

На правах рукописи



Ширяев Алексей Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЗОВОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
КМОП-МИКРОСХЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2024 г.

Работа выполнена в лаборатории исследования физико-химических свойств структур и материалов радиационно-стойкой электронной компонентной базы филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Научный руководитель:	Воротынец Владимир Михайлович доктор химических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Ежевский Александр Александрович доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород)
	Бутина Анастасия Валентиновна кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» (г. Москва)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико- технологический университет имени Д.И. Менделеева» (г. Москва)

Защита состоится «6» июня 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.345.01 на базе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева по адресу: 693155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева и на сайте университета по адресу:

<http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.345.01



Белов Юрий Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В различных областях промышленности (атомной энергетике, космической и оборонной промышленности) существует потребность в электронной компонентной базе с повышенной стойкостью к воздействию ионизирующего излучения (ИИ). В данных областях используется множество функциональных классов микросхем, большинство из которых производятся по технологии на основе комплементарной структуры «металл-оксид-полупроводник» (КМОП-технология). Современной тенденцией в микроэлектронике, в особенности радиационно-стойкой, а также в радиофотонике является применение структур «кремний-на-изоляторе» (КНИ) в качестве исходных пластин, в которых приборный слой кремния отделен от кремниевой подложки слоем диоксида кремния (захороненный оксид). Использование таких структур значительно повышает стойкость КМОП-микросхем к воздействию отдельных ядерных частиц и импульсному ионизирующему излучению по сравнению с микросхемами на пластинах объемного кремния. Однако проблема обеспечения стойкости к дозовому воздействию стационарного ионизирующего излучения становится более острой. Это связано с тем, что одним из основных механизмов выхода из строя микросхем при высокой накопленной дозе является образование проводящего канала на границе приборного слоя и захороненного оксида структуры КНИ вследствие накопления положительного электрического заряда в захороненном оксиде.

В рамках наиболее распространенной современной технологии изготовления структур КНИ (метод *SmartCut*) захороненный оксид представляет собой слой, полученный термическим окислением кремния [1]. При этом общепринятым методом получения подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов также является термическое окисление. Накопление радиационно-индуцированного заряда в подзатворном оксиде приводит к смещению вольт-амперных характеристик (ВАХ) МОП-транзисторов и изменению параметров микросхем. Процессы накопления заряда в захороненном оксиде и подзатворном оксиде хорошо изучены [2]. Однако на практике результаты моделирования зачастую не соответствуют результатам радиационных испытаний микросхем. Более того, радиационная стойкость микросхем может значительно варьироваться в пределах одной партии как от пластины к пластине, так и в пределах одной пластины. Поскольку микросхемы, принадлежащие одной партии, изготавливаются в едином технологическом процессе, можно предположить, что причиной нестабильности радиационной стойкости 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). В случае микросхем на структурах «кремний-на-сапфире» (КНС) ситуация осложняется повышенной дефектностью

приборного слоя кремния и присутствием в нем примеси алюминия. Таким образом, необходима разработка методов диагностики радиационной чувствительности диэлектрических слоев и внедрение этих методов в процессы контроля при производстве радиационно-стойких микросхем.

Цель и задачи работы

Целью данной работы являлась разработка метода диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, не требующего использования ионизирующего излучения, и внедрение разработанного метода в процессы прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем. Для этого решались следующие задачи:

1) разработка метода диагностики слоев диоксида кремния на основе анализа вольт-амперных характеристик этих слоев;

2) проведение диагностики разработанным методом для получения информации о структуре диэлектрика и ее зависимости от технологии получения слоя;

3) проведение электрической и рентгеновской имитации радиационного воздействия на тестовые структуры и микросхемы;

4) моделирование изменения параметров МОП-транзисторов в результате облучения на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения;

5) разработка алгоритма прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем в процессе производства.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» согласно следующим пунктам паспорта специальности:

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.

Научная новизна работы

1. Показана возможность применения результатов анализа ВАХ слоев диоксида кремния для прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем.

2. Разработан метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ этих слоев и предложен коэффициент, характеризующий дефектность слоя.

3. Построена модель влияния дефектных центров в слоях диоксида кремния на дозовую радиационную стойкость МОП-транзисторов.

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

Практическая значимость работы

1. Разработанный метод диагностики прост в реализации на стандартном оборудовании и не требует использования ионизирующего излучения, благодаря чему для снижения стоимости и ускорения процессов контроля он может быть совмещен с типовым контролем электрических параметров тестовых структур на пластине с кристаллами микросхем.

2. Определены оптимальные режимы измерений ВАХ слоев диоксида кремния, позволяющие снизить влияние переходных процессов и помех при минимальной деградации структуры диэлектрика.

3. Определены оптимальные режимы электрической имитации радиационного воздействия на слои диоксида кремния с помощью инъекции носителей заряда при ограничении длительности имитации.

4. Разработан алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, позволяющий повысить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ диэлектрического слоя.

2. Модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов под действием ионизирующего излучения на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения.

3. Алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем в процессе производства, основанный на анализе ВАХ слоев диоксида кремния.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы обеспечена применением методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и спектральной эллипсометрии для подтверждения результатов, полученных разработанным методом диагностики. Разработка модели базировалась на научно обоснованном объединении известной зависимости радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзистора от концентрации ловушек носителей заряда в подзатворном оксиде и известных выражений, описывающих ВАХ диэлектрического слоя.

Апробация диссертации

Основные результаты работы докладывались на «Нижегородской сессии молодых ученых» (г. Нижний Новгород, ННГУ, 2015, 2016, 2018, 2019), всероссийских конференциях «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014), «Молодежь в науке (г. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014, 2018), отраслевой «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (г. Нижний Новгород, 2021), а также на 10-ом международном семинаре молодых ученых и специалистов «Современные методы исследования и моделирования материалов» (г. Москва, ВНИИА, 2018).

Публикации

По теме диссертации опубликовано:

- 1) 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по специальности 2.2.8;
- 2) 2 статьи в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science;
- 3) 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов по другим специальностям.

Также опубликовано 9 работ в материалах научных конференций.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно предложил метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, разработал алгоритм его применения, произвел измерения по данному методу и провел анализ их результатов. Автор предложил и обосновал выражение, описывающее модель деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения на основе контроля тока утечки подзатворного диэлектрика. Исследования диэлектрических слоев с использованием ртутного зонда, методами ЭПР и эллипсометрии, а также облучение тестовых структур и микросхем проводились при непосредственном участии автора.

Информация о внедрении

Результаты работы внедрены в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» при выполнении НИР по 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. Акт внедрения прилагается к диссертации.

Связь темы диссертации с научно-техническими программами

Исследования частично проводились при финансовой поддержке Программы академического лидерства «Приоритет 2030» ННГУ (проект Н-474-99_2021-2023).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, содержащего акт внедрения результатов диссертационной работы. Общий объем диссертации составляет 131 страницу, включая 78 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описана актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи работы, отмечены ее новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, указаны результаты апробации работы и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации рассмотрены природа и свойства дефектов, определяющих радиационную чувствительность слоя диоксида кремния, и методы экспериментального исследования этих дефектов. Дефекты разделены на три вида: собственные, к которым относятся вакансии кислорода, трехкоординированный кремний, междоузельный кремний и др; примесные, включающие легирующие примеси, попадающие из кремния, щелочные металлы, алюминий, проникающий из сапфира и др; а также дефекты, возникающие вследствие релаксации механических напряжений и включающие напряженные связи, утонения и трещины.

Основной метод прогнозирования дозовой радиационной стойкости МОП-транзисторов [3-5] заключается в измерении высокочастотной вольт-фарадной характеристики (ВФХ) МОП-конденсатора или ВАХ транзистора в процессе радиационного воздействия на статистически значимой выборке с последующим распространением этих результатов на рабочие партии. К недостаткам этого метода следует отнести большие временные и материальные затраты, влияние технологического разброса на точность прогнозирования. Кроме того, этот метод не позволяет разделить различные эффекты, влияющие на сдвиг характеристик тестовых структур, и связать напрямую процессы деградации с параметрами технологии получения структур. Помочь устранить эти недостатки помогает метод

на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [6]. Он позволяет идентифицировать дефекты, но в то же время он требует специального оборудования и является разрушающим, что также затрудняет учет технологического разброса.

Среди перспективных методов, представленных в литературе, следует также выделить метод, основанный на инжекции носителей заряда в диэлектрический слой через инжектирующий контакт [7], а также метод на основе контроля низкочастотного шума тока в канале транзистора [8]. При этом первый является достаточно трудоемким вследствие необходимости создания инжектирующего контакта, а второй требует специального оборудования, что усложняет задачу совмещения метода с типовым контролем электрических параметров тестовых структур с целью повышения технологичности процесса контроля.

В связи с этим был сделан вывод о необходимости разработки метода диагностики слоев диоксида кремния, который позволил бы проводить оперативный контроль в процессе изготовления микросхем, был бы неразрушающим, что позволило бы снизить влияние технологического разброса на результат контроля за счет возможности проведения испытаний на тех же образцах. Кроме того, требованием к методу являлась возможность идентификации дефектов для обеспечения обратной связи с параметрами технологического процесса получения слоев. Также был сделан вывод о необходимости разработки модели влияния дефектности подзатворного оксида на дозовую стойкость МОП-транзисторов, которая в совокупности с методом диагностики дала бы возможность прогнозировать дозовую радиационную стойкость МОП-транзисторов и микросхем на их основе.

Во **второй главе** предложен и разработан метод диагностики слоев диоксида кремния, основанный на анализе ВАХ диэлектрического слоя.

В литературе [9-10] подробно описаны механизмы электропроводности диэлектрических слоев, в частности слоев диоксида кремния. Однако эти исследования не были направлены на прогнозирование дозовой радиационной стойкости микросхем. Кроме того, наблюдается недостаток систематизации результатов и исследований связи ВАХ с параметрами технологического процесса получения слоя SiO_2 . Между тем, различные механизмы электропроводности так или иначе связаны с дефектностью в объеме слоя или на границах раздела. При этом различные дефекты взаимодействуют между собой, что известно под термином «геттерирование» [11]. Поэтому анализ различных участков ВАХ слоя SiO_2 может позволить идентифицировать дефекты и в то же время диагностировать слой в целом с целью прогнозирования количества накопленного на дефектах заряда в результате радиационного воздействия. Это и стало отправной точкой в разработке представленного в настоящей диссертации метода диагностики слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ этих слоев.

Был проведен большой объем измерений ВАХ слоев диоксида кремния, дефектность которых оказывает непосредственное влияние на дозовую стойкость КМОП-микросхем: влажного и сухого подзатворного оксида на объемном кремнии и на структурах КНС и захороненного оксида структур КНИ. Кроме того, были исследованы ВАХ диэлектрических слоев, выступающих в микросхеме в качестве боковой, межслойной и межуровневой изоляции, пассивации, спейсеров и вспомогательных слоев. На рисунке 1 в качестве примера представлены типичные экспериментальные ВАХ подзатворного оксида на объемном кремнии, а также участки ВАХ, рассчитанные на основе различных моделей электропроводности.

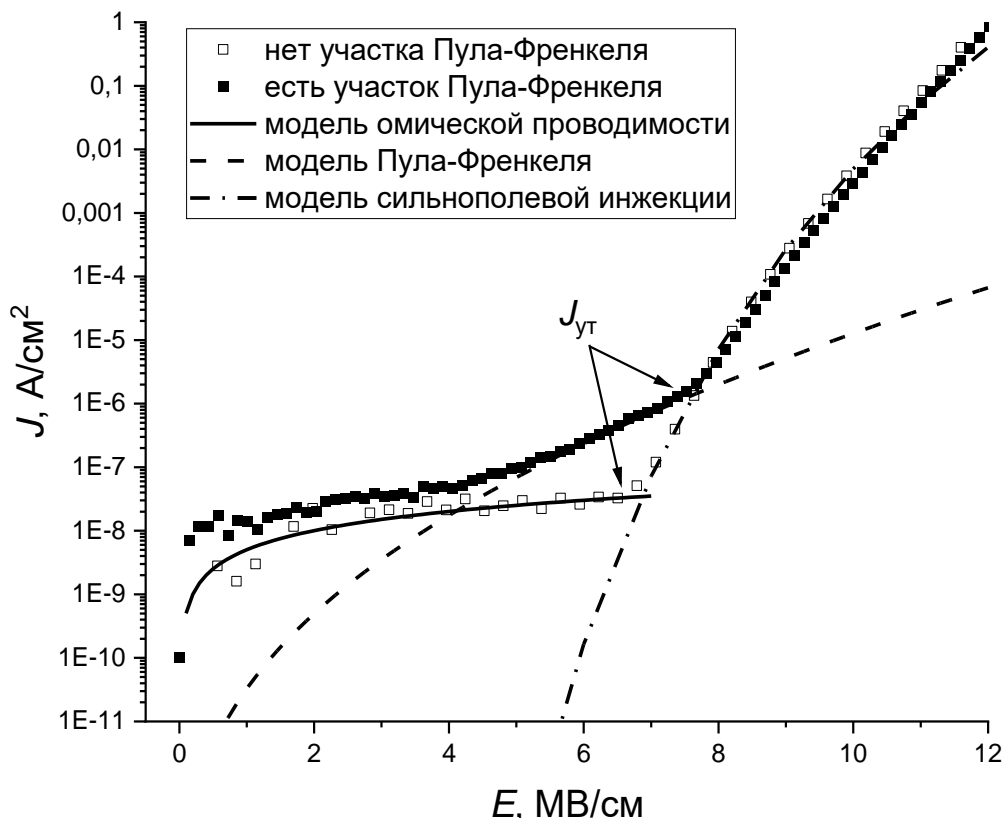


Рисунок 1 – Типичные экспериментальные ВАХ подзатворного оксида на объемном кремнии и теоретические участки омической проводимости, эффекта Пула-Френкеля и сильнополевой инжекции с указанием точек, соответствующих параметру плотности тока утечки $J_{ут}$

Для оценки дефектности диэлектрического слоя в настоящей работе предложено использовать коэффициент, включающий параметры, экстрагируемые из вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик тестовых конденсаторов, содержащих исследуемый диэлектрический слой. Предложена следующая формула для расчета коэффициента дефектности:

$$\xi = \alpha + \beta = \frac{d_{ox}}{l} N_D \sigma + \frac{m_0}{m^*} \frac{l}{d_{ox}}, \quad (1)$$

где d_{ox} – толщина диэлектрического слоя; l – длина потенциального барьера, соответствующая началу сильнополевой инжекции; N_D – поверхностная

концентрация донорных центров в диэлектрике, участвующих в проводимости; σ – эффективное сечение захвата дефектных центров; m_0 – масса покоя электрона; m^* – туннельная эффективная масса электрона при сильнополевой инжекции.

Следует отметить, что коэффициент ζ позволяет комплексно диагностировать диэлектрический слой, поскольку он учитывает параметры, получаемые из различных участков ВАХ, причем он применим к множеству диэлектрических материалов. Слагаемое α отражает дефектность объема слоя, а слагаемое β – качество границы раздела.

Описаны тестовые структуры для проведения контроля на полупроводниковой пластине, которые представляют собой МОП-конденсаторы, предназначенные для исследования подзатворного оксида, и конденсаторы, образованные структурой КНИ, предназначенные для исследования захороненного оксида.

На рисунке 2 представлена блок-схема измерительного комплекса. Измерения вольт-фарадных характеристик проводились при частоте 1 МГц с помощью четырехпроводного модуля измерителя емкости, работающего в режиме автобалансировки. Для измерений ВАХ применяется два модуля источника напряжения с функцией измерения тока с разрешением по току 10 фА, подключаемые к нижней и верхней обкладке тестового конденсатора. Кремниевая пластина с тестовыми конденсаторами размещается на рабочем столике зондовой системы. Посредством зондов создается электрический контакт к выводам конденсатора. Соединение измерительных модулей и выводов конденсатора выполняется с помощью матричного коммутатора. Измерения автоматизируются посредством интерфейса GPIB в соответствии с алгоритмом измерений.

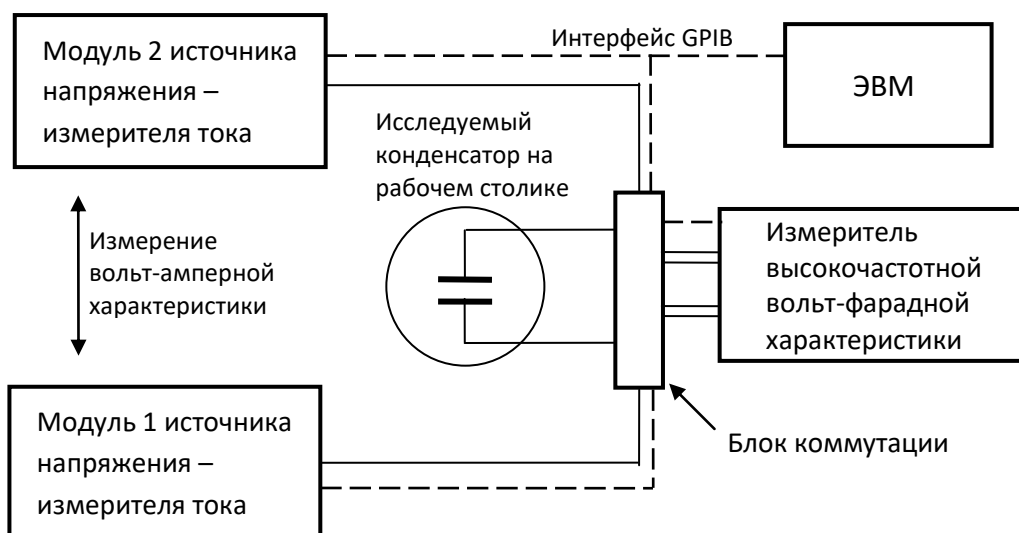


Рисунок 2 – Блок-схема измерительного комплекса

На рисунке 3 представлен алгоритм измерений. В начале измерений блок коммутации соединяет контакты с низким и высоким потенциалами измерителя емкости соответственно с нижней и верхней обкладками тестового конденсатора,

содержащего исследуемый диэлектрический слой. Производится измерение вольт-фарадной характеристики. Затем блок коммутации отключает от конденсатора измеритель емкости и подключает два модуля источника напряжения с функцией измерения тока каждый к своей обкладке тестового конденсатора. Производится измерение ВАХ. Затем напряжение устанавливается на уровне стресса и выдерживается в течение некоторого интервала времени с контролем заряда, протекающего через диэлектрик. Напряжение стресса соответствует предпробойному состоянию, а длительность стресса выбирается достаточной для определения параметра σ для формулы (1) с достаточной точностью. Далее блок коммутации снова переключает тестовый конденсатор к измерителю емкости. Измеряется повторная вольт-фарадная характеристика в том же режиме. На каждом этапе путем моделирования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик производится экстракция соответствующих параметров, входящих в формулу (1). Сдвиг вольт-фарадной характеристики в результате стресса в совокупности с измеренным зарядом Q_i , протекающим через диэлектрик, несет информацию об эффективном сечении захвата σ .

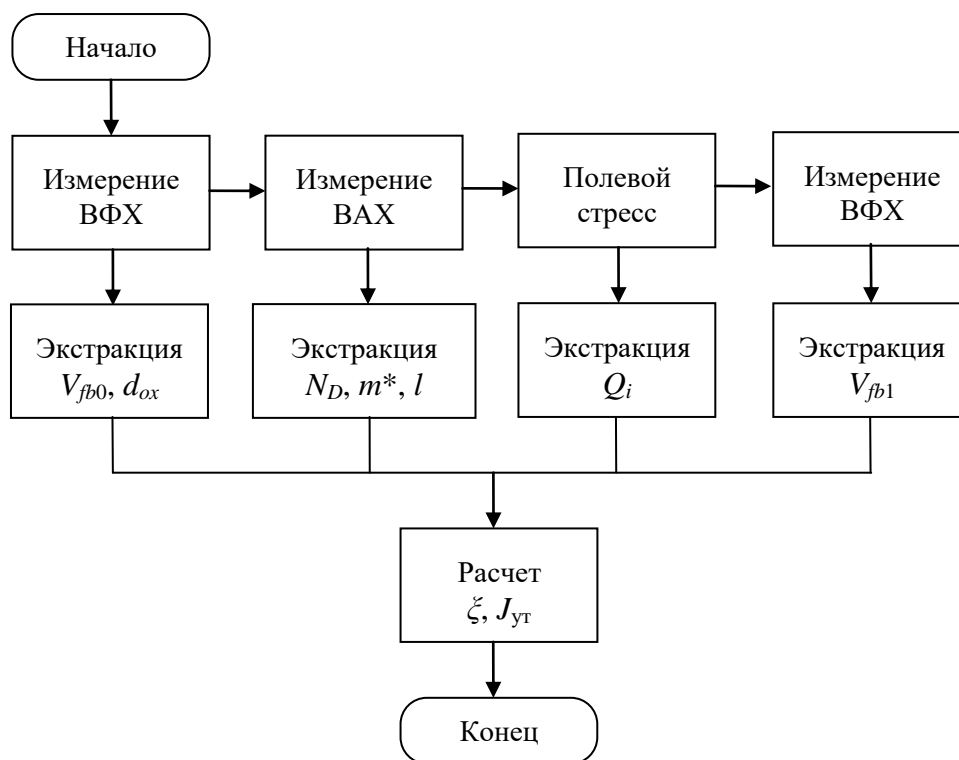


Рисунок 3 – Алгоритм измерений. Здесь V_{fb0} и V_{fb1} – напряжение плоских зон конденсатора до и после измерений ВАХ и полевого стресса

Следует отметить, что коэффициент ζ целесообразно применять для диагностики диэлектрического слоя в целом путем его усреднения по партии или виду слоя, а для учета технологического разброса в пределах партии в качестве параметра диагностики использовать плотность тока утечки $J_{ут}$ (см. рисунок 1).

На рисунке 4 представлены экспериментальные значения коэффициента α , характеризующего дефектность объема слоя, коэффициента β , отражающего качество границы раздела, и суммарного коэффициента дефектности ξ в виде зависимостей α и β от ξ для четырех слоев диоксида кремния, изготовленных по разным технологиям. Видно, что дефектность возрастает в следующей последовательности: термический подзатворный оксид на объемном кремнии, термический подзатворный оксид на КНС, захороненный оксид структуры КНИ, изготовленной по методу *SmartCut*, захороненный оксид структуры КНИ, изготовленной по методу *SIMOX*. Из соотношения α и β видно, что в случае подзатворного оксида дефектность определяется, в первую очередь, границей раздела, а в случае захороненного оксида – объемом слоя.

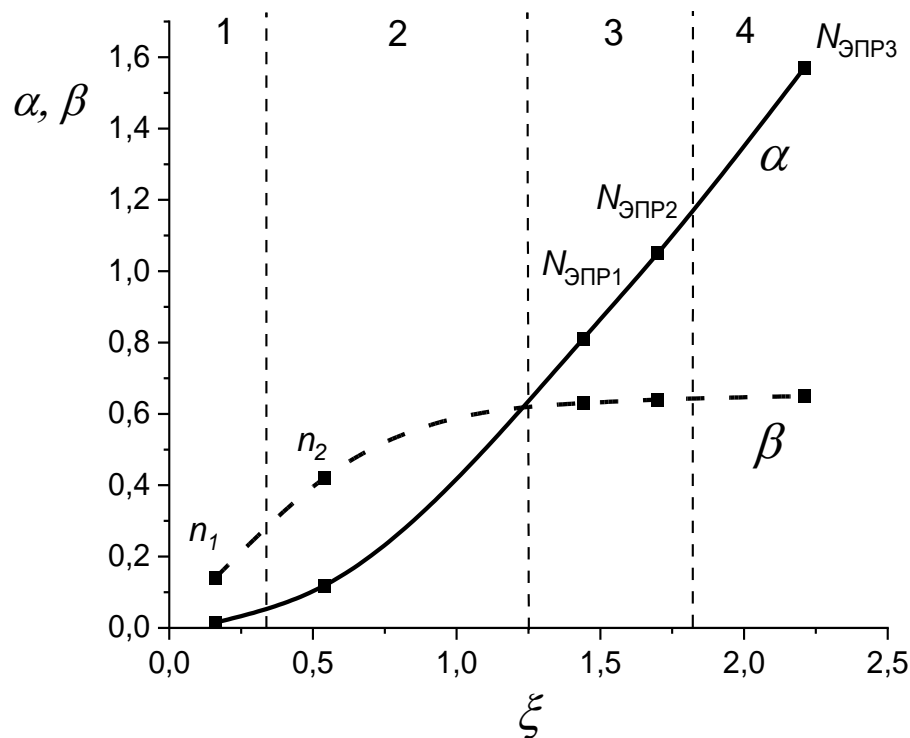


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента α , характеризующего дефектность объема слоя, и коэффициента β , отражающего качество границы раздела, от суммарного показателя дефектности ξ .

Здесь 1 – термический оксид на объемном кремнии; 2 – термический оксид на КНС; 3 – захороненный оксид структуры КНИ (*SmartCut*); 4 – захороненный оксид структуры КНИ (*SIMOX*)

Для того чтобы показать, что предложенный коэффициент адекватно отражает дефектность диэлектрического слоя, были проведены исследования слоев диоксида кремния другими методами. На рисунке 4 показано, что для подзатворного оксида на объемном кремнии и КНС были измерены показатели преломления $n_1 = 1.453$ и $n_2 = 1.422$ для переходного слоя на границе оксида и кремния методом спектральной эллипсометрии. Для захороненного оксида были измерены концентрации парамагнитных центров $N_{ЭПР1} = 1.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_{ЭПР2} = 1.18 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $N_{ЭПР3} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, оказавшиеся пропорциональными с коэффициентом, примерно равным 20, концентрации донорных центров N_D , определяемой из ВАХ. На рисунке 5 представлен спектр ЭПР структуры КНИ, изготовленной по методу *SmartCut*.

Результаты, полученные методами эллипсометрии и ЭПР-анализа, подтверждают справедливость оценки дефектности слоя диоксида кремния с помощью разработанного в настоящей главе метода.

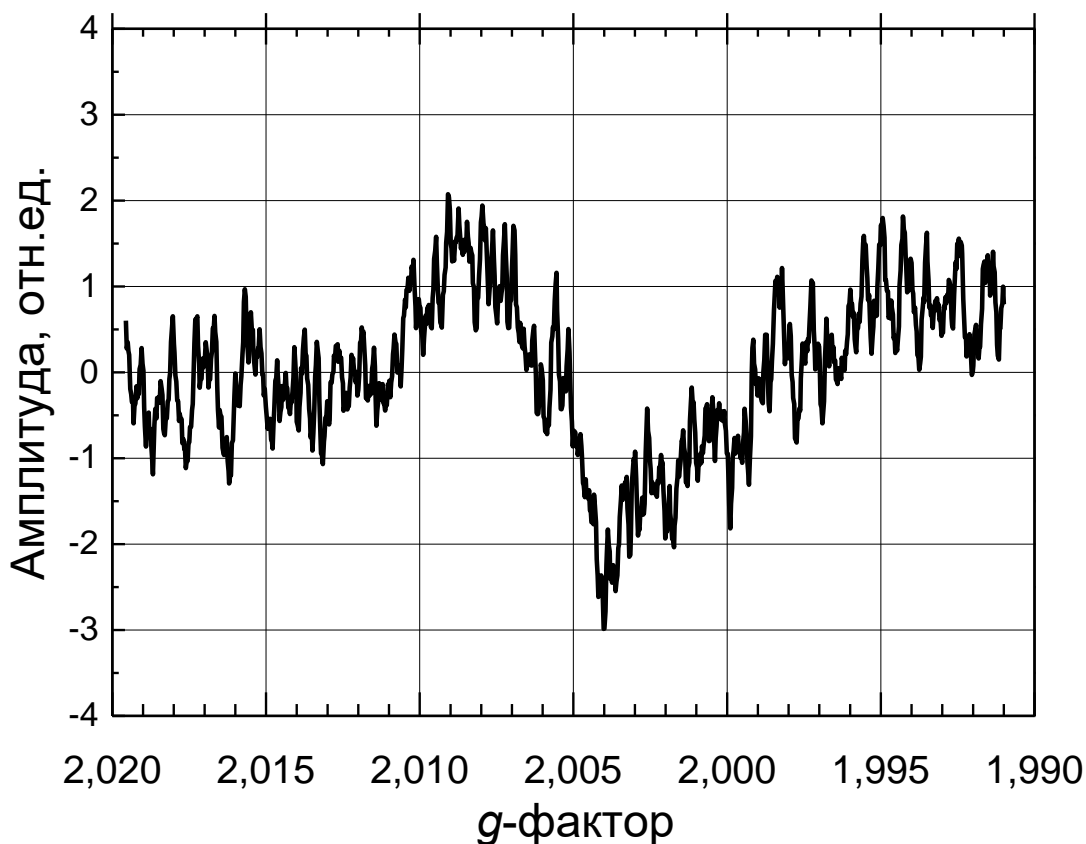


Рисунок 5 – Спектр ЭПР для структуры КНИ, изготовленной по методу *SmartCut*

Третья глава посвящена разработке модели деградации порогового напряжения МОП-транзисторов под действием ионизирующего излучения на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения.

Модель основана на объединении известной зависимости радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов от концентрации ловушек заряда в подзатворном оксиде и выражения, описывающего ВАХ подзатворного оксида на участке Пула-Френкеля. Такой подход базируется на описанной в главе 2 зависимости дефектности слоя диоксида кремния от концентрации кристаллографических дефектов окисляемой подложки, а также на наличии корреляции концентрации центров, участвующих в проводимости слоя оксида, и общего количества центров, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд.

На основе этих утверждений была получена формула, связывающая сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора в результате облучения ΔV_{th} и плотность тока утечки $J_{ут}$ подзатворного оксида до облучения:

$$\Delta V_{th} = -\frac{qDg_0d_{ox}\sigma}{C_{ox}} \cdot K \frac{J_{ут}^2}{A}, \quad (2)$$

где q – элементарный заряд; D – эффективная поглощенная доза излучения; g_0 – скорость генерации электронно-дырочных пар в диэлектрике на единицу поглощенной дозы; C_{ox} – удельная емкость МОП-структуры в насыщении. В формуле (2) A – параметр, который зависит напряженности электрического поля E и температуры T в соответствии с выражением:

$$A = \frac{1}{2d_{ox}} N_C q^2 \mu^2 E^2 \exp \left(- \frac{\varphi_D - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \epsilon \epsilon_0}}}{kT} \right), \quad (3)$$

где N_C – объемная плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика; μ – подвижность электронов в диэлектрике; φ_D – уровень донорных центров в диэлектрике относительно дна зоны проводимости; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ϵ_0 – электрическая постоянная; k – постоянная Больцмана. Коэффициент K в формуле (2) представляет собой отношение общего количества центров, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд, к количеству центров, участвующих в проводимости при измерении ВАХ.

На рисунке 6 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости ΔV_{th} от $J_{ут}$. В качестве примера показан возможный критерий отбраковки по плотности тока утечки $J_{ут}^*$. Наилучшее совпадение было достигнуто при K примерно равном 17. Это значение близко к коэффициенту, представленному в главе 2 как отношение концентрации ЭПР-активных центров к концентрации центров, участвующих в проводимости. Известно, что большинство центров захвата заряда являются парамагнитными [12]. Таким образом, результаты ЭПР-анализа подтверждают справедливость разработанной модели.

На значение плотности тока утечки влияет множество факторов, поэтому необходимо определить режимы измерений, позволяющие снизить влияние паразитных факторов и получить значение, непосредственно отражающее дефектность диэлектрического слоя. Показано, что применение при измерении ВАХ шага по напряженности 0,3 МВ/см, времени интегрирования 320 мс и задержки измерений 100 мс достаточно для визуализации участков ВАХ при определении $J_{ут}$ и минимизации влияния электромагнитных помех и зарядки паразитных емкостей. При этом не успевает проявляться полевая деградация структуры диэлектрика, что позволяет избежать искажения формы ВАХ.

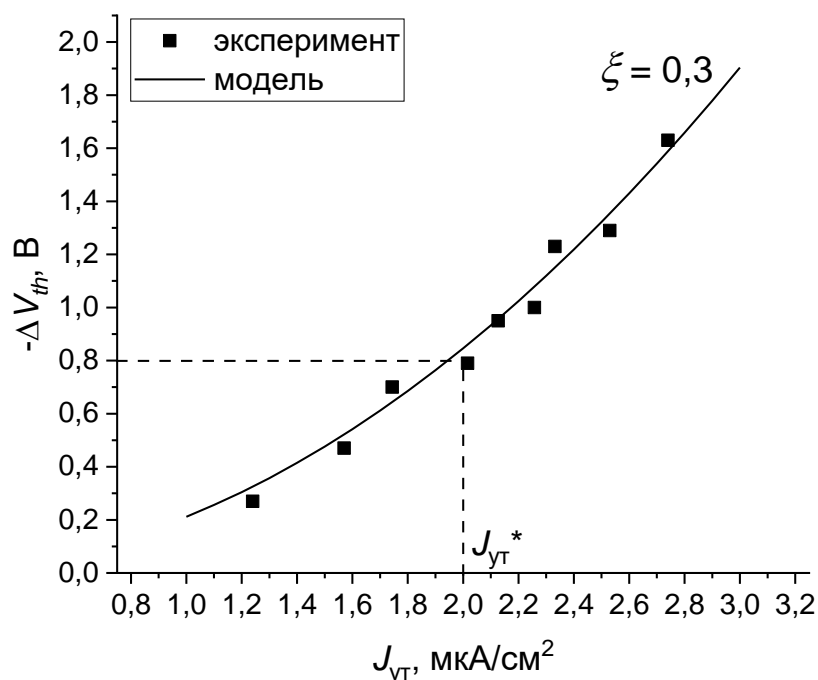


Рисунок 6 – Экспериментальная и теоретическая зависимости радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзистора на объемном кремнии от плотности тока утечки подзатворного оксида с коэффициентом дефектности $\xi = 0,3$

В четвертой главе предложен алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП микросхем с помощью представленного метода диагностики диэлектрических слоев и разработанной модели деградации порогового напряжения МОП-транзисторов. Схема алгоритма представлена на рисунке 7.

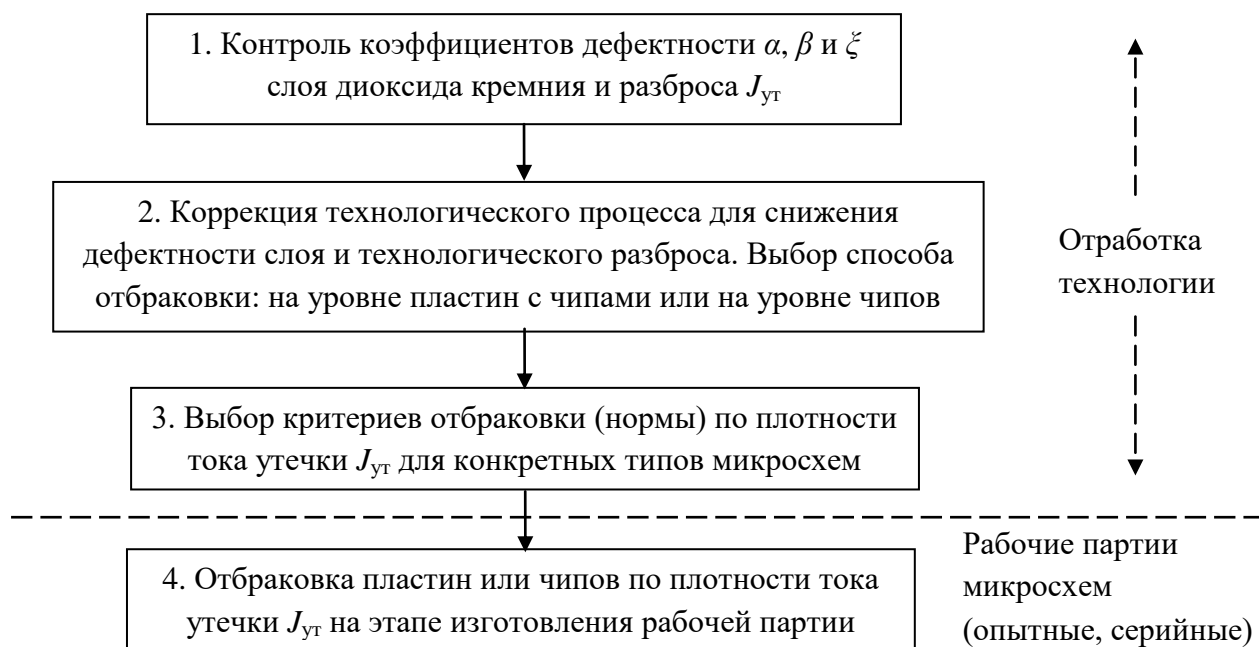


Рисунок 7 – Алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем

Этапы 1, 2 и 3 относятся к процедуре отработки технологии. Проводится контроль коэффициентов дефектности α , β и ξ и технологического разброса плотности тока утечки J_{ut} со 100-процентной выборкой (этап 1). По результатам контроля с применением данных о влиянии технологии на дефектность слоя

диоксида кремния, полученных в главе 2, проводится коррекция технологического процесса с целью снижения дефектности слоя и технологического разброса (этап 2). Кроме того, по величине итогового технологического разброса $J_{ут}$ определяется целесообразность проведения отбраковки на уровне пластин или на уровне чипов на каждой пластине в рабочей партии. На этапе 3 для конкретного типа микросхем определяется критерий отбраковки (норма) по плотности тока утечки $J_{ут}$ согласно модели, описанной в главе 3.

Этап 4 относится к контролю рабочих (опытных или серийных) партий пластин с чипами. На данном этапе проводится отбраковка пластин или чипов по плотности тока утечки $J_{ут}$ с выборкой в зависимости от выбранного способа отбраковки на уровне пластин или чипов.

В результате применения данного алгоритма на практике были получены следующие результаты. На этапе 1 для подзатворного оксида был получен коэффициент ξ , в среднем по партии примерно равный 0,4 (рисунок 8). При этом $\beta > \alpha$, что говорит о предположительно большем влиянии границы раздела, а не объема слоя на радиационную стойкость МОП-транзистора. В главе 2 было показано, что дефектные центры в слое термического диоксида кремния могут скапливаться в областях повышенной кристаллографической дефектности окисляемой подложки кремния. Поэтому на этапе 2 с целью снижения дефектности подзатворного оксида был добавлен термический отжиг кремниевой подложки перед формированием оксида. На рисунке 8 представлены ВАХ подзатворного оксида без отжига и с отжигом. Отжиг позволил снизить коэффициент дефектности ξ с 0,4 до 0,3. Для партии пластин с операцией отжига было показано, что разброс $J_{ут}$ в пределах пластины превышает разброс между пластинами, а значение $J_{ут}$ зависит от положения на пластине. Поэтому было принято решение проводить отбраровку в рабочей партии на уровне чипов.

На этапе 3 путем анализа работы микросхемы, для которой применялся алгоритм прогнозирования, было установлено, что сдвиг порогового напряжения в результате облучения ΔV_{th} не должен превышать по модулю 0,8 В. Согласно описанной в главе 3 модели и, в частности, рисунку 6, данному условию соответствует норма $J_{ут} \leq 2$ мкА/см².

На этапе 4 были проведены исследования КМОП ИС на пластинах объемного кремния с помощью рентгеновского имитатора, на которых предварительно (до облучения) был проведен контроль плотности тока утечки для тестовых конденсаторов, расположенных на дорожках реза между чипами. Такой подход справедлив, поскольку на этапе 2 была обнаружена достаточно плавная зависимость значения $J_{ут}$ от положения на пластине. На рисунке 9 представлена диаграмма рассеяния плотности тока утечки до облучения и относительного изменения тока потребления микросхем в результате облучения. Была обнаружена линейная корреляция данных величин с коэффициентом корреляции Пирсона $r \approx 0,84$.

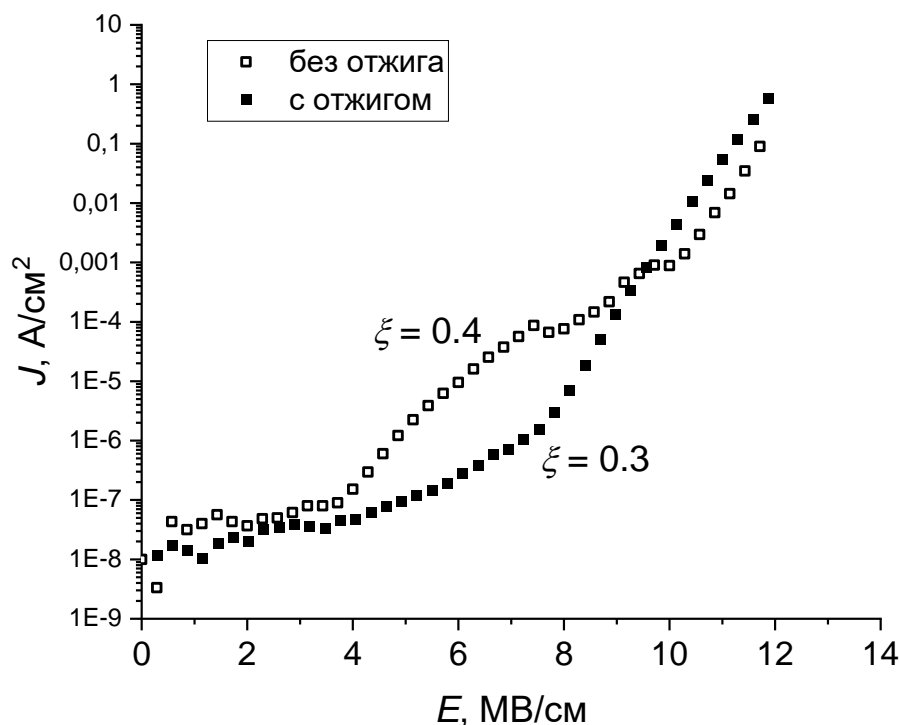


Рисунок 8 – ВАХ слоев подзатворного оксида, сформированного термическим окислением без предварительного отжига кремниевой подложки и с отжигом, с указанием коэффициента дефектности ξ

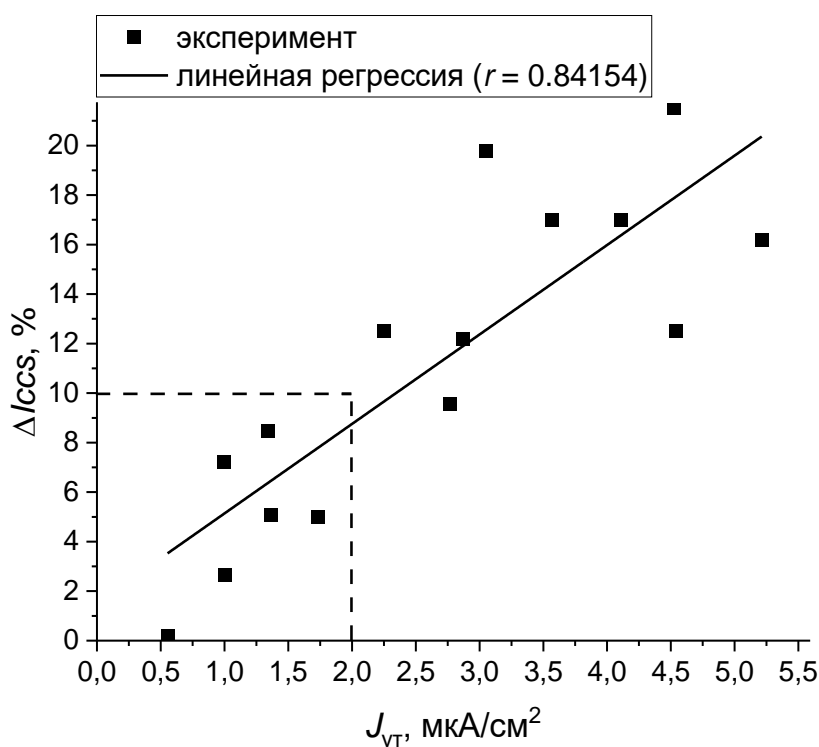


Рисунок 9 – Диаграмма рассеяния изменения статического тока потребления ΔI_{ccs} КМОП ИС на объемном кремнии в результате облучения и плотности тока утечки подзатворного оксида $J_{ут}$ до облучения с указанием критериев отбраковки по $J_{ут}$ и ΔI_{ccs}

Для КМОП ИС на КНИ также была обнаружена линейная корреляция тока утечки захороненного оксида до облучения и изменения статического тока потребления микросхем в результате облучения. Отсутствие функциональных зависимостей между этими величинами связано с высоким локальным разбросом

плотности тока утечки в пределах площади одного чипа, обнаруженным сканированием пластин со слоями диоксида кремния без топологического рисунка с помощью ртутного зонда. На рисунке 9 видно, что применение отбраковочного критерия по плотности тока утечки 2 мкА/см^2 позволило примерно в 2 раза увеличить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии с нормой $\Delta I_{\text{ccs}} \leq 10 \%$ за счет отбраковки чипов с потенциально низкой стойкостью. Без введения отбраковки по плотности тока утечки выход годных в партии составил бы 47 %. Введение операции отбраковки привело к тому, что при снижении количества микросхем в партии все оставшиеся в партии микросхемы оказались стойкими.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод диагностики радиационной чувствительности слоев диоксида кремния, основанный на анализе участков ВАХ диэлектрического слоя, обусловленных различными механизмами электропроводности.

2. Предложен коэффициент дефектности диэлектрического слоя, отражающий влияние технологии получения слоя на его радиационную чувствительность. Экспериментально показано, что для захороненного оксида концентрация ЭПР-активных центров пропорциональна с коэффициентом, примерно равным 20-ти, концентрации донорных центров, определяемой путем анализа ВАХ.

3. Разработана модель влияния дефектных центров на радиационную чувствительность слоя диоксида кремния, позволяющая прогнозировать изменение порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения по результатам контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения. Справедливость модели подтверждена результатами исследований МОП-транзисторов на рентгеновском имитаторе и ЭПР-анализа слоев диоксида кремния.

4. Определен оптимальный режим контроля плотности тока утечки слоя диоксида кремния: задержка измерений 100 мс, время интегрирования 320 мс, величина шага по напряженности поля при измерении ВАХ 0,3 МВ/см. Данный режим позволяет снизить влияние переходных процессов и помех на результат измерений при минимальной деградации диэлектрического слоя.

5. Обнаружена линейная корреляция изменения статического тока потребления микросхем в результате облучения и плотности тока утечки слоев диоксида кремния до облучения с коэффициентом корреляции более 0,8.

6. Разработан алгоритм прогнозирования дозовой стойкости КМОП-микросхем в процессе производства, основанный на двойном контроле: показателя дефектности и технологического разброса – на этапе отработки технологии и плотности тока утечки – на этапе отбраковки рабочих пластин с чипами. Применение предложенного алгоритма позволило повысить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии примерно в 2 раза.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Celler, G. K. Frontiers of silicon-on-insulator / G.K. Celler, S. Cristoloveanu. // Journal of Applied Physics. – 2003. – V. 93, N. 9. – P. 4955-4978.
2. Radiation effects in MOS oxides / J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, et al. // IEEE Transactions On Nuclear Science. – 2008. – V. 55, N. 4. – P. 1833-1853.
3. Stahlbush, R.E. Electron and hole trapping in the buried oxide of Unibond wafers / R.E. Stahlbush // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – V. 44, N. 6. – P. 2106-2114.
4. Влияние германия, имплантированного в структуру «диоксид кремния на кремнии», на процессы накопления заряда при воздействии низкоэнергетического стационарного ионизирующего излучения / О.П. Гуськова, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов, Н.Д. Абросимова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – № 4, С. 28-32.
5. Liu, S.T. Total dose radiation hard 0.35 μm SOI CMOS technology / S.T Liu, W.C. Jenkins, H.L. Hughes // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1998. – V. 45, N. 6. – P. 2442-2449.
6. Блюменфельд, Л.А. Электронный парамагнитный резонанс / Л.А. Блюменфельд, А.Н. Тихонов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 9. – С. 91-99.
7. Jargis, A.J. The electrical conduction process and trapping studies in SiO_2 films / A.J. Jargis, A.S. Mohammed, E.G. Younis // Tikrit Journal of pure science. – 2012. – V. 17, N. 2. – P. 164-168.
8. Scofield, J.H. Correlation between preirradiation 1/f noise and postirradiation Oxide-trapped charge in MOS transistors / J.H. Scofield, T.P Doerr, D.M. Fleetwood // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1989. – NS-36. – P. 1946-1953.
9. Harrell, W.R. Observation of Poole-Frenkel effect saturation in SiO_2 and other insulating films / W.R. Harrel, J. Frey // Thin Solid Films. – 1999. – 352. – P. 195-204.
10. Gupta, S.K. Experimental analysis of current conduction through thermally grown SiO_2 on thick epitaxial 4H-SiC employing Poole-Frenkel mechanism / S.K. Gupta, A. Azam, J. Akhtar // Pramana – Journal of physics. – 2010. – V. 74, N. 2. – P. 325-330.
11. Перевошиков, В.А. Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках Монография. Часть I / В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. – Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2002. – 220 с.
12. Pantelides, S.T. The E' center and oxygen vacancies in SiO_2 / S.T. Pantelides, Z.-Y. Lu, C. Nicklaw, T. Bakos, S.N. Rashkeev, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2008. – 354. – P. 217-223.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по специальности 2.2.8

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.

Публикации в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science

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.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по специальностям

1.3.4, 1.3.5, 1.3.6, 1.3.8, 1.3.11, 1.3.20, 2.2.2, 2.2.3, 2.2.13, 2.2.14, 2.2.15, 2.2.16, 1.3.2, 1.3.13, 2.2.11

5. Ширяев, А.А. Применение эффекта Пула-Френкеля и инъекции носителей заряда для исследования дефектности термического диоксида кремния / А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2019. – Вып. 3 (254). – С. 29-37.
6. Ширяев, А.А. Влияние электромагнитных помех и режима измерений на ток утечки подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов / А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2023. – № 4(87) – С. 80-84.