

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Ширяева Алексея Александровича  
на тему «Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем  
на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды

Работа Ширяева А.А. посвящена разработке метода оперативной оценки радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, не требующего использования ионизирующего излучения, и опыту внедрения разработанного метода в процесс прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем.

**Актуальность работы не вызывает сомнений**, поскольку радиационно стойкие микросхемы, выполненные на структурах «кремний-на-изоляторе» (КНИ), обладают высокой стойкостью к воздействию отдельных ядерных частиц и импульсному ионизирующему излучению, но при этом не являются стойкими к воздействию стационарного ионизирующего излучения.

Наиболее распространенной технологией изготовления структур КНИ является метод *SmartCut*, когда слой захороненного оксида получают термическим окислением кремния; слой подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов традиционно также получают термическим окислением. При этом радиационная стойкость микросхем может значительно варьироваться в пределах одной партии как от пластины к пластине, так и в пределах одной пластины. Причиной разброса параметров микросхем является неконтролируемое неравномерное распределение дефектных центров захвата заряда в подзатворном оксиде – в случае КМОП-микросхем на объемном кремнии (КМОП ИС) или в захороненном оксиде – в случае КМОП-микросхем на КНИ (КМОП КНИ ИС).

Предложенный автором метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния основан на измерении и анализе до облучения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) тестовых МОП-конденсаторов, изготовленных в едином технологическом процессе с

исследуемыми микросхемами. Такой подход позволяет проводить оперативную оценку дефектности слоев диоксида кремния, обеспечивая обратную связь с параметрами технологического процесса изготовления микросхем. Установленная зависимость дозовой радиационной стойкости МОП-транзисторов (при облучении) от параметров дефектности подзатворного оксида (до облучения) используется для прогнозирования радиационной стойкости микросхем – внедрение предложенного метода позволяет отбраковывать потенциально не стойкие микросхемы, снижая временные и материально-технические затраты при производстве микросхем.

**В диссертационной работе автором получены следующие новые научные результаты:**

– показана возможность применения результатов анализа ВАХ слоев диоксида кремния для прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем;

– разработан метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ диэлектрика и предложен коэффициент, характеризующий дефектность слоя;

– предложена и обоснована модель влияния дефектных центров в слоях диоксида кремния на дозовую радиационную стойкость МОП-транзисторов;

– выявлены корреляционные зависимости изменения статического тока потребления микросхем в результате облучения и тока утечки слоев диоксида кремния до облучения, позволяющие прогнозировать дозовую радиационную стойкость микросхем.

**Наиболее важные практические результаты, полученные автором в ходе исследований,** заключаются в том, что разработанный автором метод интегральной оценки дефектности, определяющий ионизационную реакцию слоев ТДК (термического диоксида кремния), может быть совмещен с типовым контролем электрических параметров тестовых структур на пластине с кристаллами микросхем, используя при этом стандартное оборудование.

Автором научно обоснован выбор оптимальных режимов измерений ВАХ слоев диоксида кремния, позволяющих снизить влияние переходных процессов и

помех при минимальной деградации структуры диэлектрика, и оптимальных режимов электрической имитации радиационного воздействия на слои диоксида кремния с помощью инъекции носителей заряда при ограничении длительности имитации.

Данные параметры легли в основу разработанного автором алгоритма прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, позволяющего повысить выход годных радиационно стойких микросхем в партии. Экспериментальная отработка предложенного автором метода диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ диэлектрика проводилась в Филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова». Установленные зависимости реализованы в технологической инструкции, предназначенной для прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, изготавливаемых в режиме фаундри, посредством контроля порогового напряжения паразитных транзисторов. Доказанный экономический эффект от внедрения результатов работы заключается в уменьшении трудоемкости работ по исследованию надежности и стойкости к спецвоздействиям элементов интегральных микросхем в рамках ОКР на 15 %.

**Достоверность и обоснованность результатов,** выводов и рекомендаций, приведенных в работе, подтверждается хорошей корреляцией результатов, полученных посредством предложенной автором методики диагностики радиационной чувствительности слоев диэлектрика, с экспериментальными результатами, полученными с применением методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и спектральной эллипсометрии.

Результаты исследований, выполненных автором по теме диссертации, были использованы при выполнении НИР по разработке методов прогнозирования радиационной стойкости КМОП-микросхем, технологических процессов изготовления микросхем с повышенной надежностью и радиационной стойкостью, а также при анализе причин брака микросхем. Эти результаты известны

специалистам, доведены до конкретных расчетных методик и технологических инструкций.

Представленные в диссертации научные и практические результаты неоднократно докладывались на всероссийских научно-технических конференциях, опубликованы в 6 статьях (из которых две статьи – в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК по специальности 2.2.8; две статьи – в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science).

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертационной работы.

**Личное творческое участие автора** заключается в следующем:

– решены теоретические, методические и практические задачи разработки метода диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, включая проведение измерений и анализ полученных результатов;

– обоснована зависимость, описывающая модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения на основе контроля тока утечки подзатворного диэлектрика;

– проведены экспериментальные исследования диэлектрических слоев с использованием ртутного зонда, методами ЭПР и эллипсометрии, а также радиационные испытания тестовых структур и микросхем.

**По существу диссертационной работы Ширяева А.А. можно отметить следующие недостатки, высказать замечания и рекомендации:**

1. В главе 1 недостаточно внимания уделено методам расчетно-экспериментального моделирования радиационного поведения КМОП-микросхем.

2. В главе 3, посвященной разработке модели, следовало бы отметить возможное применение результатов исследований для разработки компактных моделей транзисторов для схемотехнических симуляторов.

3. 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.

4. В работе не приведены оценки погрешностей в следствии сделанных упрощений и допущений при построении модели.

5. В тексте диссертации содержится ряд неточностей и опечаток:

– отсутствуют размерности параметров критериальных функций и физических величин в пояснениях к формулам;

– рисунки, заимствованные из зарубежных источников, не переведены на русский язык, а по тексту диссертации в качестве десятичного разделителя используется точка вместо запятой по ГОСТ 8.417 «Единицы величин»;

– для различных физических величин используются одинаковые буквенные обозначения ( $D$  на стр.12 – доза излучения, а на стр.39 – коэффициент прозрачности;  $E$  на стр.18 и 52 – напряженность электрического поля, а на стр.40 – энергия электрона);

– допущен ряд опечаток (л. 15, 51, 66, 84);

– в тексте диссертации отсутствует ссылка на п.79 Списка цитируемой литературы.

Несмотря на отмеченные недостатки, следует отметить, что диссертационная работа Ширяева А.А. выполнена на высоком научном уровне, содержит решение научной задачи, позволяющей прогнозировать радиационную стойкость микросхем и снизить трудоемкость работ по исследованию надежности и стойкости к спецвоздействиям элементов интегральных микросхем.

Положения, вынесенные на защиту, научно обоснованы, вытекают из содержания работы, а полученные результаты реализованы, в частности, в технологической инструкции, позволяющей на практике увеличить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии путем отсека большого числа микросхем с низкой стойкостью.


Работа написана хорошим языком, отличается ясным стилем изложения материала, хорошо иллюстрирована.

Исследования автора представляют интерес для разработчиков радиационно стойких микросхем и инженеров-технологов, занятых на производстве интегральных микросхем с повышенными показателями стойкости и надежности.

Содержание диссертации соответствует выбранной специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Диссертационная работа Ширяева А.А. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на современном уровне и соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Ширяев Алексей Александрович, достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Бутина Анастасия Валентиновна,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИА»

  
02.05.2024

Подпись А.В. Бутиной заверяю  
Ученый секретарь НТС ФГУП «ВНИИА»,  
кандидат технических наук,  
Феоктистова Любовь Валерьевна

  
  
02.05.2024

Россия, 127055, Москва, Сущевская ул., д.22  
Тел.: (499) 978-7803  
Факс: (499) 978-0903, 978-0578  
E-mail: [vniiia@vniiia.ru](mailto:vniiia@vniiia.ru)