

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева»



К.Х.Н.

Ф.А. Колоколов

«15» 04 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ширяева Алексея Александровича

«Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Ширяева А.А. посвящена разработке нового метода диагностики слоев диоксида кремния, позволяющего прогнозировать дозовую радиационную стойкость МОП-транзисторов и микросхем на их основе. Испытания микросхем на стойкость к воздействию ионизирующего излучения требуют временных затрат, а также затрат на материалы, оборудование. Таким образом, актуальной задачей является разработка методов, позволяющих без использования излучения прогнозировать радиационную стойкость микросхем. Кроме того, такие методы должны давать возможность обратной связи с технологией полупроводниковых структур для обеспечения требуемого уровня стойкости. Вольт-амперные характеристики диэлектрических слоев позволяют провести оценку количества некоторых дефектов в слое и выявить их технологическую природу. В связи с этим тему диссертации следует считать актуальной.

Оценка структуры и содержания работы

Содержание диссертации излагается последовательно и в полном соответствии с поставленной целью и задачами исследования. Объем диссертации составляет 131 страницу. Работа состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, содержащего основные выводы по диссертации, перечня используемой литературы из 80 наименований и приложения, содержащего акт внедрения результатов диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, описана практическая значимость и научная новизна работы.

В первой главе на основе анализа литературных данных автор приводит сведения о дефектах в слоях диоксида кремния и методах их диагностики, среди которых выделяются методы, основанные на облучении тестовых структур, электронном парамагнитном резонансе, измерении коэффициента низкочастотного шума транзистора. Автор показывает, что необходима разработка нового метода, который обладая достоинствами рассмотренных методов (достоверность и возможность идентификации дефектов), не требовал бы источников ионизирующего излучения, был бы неразрушающим и экспрессным.

Во второй главе предложен и описан метод диагностики слоев диоксида кремния, основанный на анализе вольт-амперных характеристик диэлектрического слоя. Предложен коэффициент дефектности слоя, включающий параметры, определяемые из вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик тестовых МОП-конденсаторов, содержащих исследуемый диэлектрический слой. Описаны тестовые структуры, блок-схема измерительного комплекса, алгоритм измерений. С применением методов спектральной эллипсометрии и электронного парамагнитного резонанса показана корректность оценки дефектности слоя диоксида кремния предложенным методом.

В третьей главе описана новая модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате воздействия ионизирующего излучения на основе контроля тока утечки подзатворного оксида до и после воздействия.

Модель основана на объединении известной зависимости изменения порогового напряжения при облучении от концентрации центров захвата заряда в подзатворном оксиде и выражения, описывающего вольт-амперную характеристику подзатворного оксида, а также на сведениях о природе дефектов в слое оксида, полученных при апробации метода и представленных во второй главе. В результате автором выведена новая формула зависимости сдвига порогового напряжения МОП-транзистора в результате облучения от плотности тока утечки подзатворного оксида до облучения.

В четвертой главе предложен алгоритм отбраковки изделий на основании прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем в процессе производства. Алгоритм основан на контроле предложенного коэффициента дефектности на этапе отработки технологии и плотности тока утечки слоя диоксида кремния на этапе рабочих партий. Представлены результаты применения данного алгоритма на практике. Контроль коэффициента дефектности показал, что дефектность слоя подзатворного диоксида снизилась благодаря введению дополнительной операции отжига кремниевой подложки перед получением подзатворного оксида. Было показано, что применение контроля плотности тока утечки позволяет отбраковывать потенциально нестойкие микросхемы, что способствует снижению затрат на испытания микросхем.

В заключении перечислены основные выводы по диссертации. В приложении представлен акт внедрения результатов диссертации.

Научная новизна полученных результатов

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная задача разработки метода диагностики слоев диоксида кремния, позволяющего прогнозировать дозовую радиационную стойкость микросхем. К результатам, обладающим научной новизной, следует отнести следующие:

1. Показана принципиальная возможность прогнозирования величины заряда, накапливаемого в диэлектрическом слое в результате облучения, с помощью анализа вольт-амперных характеристик слоя.

2. Разработан новый метод диагностики слоев диоксида кремния, основанный на анализе вольт-амперных характеристик диэлектрического слоя, и предложен коэффициент дефектности, отражающий дефектность и радиационную чувствительность слоя диоксида кремния.

3. Разработана новая модель деградации порогового напряжения МОП-транзистора в результате облучения на основе контроля тока утечки подзавторного оксида, позволяющая прогнозировать радиационную стойкость МОП-транзисторов.

4. Показано наличие корреляции изменения статического тока потребления микросхем в результате облучения и плотности тока утечки слоев диоксида кремния до облучения, что свидетельствует о возможности отбраковки потенциально не стойких микросхем.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость результатов, представленных в диссертации, заключается в следующем:

1. Разработанный метод диагностики не требует специального оборудования и полностью интегрируется в типовые процессы контроля при изготовлении микросхем.

2. Определены режимы измерений вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния с учетом влияния помех на результаты измерений и деградации структуры диэлектрика в результате подачи напряжения на диэлектрический слой в процессе измерений.

3. Определены режимы электрической имитации радиационного воздействия на слой диоксида кремния, которая может применяться в качестве альтернативы рентгеновской имитации радиационного воздействия.

4. Разработан алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, использование которого позволяет повысить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии и снизить затраты на испытания микросхем.

Достоверность результатов исследований

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена корректной постановкой задач, хорошей степенью соответствия результатов моделирования и результатов эксперимента, а также использованием различных экспериментальных методов для подтверждения адекватности оценки дефектности слоев диоксида кремния предложенным методом диагностики. Полученные результаты не противоречат результатам, полученным другими исследователями. Основное содержание диссертации представлено в 15 публикациях. Из них 6 статей опубликовано в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций, 2 из которых входят в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Реализация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы внедрены в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» при разработке методов прогнозирования радиационной стойкости КМОП-микросхем и технологических процессов изготовления микросхем с повышенной надежностью и радиационной стойкостью, а также при анализе причин брака микросхем.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы Ширяева А.А. обладают как научной новизной, так и практической значимостью. Они могут быть использованы в производстве микросхем с повышенной дозовой радиационной стойкостью при оценке качества диэлектрических слоев и снижению их дефектности, применении электрической имитации радиационного воздействия на тестовые структуры,

обеспечении требуемого уровня радиационной стойкости микросхем путем оптимизации технологии получения слоев и снижении затрат на испытания микросхем путем отбраковки потенциально не стойких чипов. Результаты диссертации могут найти применение на предприятиях, специализирующихся на разработке, производстве и испытаниях изделий микроэлектроники: филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород), АО «НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон» (г. Москва, Зеленоград), ФГУ ФНЦ НИИ системных исследований Российской академии наук (г. Москва), АО «Экспериментальное научно-производственное объединение Специализированные электронные системы» (г. Москва) и других.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В обзоре литературы (глава 1) автор в подавляющем большинстве подписей к рисункам не указывает ссылки на оригинальные источники.
2. При описании результатов, полученных с помощью инструментальных методов измерения (ВИМС стр.77, ЭПР стр. 71) автор не расшифровывает марку и/или технические характеристики приборов, а также условия и место проведения анализов. Общепринятой практикой в данном случае является также упоминание исполнителя проводимых инструментальных измерений с указанием его квалификации.
3. 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.
4. Автор не приводит информацию о топологических нормах изготовления полупроводниковых изделий, на которых проводились исследования. Возникает вопрос о применимости метода для оценки радиационной стойкости кремниевых полупроводниковых микросхем, изготовленных по различным топологическим нормам в диапазоне 200-65 нм и с

перспективой на 28 нм, которую собираются освоить в РФ в ближайшей перспективе.

5. В работе упоминается о том, что предложенный метод диагностики позволяет идентифицировать дефекты в слое диоксида кремния, но в работе он применяется в основном для оценки количества дефектов в предположении, что основной вклад в наблюдаемые эффекты вносят центры трехкоординированного кремния, междоузельного кремния и вакансии кислорода. Следовало бы продемонстрировать это преимущество метода на практике.

6. В главе 4 автор фактически приводит алгоритм выборки микросхем с повышенной радиационной стойкостью (рис.4.3, стр. 106) с помощью разработанного метода диагностики диэлектрических слоев и модели деградации порогового напряжения МОП-транзисторов, а не алгоритм прогнозирования, как заявлено в диссертации.

Отмеченные замечания не снижают значимость полученных результатов и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку работы.

Заключение.

Диссертационная работа Ширяева А.А. на тему «Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных соискателем исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области прогнозирования радиационной стойкости микросхем, имеющие существенное значение для развития отечественной базы микроэлектроники. По своему содержанию диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по направлениям исследования п.1. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надежности изделий и

экологической безопасности окружающей среды; п.2. Разработка методологий прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса изделий, направляющих оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, повышение надежности изделий и экологической безопасности окружающей среды; п.3. Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надежности изделий и экологической безопасности окружающей среды и удовлетворяет критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» (утв. постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Ширяев Алексей Александрович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Диссертация была рассмотрена, отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры химии и технологии кристаллов «05» апреля 2024 года, протокол № 9.

Председатель заседания
кафедры, д.х.н., профессор

Петрова Ольга Борисовна

Секретарь заседания кафедры,
к.т.н., доцент

Файков Павел Петрович

Сведения об организации:

Наименование: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Почтовый адрес: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

Контактный телефон: (499) 978-86-60

Адрес электронной почты: rochta@mustr.ru