

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.345.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования

«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА

НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 06.06.2024 № 4

О присуждении Ширяеву Алексею Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния» по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» принята к защите 02.04.2024, протокол № 3 диссертационным советом 24.2.345.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24; приказ № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Ширяев Алексей Александрович 27 марта 1992 года рождения, в 2015 году окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». В 2019 году окончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский

государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», работает инженером в отделе разработки, контроля и сопровождения технологий изготовления больших и сверхбольших интегральных схем филиала Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»), г. Нижний Новгород, госкорпорация «Росатом».

Диссертация выполнена в лаборатории исследований физико-химических свойств структур и материалов радиационно-стойкой электронной компонентной базы филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова».

Научный руководитель – доктор химических наук, профессор **Воротынцев Владимир Михайлович**.

В настоящее время не работает.

Официальные оппоненты:

1. **Ежевский Александр Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород);

2. **Бутина Анастасия Валентиновна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (г. Москва)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования (ФГБОУ ВО) «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» в своем положительном заключении, подписанном доктором химических наук,

профессором, профессором кафедры химии и технологии кристаллов Петровой Ольгой Борисовной и кандидатом технических наук, доцентом, доцентом кафедры химии и технологии кристаллов Файковым Павлом Петровичем, указала, что прогнозирование радиационной стойкости микросхем без облучения является актуальной задачей, а предложенный диссертантом новый метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа вольт-амперных характеристик диэлектрических слоев без использования ионизирующего излучения характеризуется высокой научной и практической значимостью. Содержание работы соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация Ширяева А.А. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 15, из них в рецензированных научных изданиях опубликовано 4 – в журналах, включенных в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для опубликования результатов диссертационных работ, а именно: 2 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по специальности 2.2.8; 2 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов по смежным специальностям; 2 – в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science. Также опубликовано 9 работ, представляющих собой материалы докладов на конференциях. Общий объем научных изданий составляет 8,1 усл. п. л. Авторский вклад составляет 7,1 усл. п. л. Недостоверные сведения об опубликованных работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Ширяев, А.А.** Метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния в КМОП-микросхемах на основе анализа вольтамперных характеристик / **А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов** // Датчики и системы. – 2023. – № 1. – С. 11-15.

2. **Ширяев, А.А.** Моделирование дозовой радиационной стойкости МОП-транзисторов по результатам контроля тока утечки подзатворного оксида / **А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов** // Датчики и системы. – 2023. – № 5. – С. 49-52.
3. **Ширяев, А.А.** Эффект Пула-Френкеля и возможность его применения для прогнозирования радиационного накопления заряда в термическом диоксиде кремния / **А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов** // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, Вып. 9. – С. 990-994.
4. **Ширяев, А.А.** Прогнозирование величины захваченного заряда в захороненном оксиде кремния структур кремний-на-изоляторе с применением эффекта Пула-Френкеля / **А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов** // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54, Вып. 5. – С. 441-445.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- Общества с ограниченной ответственностью «Тандем Электроника», подписанный ведущим инженером, кандидатом технических наук Котовым В.С.;
- Акционерного общества «Ангстрем», подписанный первым заместителем генерального директора, кандидатом технических наук Плисом Н.И.;
- Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук», подписанный заведующим лабораторией Теории высокочистого состояния и разделения смесей веществ, доктором технических наук Кирилловым Ю.П.;
- Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, подписанный заведующим лабораторией Фоточувствительных и электроактивных материалов отдела Полимеров и композиционных материалов, кандидатом химических наук Аккуратовым А.В.;
- Общества с ограниченной ответственностью «Фирма «Хорст», подписанный техническим директором, кандидатом химических наук Козыревым И.В.;
- Общества с ограниченной ответственностью «Поликетон», подписанный главным конструктором, кандидатом химических наук Джонсом М.М.;

Все отзывы положительные и содержат заключение о том, что Ширяев Алексей Александрович достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

В качестве основных критических замечаний отмечено:

- Автор не приводит описание марки (марок) кремния, который использовался при проведении исследований с расшифровкой примесного состава, хотя в работе обсуждается вопрос о критическом влиянии примесей на радиационную стойкость изделий.
- Не указаны параметры (интенсивность и длительность) ионизирующего излучения, для которого применима разработанная модель; в том числе, не приведены границы применимости разработанной модели в условиях низкой и сверхвысокой интенсивности.
- В работе не обозначены границы применимости предложенного метода диагностики в части толщин слоев диоксида кремния. Для тонких слоев порядка нескольких нанометров применение метода может быть ограничено туннельным эффектом.
- Разработанный метод (ВАХ) не является методом, дающим информацию о структуре диэлектрика. Здесь можно говорить лишь об установлении связи между наблюдаемыми особенностями ВАХ с дефектностью в структуре диэлектрика.
- Не ясен критерий выбора местоположения структур для контроля на пластине с кристаллами микросхем.
- Не приведены статистические данные, показывающие обеспечение перехода от стадии отработки технологии к стадии отбраковки пластин и микросхем опытного и серийного производства.
- Генерация и инжекция заряда при стрессовом воздействии определяется током, который зависит от подаваемого напряжения. Для лучшей воспроизводимости воздействия целесообразно применять непосредственно токовую инжекцию в подзатворный диоксид кремния.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в научной области, охватываемой темой диссертации, и соответствием их публикаций теме диссертационной работы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Ежевский Александр Александрович является высококвалифицированным специалистом в области микроэлектроники, в том числе в области контроля качества полупроводниковых материалов методом электронного парамагнитного резонанса.

Официальный оппонент, кандидат технических наук Бутина Анастасия Валентиновна является высококвалифицированным специалистом в области контроля радиационной стойкости приборов, в частности, в области автоматизации процессов контроля.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» является крупным научным центром России, одним из направлений исследований которого является диагностика полупроводниковых и диэлектрических материалов, в частности, исследование их структуры и содержащихся в них примесей и дефектов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик МОП-структур, содержащих исследуемый слой;

предложена модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате радиационного воздействия на основе контроля тока утечки подзатворного оксида до воздействия, которая позволила определить критерии отбраковки микросхем с потенциально низкой радиационной стойкостью;

разработан алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, основанный на контроле качества слоев диоксида кремния в процессе производства.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих научной новизной результатов)

определена зависимость величины накопленного заряда в слое диоксида кремния в результате радиационного воздействия от величины тока утечки диэлектрического слоя до воздействия;

установлена связь уровня радиационной стойкости КМОП-микросхем с параметрами, определяемыми путем анализа вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик МОП-структур до облучения;

изучено влияние технологии формирования слоев диоксида кремния на их вольт-амперные характеристики;

изложены основные положения предложенного метода диагностики слоев диоксида кремния и модели деградации порогового напряжения МОП-транзисторов при радиационном воздействии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан простой в технической реализации метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, позволяющий проводить оперативный контроль качества слоев в процессе производства радиационно-стойких микросхем и выявлять причины повышенной дефектности слоев;

определены критерии отбраковки слоев диоксида кремния по току утечки, позволяющие исключать из партии структуры с потенциально низкой радиационной стойкостью;

разработан алгоритм контроля качества слоев диоксида кремния в процессе производства микросхем, позволяющий снизить затраты на сборку и радиационные испытания микросхем за счет поступления на испытания потенциально более стойких микросхем;

представлены рекомендации по оптимизации технологии формирования слоев диоксида кремния с целью повышения радиационной стойкости микросхем.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использованы современные методы экспериментальных исследований диэлектрических материалов: электронного парамагнитного резонанса, эллипсометрии, вторично-ионной масс-спектрометрии, ртутного зонда, реализованные на сертифицированном оборудовании;

идея разработанной модели деградации порогового напряжения МОП-транзисторов под действием ионизирующего излучения базируется на известной зависимости сдвига порогового напряжения от поглощенной дозы и известных теоретических выражениях, описывающих вольт-амперные характеристики диэлектрического слоя;

установлено хорошее совпадение результатов измерений с результатами моделирования на основе разработанной математической модели, а также соответствие параметров модели калибровочным измерениям.

Личный вклад соискателя состоит в разработке метода диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, проведении измерений разработанным методом и анализе их результатов, выводе аналитического выражения, описывающего разработанную модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения на основе контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения, а также в непосредственном участии в экспериментальных исследованиях слоев диоксида кремния и в работах по оценке радиационной стойкости тестовых структур и микросхем на рентгеновских установках.

В ходе защиты были высказаны критические замечания:

1. Не показана применимость предложенного метода диагностики для слоев диоксида кремния толщиной порядка нескольких нанометров и для слоев других диэлектрических материалов.
2. Не решен вопрос выбора расположения структур для контроля на полупроводниковой пластине для снижения влияния разброса параметров по пластине на точность прогнозирования.

Соискатель Ширяев Алексей Александрович согласился с высказанными замечаниями. Все замечания и пожелания будут учтены в дальнейшей научно-исследовательской работе.

На заседании 06.06.2024 г. диссертационный совет принял решение – за новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития страны, а именно за разработку технических решений по прогнозированию дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния, присудить Ширяеву Алексею Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по специальности 2.2.8, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Раевский Алексей Сергеевич

Белов Юрий Георгиевич

06.06.2024