

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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 диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите

В диссертации Огородникова Дмитрия Александровича представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования влияния гамма-квантов и альфа-частиц на параметры кремниевых приборных структур при различных конструктивно-технологических особенностях и электрических режимах облучения. Объектами исследования выбраны МОП/КНИ-транзисторные структуры, интегральные микросхемы счетных триггеров, кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ) и кремниевые *p-n*-структурь.

В совокупности с полученными результатами, отраженными в выводах и выносимых на защиту положениях, это позволяет утверждать, что диссертация соответствует специальности 01.04.10 – физика полупроводников (физико-математические науки), областям исследований: «5. Модификация химического состава, структуры и физических свойств полупроводниковых материалов и полупроводниковых приборов внешними воздействиями; 6. Явления на поверхности полупроводников и границах их раздела (контакта) с веществами в твердом, жидком, плазменном и газообразном агрегатных состояниях; 9. Создание, диагностика и функционирование полупроводниковых приборов; 11. Компьютерное моделирование свойств полупроводниковых материалов и параметров приборов».

2. Актуальность темы диссертации

В последнее десятилетие сохраняется устойчивый интерес исследователей и разработчиков к изучению влияния ионизирующих излучений на характеристики полупроводниковых приборов, что является важной задачей для опто- и микроэлектроники. Обусловлено это тем, что понимание физических процессов в облученных полупроводниковых структурах необходимо для прогнозирования радиационной стойкости приборов и разработки радиационно-технологических методов их изготовления. Требования производства по снижению энерго- и трудозатрат, уменьшению габаритов и массы элементов электронной техники также стимулируют работы по изучению их различных физических характеристик.

В связи с изложенным выше, актуальность диссертационной работы Огородникова Д.А., направленной на установление взаимосвязи экспериментального исследования и численного моделирования влияния гамма-квантов и альфа-частиц на параметры кремниевых приборных структур в зависимости от условий облучения, имеет несомненную актуальность.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту

Диссертационная работа Огородникова Дмитрия Александровича представляет собой комплексное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Новизна работы определяется развитием такого направления физики полупроводников, как расширение представления о влиянии ионизирующих излучений на параметры МОП-транзисторов и интегральных микросхем. Полученные научные результаты диссертационной работы являются новыми и вносят вклад в физику и технологию полупроводниковых материалов и приборов. Основные результаты диссертации имеют высокий уровень новизны, некоторые из них получены впервые:

- отрицательное смещение на подложке микросхем, изготовленных на основе МОП/КНИ-структур, снижает на порядок степень радиационной деградации токов утечки в результате уменьшения скорости накопления под действием электрического поля радиационно-индуцированного положительного заряда на границе захороненного оксида с активным слоем кремния *n*-канальных транзисторов;
- экспериментально получены дозовые зависимости темнового тока SiФЭУ с оптической изоляцией ячеек металлизированными канавками при облучении гамма-квантами Со⁶⁰ в различных электрических режимах и при различных знаках потенциала на электроде металла канавки. Численными методами показано, что вызванные облучением изменения темнового тока SiФЭУ обусловлены 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;
- скорость удаления неосновных носителей заряда в области пространственного заряда кремниевых *n*⁺-*p*-структур, облучаемых под обратным смещением альфа-частицами, меньше по сравнению с нейтральной частью *p*-базы в результате зависимости термической стабильности собственных междуузельных атомов кремния от зарядового состояния в материале *p*-типа.

Степень новизны полученных результатов и научных положений, выносимых на защиту, подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях, сборниках материалов научных конференций.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждаются применением современных методик измерений электрофизических параметров объектов исследования; численное моделирование и математическая обработка полученных данных проведены с привлечением программных пакетов, позволяющих выполнять расчеты с высокой точностью. Результаты выполненных исследований имеют законченный характер, сформулированы достаточно корректно, проверены и

подтверждены экспериментально, апробированы на научно-технических конференциях различного ранга, отражены в отечественных и зарубежных реферируемых журналах. Выводы и рекомендации сделаны на основании анализа достоверных результатов эксперимента, с учётом современных представлений о влиянии ионизирующих излучений на параметры кремниевых приборов.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость результатов диссертации заключается в расширении существующих представлений о влиянии проникающих излучений на характеристики кремниевых МОП/КНИ транзисторов и интегральных схем на их основе, кремниевых фотоумножителей с ячейками оптически изолированными металлизированными канавками, а также процессов радиационного дефектообразования в кремнии в условиях наличия электрических полей. Полученные результаты имеют фундаментальный характер и могут использоваться как справочные данные в области физики и технологии полупроводниковых материалов и приборов.

Практическая значимость работы отражена в Приложениях диссертации применением полученных результатов в ОАО «Интеграл» для разработки радиационно-стойких изделий микроэлектроники, а также для усовершенствования радиационных методов изготовления кремниевых приборов. Полученные результаты также могут быть использованы в учебном процессе кафедры Микро- и наноэлектроники БГУИР и возможностью включения в учебные программы схожих специальностей других ВУЗов.

Экономическая значимость результатов диссертации заключается в возможности изготовления радиационно-стойких изделий электронной техники существенно продлевая сроки эксплуатации электронных блоков космических аппаратов и ядерных энергетических установок. Это отвечает требованиям экологической безопасности, низкозатратной и высокопроизводительной промышленности.

Социальная значимость определяется тем, что в наше время не вызывает сомнений утверждение, что развитие микроэлектроники, в том числе устойчивой к воздействию проникающих излучений, коренным образом улучшает жизнь общества и расширяет возможности применения полупроводниковых приборов.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати;

Опубликованность результатов диссертации соответствует требованиям ВАК РБ. Результаты опубликованы в 20 статьях, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 10 статьях в сборниках материалов конференций и 3 тезисах докладов на международных и республиканских конференциях.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Все требования, установленные Инструкцией о порядке оформления диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, выполнены. Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, включая 64 рисунка на 48 страницах и одна таблица. Библиографический список содержит 116 наименований, включая 20 собственных публикаций автора (занимает 11 страниц). Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы, ее структуру, основные положения и выводы, выносимые на защиту.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Анализ диссертационной работы, представленных в ней выводов и рекомендаций, а также основных публикаций соискателя по теме диссертации позволяет заключить, что научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

9. Замечания по работе

По диссертационной работе Огородникова Д.А. имеются замечания:

1. Литературный обзор проведен в основном по зарубежным источникам, мало внимания удалено публикациям в отечественной литературе за последние 5 лет.
2. В разделе «Структура и объем диссертации» отсутствуют данные о числе таблиц.
3. Отсутствуют выводы по главе 2 «МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА».
4. Не представлены результаты по исследованию влияния температуры на темновой ток кремниевых фотоумножителей. Все измерения проводились при комнатной температуре. Однако обратный ток кремниевых *p-n*-переходов существенно зависит от температуры измерения.
5. Не исследовалась времененная стабильность радиационных нарушений в SiФЭУ. В то же время, известно о возможном отжиге (релаксации) накопленного при облучении в слоях диоксида кремния положительного заряда в приборных структурах.
6. Замечания по представлению иллюстративного материала, опечатки, присутствующие в тексте диссертации и автореферата:
 - в диссертации и автореферате не всегда используется Международная система единиц физических величин, например: рад, минута;
 - в автореферате номер 10-го рисунка ошибочно обозначен как 11-ый.

Указанные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертационная работа Огородникова Дмитрия Александровича «Экспериментальное исследование и численное моделирование радиационных эффектов в кремниевых приборных структурах» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты исследования влияния ионизирующих излучений на параметры МОП/КНИ-транзисторов и интегральных микросхем на их основе, а также кремниевых фотоумножителей с ячейками, оптически изолированными металлизированными канавками, имеющей существенное значение для физики полупроводников. Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными главой З «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников за новые научно обоснованные результаты, включающие:

1. Отрицательное смещение на подложке интегральных микросхем счетного триггера, изготовленных на основе МОП/КНИ-структур, снижает на порядок степень радиационной деградации токов утечки в результате уменьшения скорости накопления под действием электрического поля радиационно-индукционного положительного заряда на границе захороненного оксида с активным слоем кремния *n*-канальных транзисторов.

2. Изменения темнового тока SiФЭУ с оптической изоляцией металлизированными канавками ячеек в виде диодных *n*⁺-*p*-*p*⁺-структур при воздействии гамма-квантов Co⁶⁰ и альфа-частиц с энергией 5,1 МэВ зависят от электрического режима облучения и знака потенциала на электроде металла канавки, что связано с разной скоростью накопления дырочного заряда в слоях окислов разделительных канавок под действием электрических полей.

3. Численным моделированием показано, что при облучении ячеек SiФЭУ в виде *n*⁺-*p*-*p*⁺-структур, разделенных металлизированной канавкой, мягким рентгеновским излучением с энергией 10 кэВ и дозой 10⁵ рад максимальные значения плотности накопленного заряда в слое SiO₂ канавки достигаются вблизи границы с областью *p*-*p*⁺-перехода ячейки и возрастают по сравнению с пассивным режимом облучения в 5,9 раз при положительном потенциале на металле и в 2,5 раза - при отрицательном, под действием электрических полей, зависящих от конструктивных особенностей модели SiФЭУ.

4. Скорость удаления неосновных носителей заряда в области пространственного заряда кремниевых *n*⁺-*p*-структур, облучаемых под обратным смещением альфа-частицами, уменьшается до двух раз по сравнению с нейтральной частью *p*-базы в результате зависимости термической стабильности собственных междуузельных атомов кремния от зарядового

состояния в материале *p*-типа.

Это вносит существенный вклад в развитие научных основ изучения влияния ионизирующих излучений на характеристики кремниевых полупроводниковых приборов (электронных блоков космических аппаратов и ядерных энергетических установок), что является важной задачей для опто- и микроэлектроники.

Официальный оппонент,
заведующий лабораторией физики полупроводников
ГО «НПЦ НАН Беларусь по материаловедению»,
доктор физико-математических наук,
профессор



Б.Ф. Гременок

Подпись
Удостоверяю
Ведущий специалист по кадрам

