждают публикации соискателя в престижных научных журналах и ссылки на них. Они признаны научным сообществом и обеспечивают приоритет Республики Беларусь в исследовании радиационной стойкости полупроводниковых приборов.

Требования к кандидатским диссертациям, регламентированные п.20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, выполнены полностью, поскольку диссертация содержит новые научные результаты по одному из актуальных направлений научных исследований. Научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук.

## **5. Рекомендации по практическому применению результатов работы**

Диссертация содержит результаты, носящие фундаментальный характер в области физики полупроводников. Их практическое применение ориентировано в первую очередь на развитие знаний о закономерностях радиационного дефектообразования в полупроводниковых приборах, что предполагает их использование на предприятиях электронной промышленности, в научных организациях НАН Беларуси и в университетах при разработке радиационно-стойких кремниевых приборов и интегральных микросхем, а также при подготовке высококвалифицированных специалистов в этом направлении. Подтверждением этому служат приложенные к диссертации Акт о практическом использовании результатов исследований на ОАО “Интеграл” и Акт о внедрении научных результатов в практическую деятельность в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению.

## **6. Замечания по работе**

6.1. Отсутствуют ссылки на источники, из которых взяты формулы (1.1), (1.3), (1.7), (2.2), (2.3), (2.6) – (2.8).

6.2. На рисунках 2.8, 2.9, 2.12 отсутствуют шкалы масштаба, что затрудняет оценку размеров представленных на них объектов.

6.3. Доза поглощенного гамма-излучения приводится то в единицах системы СИ – Грэй, то во внесистемных единицах – рад.

6.4. Глава 2 не содержит выводов.

6.5. Моделирование радиационных эффектов в кремниевых МОП-приборах (Глава 3) следовало бы не ограничивать феноменологическими представлениями и отдельными количественными оценками, а дополнить аналитическими выражениями, аппроксимирующими представленные в диссертации экспериментальные зависимости контролируемых параметров от дозы поглощенного гамма-излучения. Это актуально для последующего прогнозирования радиационной стойкости исследованного класса кремниевых приборов.

6.6. Важная с точки зрения обнаруженной закономерности экспоненциальная зависимость темнового тока кремниевого ФЭУ от поглощенной дозы гамма-излучения – формула (4.1) на стр.77, не имеет ссылки

ни на свои работы, ни на работы других исследователей. Не понятно также, зачем соискатель повторяет ее на стр.81, но уже без номера.

6.7. Формулировки основных научных результатов в Заключении перегружены техническими деталями выполненных исследований в ущерб акценту на обнаруженные физические закономерности.

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и не умаляют общей положительной оценки диссертационной работы.

## 7. Заключение

Диссертация «Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборных структурах», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников, подготовлена на актуальную тему, содержит принципиально новые научные результаты и полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Ее автор – ОГОРОДНИКОВ Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения искомой ученой степени по названной специальности за новые научно обоснованные результаты, отмеченные в п.3 данного отзыва.

Согласно приказу ректора Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники В. А. Богуша № 193-о от 31.10.2024 данный отзыв рассмотрен и принят на расширенном заседании кафедры микро- и наноэлектроники 11 ноября 2024 года, протокол № 11, на котором соискатель Д. А. Огородников выступил с докладом и квалифицированно ответил на заданные ему вопросы. В заседании участвовали 2 доктора наук, 5 кандидатов наук, а также другие сотрудники кафедры микро- и наноэлектроники и НИЧ БГУИР. Результаты открытого голосования участников заседания, имеющих ученые степени: «за» - 7, «против» - нет, «воздержался» - нет.

Председательствующий на заседании  
заместитель заведующего кафедрой  
микро- и наноэлектроники  
кандидат технических наук, доцент

А. А. Степанов

Эксперт по диссертации  
профессор кафедры микро- и наноэлектроники  
доктор физико-математических наук, профессор

Б. Е. Борисенко

Ученый секретарь на заседании  
старший преподаватель  
кафедры микро- и наноэлектроники

О. М. Чернаусик