

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Российский  
федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики»

«Научно-исследовательский институт измерительных систем  
им. Ю.Е. Седакова»

На правах рукописи

ШИРЯЕВ Алексей Александрович

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

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.х.н., профессор  
Воротынцев В.М.

Нижний Новгород, 2024 г.

## Оглавление

<b>Список сокращений</b> .....	4
<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Дефекты в термическом диоксиде кремния, влияющие на дозовую радиационную стойкость КМОП-микросхем, и методы их диагностики.</b> ..11	
1.1 Собственная дефектность термического диоксида кремния и границ раздела .....	11
1.2 Примеси в термическом диоксиде кремния .....	21
1.3 Механические напряжения, области утонения и трещины термического диоксида кремния.....	24
1.4 Метод, основанный на электронном парамагнитном резонансе .....	26
1.5 Метод, основанный на контроле коэффициента низкочастотного шума тока в канале транзистора .....	30
1.6 Методы, основанные на измерении силы тока, протекающего через диэлектрический слой.....	32
Выводы по главе 1 .....	48
<b>2. Разработка метода диагностики слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ тестовых конденсаторов</b> .....	50
2.1 Суть метода.....	50
2.2 Методика измерений (тестовые структуры, схема измерений, условия измерений) .....	55
2.3 Апробация разработанного метода диагностики слоев диоксида кремния.....	66
Выводы по главе 2.....	79
<b>3. Моделирование деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения</b> .....	81
3.1 Методика электрической и рентгеновской имитации радиационного воздействия на тестовые структуры.....	81
3.2 Разработка модели .....	91

Выводы по главе 3.....	102
<b>4. Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем с помощью разработанных метода и модели.....</b>	<b>103</b>
4.1 Методика оценки дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем.....	103
4.2 Контроль и снижение дефектности слоев диоксида кремния.....	106
4.3 Отбраковка потенциально не стойких кристаллов микросхем.....	109
Выводы по главе 4.....	116
<b>Заключение.....</b>	<b>118</b>
<b>Список цитируемой литературы .....</b>	<b>120</b>
<b>Приложение – Акт внедрения результатов диссертации.....</b>	<b>129</b>

## Список сокращений

ИИ – ионизирующее излучение

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КНИ – кремний-на-изоляторе

ТДК – термический диоксид кремния

КМОП ИС – интегральные КМОП-микросхемы на объемном кремнии

КМОП КНИ ИС – интегральные КМОП-микросхемы на КНИ

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ПС – поверхностные состояния

ВИМС – вторично-ионная масс-спектрокопия

ЭПР – электронный парамагнитный резонанс

ТСТ – термостимулированный ток

ТОПЗ – ток, ограниченный пространственным зарядом

ВФХ – вольт-фарадная характеристика

ВЧ ВФХ – высокочастотная вольт-фарадная характеристика

КНС – кремний-на-сапфире

ТПО – термополевая обработка

ПТПО – положительная термополевая обработка

ОТПО – отрицательная термополевая обработка

## Введение

### 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 смежным 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.

# 1. Дефекты в термическом диоксиде кремния, влияющие на дозовую радиационную стойкость КМОП-микросхем, и методы их диагностики

## 1.1 Собственная дефектность термического диоксида кремния и границ раздела

Для выполнения поставленных в настоящей работе цели и задач необходимо определить величины, характеризующие дефектность ТДК, и связать их с параметрами МОП-транзисторов, характеризующими их дозовую радиационную стойкость. Согласно [3,4] сдвиг порогового напряжения паразитного транзистора в результате радиационного воздействия при подаче на затвор положительного напряжения равен

$$\Delta V_{th} = \frac{\Delta Q}{C_{ox}}, \quad (1.1)$$

а при подаче отрицательного напряжения на затвор –

$$\Delta V_{th} = \frac{\Delta Q \delta x}{C_{ox} d_{ox}}. \quad (1.2)$$

В формулах (1.1) и (1.2)  $\Delta Q$  – заряд, накопленный на дефектных центрах ловушках захороненного оксида в результате радиационного воздействия;  $C_{ox}$  – емкость оксида;  $\delta x$  – толщина переходного слоя ТДК, граничащего с кремнием и характеризующегося высокой дефектностью;  $d_{ox}$  – толщина оксида.

Величина  $\Delta Q$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta Q = q g_0 \alpha_{ox} d_{ox} D_e \quad (1.3)$$

где  $q$  – элементарный электрический заряд;  $g_0$  – количество электронно-дырочных пар, образующихся в оксиде на единицу поглощенной дозы в единице объема;  $\alpha_{ox}$  – коэффициент, характеризующий дефектность оксида;  $D_e$  – эффективная накопленная доза.

Величина  $g$  может быть выражена через плотность оксида  $\rho$  и энергию образования одной электронно-дырочной пары  $w$ :

$$g = \frac{\rho}{w}. \quad (1.4)$$

В случае рентгеновского излучения  $D_e$  может быть определена по следующей формуле:

$$D_e = D(1 + 1,35/E)^{-0,9}, \quad (1.5)$$

где  $D$  – поглощенная доза;  $E$  – напряженность электрического поля в оксиде в МВ/см.

Величина  $\alpha_{ox}$  определяется по следующей формуле:

$$\alpha_{ox} = N_H \sigma, \quad (1.6)$$

где  $N_H$  – поверхностная концентрация содержащихся в слое  $\delta_x$  дефектных центров, захватывающих радиационно-индуцированные дырки;  $\sigma$  – сечение захвата дефектных центров.

Таким образом, параметрами, характеризующими дефектность ТДК и определяющими дозовую стойкость МОП-транзисторов, можно считать толщину переходного слоя  $\delta_x$  и параметр  $\alpha_{ox}$ .

Переходный слой ТДК толщиной  $\delta_x$  на границе с кремнием является результатом релаксации механических напряжений структуры ТДК вследствие несоответствия параметров структуры кремния и диоксида кремния. Часть этого слоя, примыкающая к кремнию, характеризуется переменной стехиометрией, а в остальной части слоя наблюдаются отличия в углах связей Si–O от углов связей в объеме ТДК. Следует отметить, что в переходном слое наблюдаются отличие колец, образованных тетраэдрами SiO<sub>4</sub>, от объема ТДК по количеству звеньев и форме. Кроме того, релаксация механических напряжений приводит к наличию некоторого числа оборванных связей в переходном слое. Вследствие тенденции переходного слоя к нарушению стехиометрии для него характерны дефектные центры, связанные с избытком кремния: кислородные вакансии и междоузельный кремний. Согласно [5] суммарная толщина переходного слоя обычно составляет от 5 до 10 нм.

Поскольку переходный слой характеризуется повышенной дефектностью, величина  $\delta_x$  тесно связана с величиной центроида заряда, захваченного в результате облучения. Центроид заряда определяется выражением:

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{d_{ox}} x \rho^*(x) dx}{\int_0^{d_{ox}} \rho^*(x) dx}, \quad (1.7)$$

где  $x$  – расстояние вглубь диэлектрика;  $\rho^*(x)$  – пространственное распределение захваченного заряда.

Следует отметить еще несколько соотношений, используемых при описании процесса накопления заряда в слое диэлектрика.

Количество захваченного в диэлектрике заряда в момент времени  $t$  может быть выражено по формуле:

$$\Delta Q(t) = qN_H [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (1.8)$$

где  $\tau$  – постоянная времени захвата носителя заряда, определяемая по формуле:

$$\tau = \frac{q}{J\sigma}, \quad (1.9)$$

где  $J$  – плотность тока дырок в результате ионизации.

Связь  $\Delta Q(t)$  с изменением напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}(t)$  МОП-структуры описывается формулой:

$$\Delta Q(t) = \left(1 - \frac{\bar{x}}{d_{ox}}\right)^{-1} C_{ox} \Delta V_{fb}(t), \quad (1.10)$$

которая является обобщением формул (1.1) и (1.2) с помощью введения понятия центроида заряда.

Тогда, подставляя (1.8) в (1.10), получим

$$\Delta V_{fb}(t) C_{ox} = \left(1 - \frac{\bar{x}}{d_{ox}}\right) q N_H (1 - \exp(-t/\tau)) = q \bar{N}_H (1 - \exp(-t/\tau)), \quad (1.11)$$

где  $\bar{N}_H$  – эффективная плотность центров захвата дырок.

Также справедлива следующая формула, связывающая  $\bar{N}_H$  и изменение напряжения  $\Delta V(t)$ , необходимого для поддержания постоянного значения тока через диэлектрик:

$$\Delta V(t)C_{\alpha} = q\bar{N}_H(1 - \exp(-t/\tau)). \quad (1.12)$$

Величина  $\Delta V(t)$  используется в некоторых методах экспериментального исследования, которые будут описаны далее.

В формулу (1.6) расчета величины  $\alpha$  входят сечение захвата и концентрация дефектных центров. Сечение захвата представляет собой площадь сечения «критической орбиты» вокруг центра, характеризующей состояние носителя заряда, при котором вероятности его захвата и выброса равны. Сечение захвата центра зависит как от природы центра, так и от напряженности электрического поля. В отсутствие внешнего электрического поля радиус критической орбиты равен:

$$r_0 = q^2 / (8\pi\epsilon_0\epsilon kT), \quad (1.13)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость ТДК;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Согласно [6] различные дефектные центры оказывают друг на друга влияния как разные компоненты единого примесно-дефектного состава (ПДС). Таким образом, в случае преобладания одного вида центров определение дефектности слоя сводится к определению концентрации этих центров, а в случае наличия корреляции концентраций различных центров необходимо определить концентрацию одного из них и оценить коэффициент детерминации данной корреляционной зависимости.

Рассмотрим природу дефектных центров в ТДК, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд. На рисунках 1.1-а и 1.1-б представлены энергетические уровни таких центров на зонной диаграмме МОП-структуры согласно различным литературным источникам [7,8].

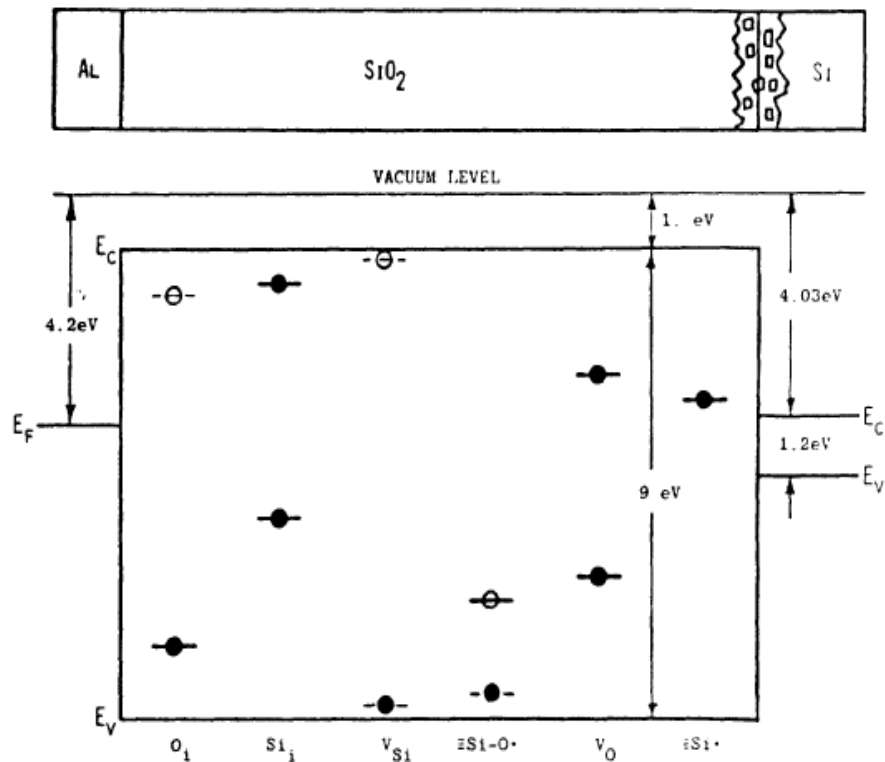


Рисунок 1.1-а – Зонная диаграмма МОП-структуры с энергетическими уровнями дефектных центров, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд, согласно [7]. Здесь  $O_i$  – междуузельный кислород;  $Si_i$  – междуузельный кремний;  $V_{Si}$  – вакансии кремния;  $\equiv Si-O\cdot$  – немостиковый кислород;  $V_O$  – вакансии кислорода;  $\equiv Si\cdot$  – трехкоординированный кремний

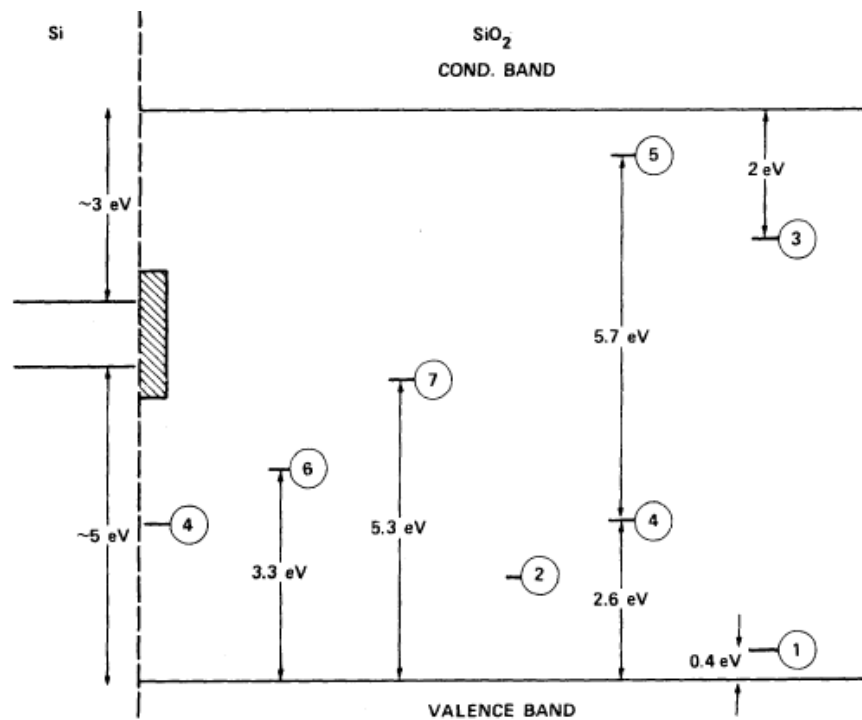


Рисунок 1.1-б – Зонная диаграмма МОП-структуры с энергетическими уровнями дефектных центров, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд, согласно [8]. Здесь 1 и 2 – дырочные ловушки, соответствующие двум уровням расщепления  $\pi$ -связи между кремнием и кислородом; 3 – электронная ловушка; 4 –  $E'$ -центр; 5 – возбужденное состояние  $E'$ -центра; 6 – В-центр ( $\equiv SiOH$ ); 7 – А-центр (натрий)

Видно, что литературные данные несколько разнятся, что объясняется чрезвычайной сложностью ПДС в слоях ТДК и задачи их идентификации. Однако

большинство авторов сходятся во мнении, что ключевую роль в накоплении заряда играют центры, в состав которых входит трехкоординированный кремний  $\equiv\text{Si}\cdot$ . Согласно [9] имеются данные о сильной зависимости концентраций положительного заряда и  $\text{E}'$ -центров в термическом диоксиде кремния при дозовом воздействии. Под названием « $\text{E}'$ -центр» иногда подразумевают трехкоординированный кремний как таковой, а иногда – более сложные центры на основе трехкоординированного кремния. Кроме того, так называют и нейтральный центр, и центр, уже захвативший дырку. Существует около 10 видов  $\text{E}'$ -центров, которые отличаются присутствием дополнительных атомов, взаимодействующих с трехкоординированным атомом кремния.

С точки зрения прогнозирования радиационной чувствительности слоев ТДК особый интерес представляет состояние  $\text{E}'$ -центра до облучения. Причиной образования трехкоординированного кремния может являться разрыв связи  $\text{Si}-\text{O}$  под действием релаксации механических напряжений на финальных этапах получения конечной структуры в кристалле микросхемы. В структуре также остаются неразорванные напряженные связи, которые могут разрушаться под действием ИИ [10,11]. Следует также отметить, что гамма-кванты с энергией более 2 МэВ в принципе могут разрывать как напряженные, так и релаксированные связи в ТДК [10].

Отдельно следует отметить, что предшественником  $\text{E}'$ -центра может являться кислородная вакансия ( $\text{O}_3\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv\text{O}_3$ ). Кислородная вакансия превращается в  $\text{E}'$ -центр в результате захвата дырки, образовавшейся при облучении (рисунок 1.3). Сечение захвата кислородной вакансии составляет примерно  $3\cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> [12]. Повышенная концентрация кислородных вакансий характерна для переходного слоя между кремнием и ТДК, что отражается в их отклонении от стехиометрии, а также для слоев захороненного оксида, полученных с помощью имплантации кислорода. Основными конфигурациями  $\text{E}'$ -центра, образовавшегося из кислородной вакансии, являются  $\text{E}'_{\gamma}$ -центр и  $\text{E}'_{\delta}$ -центр [13]. Захватывая радиационно-индуцированную дырку, кислородная



вакансия превращается в положительно заряженный  $E'_\delta$ -центр, который с течением времени релаксирует в  $E'_\gamma$ -центр (рисунок 1.2).

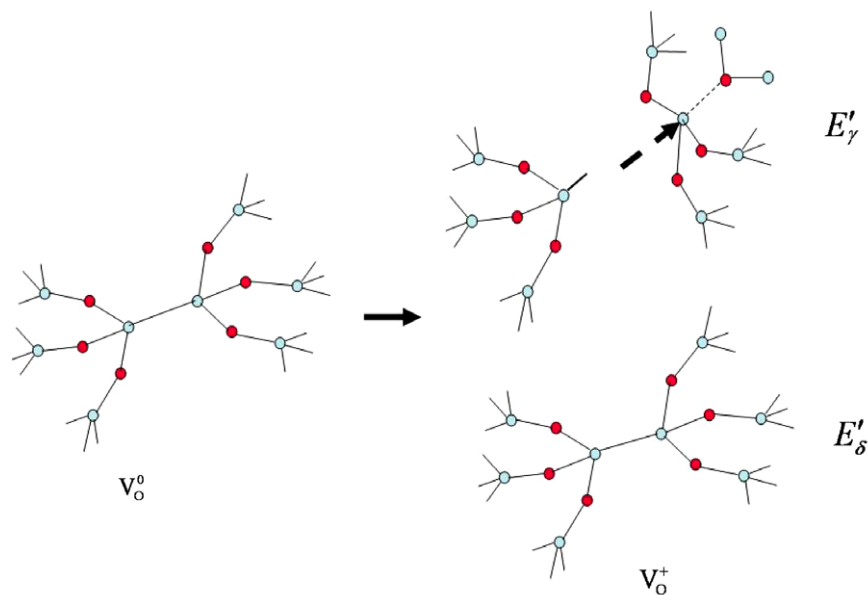


Рисунок 1.2 – Иллюстрация превращения кислородной вакансии под действием ионизирующего излучения в  $E'_\delta$ -центр с последующей релаксацией в  $E'_\gamma$ -центр

На рисунке 1.1-б заштрихованная область иллюстрирует поверхностные состояния (ПС) на границе кремний – диоксид кремния. Основным видом поверхностных состояний в системе Si-SiO<sub>2</sub> являются P<sub>b</sub>-центры (структурная формула записывается как Si<sub>3</sub>≡Si<sup>·</sup>), представляющие собой трехкоординированный атом кремния, соединенный с тремя другими атомами кремния и имеющий неспаренный электрон. Предшественником P<sub>b</sub>-центра является связь кремния с водородом H-Si на границе слоя кремния, которая может разрываться как напрямую под действием ИИ (энергия связи примерно равна 5 эВ), так и за счет реакции с водородом и OH-группами, которые могут освобождения с центров в объеме ТДК под действием ИИ и мигрировать к границе Si/SiO<sub>2</sub> [9].

В статье [14] концентрация водорода в ТДК измерялась методом ВИМС. В монографии [5] говорится о применении методов ИК-спектроскопии и рамановского рассеяния для обнаружения групп OH, Si-OH и Si-H. Также для определения концентрации водорода в ТДК применялся метод активационного анализа с использованием радиоактивных изотопов водорода.

Плотность ПС оказывает влияние на подпороговый наклон входной ВАХ транзистора в соответствии с формулой:

$$S_{th} \equiv \ln 10 \frac{dV_G}{d \ln I_D} \approx \frac{kT}{q} \ln 10 \left( 1 + \frac{C_D + q^2 D_{it}}{C_{ox}} \right), \quad (1.14)$$

где  $S_{th}$  – подпороговый наклон;  $V_G$  – напряжение на затворе;  $I_D$  – ток стока;  $C_D$  – удельная емкость области обеднения;  $D_{it}$  – количество ПС на единицу площади и единицу энергии;  $C_{ox}$  – удельная емкость диэлектрика.

Следует отметить, что увеличение подпорогового наклона с ростом плотности ПС при воздействии ИИ способствует увеличению абсолютного значения порогового напряжения. В случае n-канального транзистора накопление положительного заряда в ТДК под действием ИИ способствует уменьшению порогового напряжения. Таким образом, влияние накопления заряда в ТДК и ПС на границе раздела на пороговое напряжение конкурируют между собой, что необходимо учитывать при испытаниях n-канальных транзисторов на дозовую стойкость.

Содержание собственных дефектов в ТДК определяется технологией термического окисления кремния, которая делится на методы в зависимости от состава газовой смеси, температуры (700 ÷ 1250 °С) и давления (10.13 гПа ÷ 20.26 МПа). При этом имеет место трехстадийный процесс: адсорбция окислителя на поверхности уже образовавшегося окисла, диффузия молекул окислителя через оксид к поверхности кремния, реакция окислителя с кремнием с образованием нового слоя окисла.

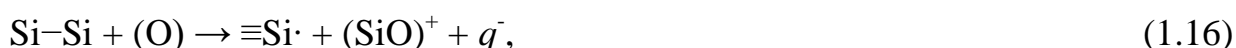
Ниже перечислены основные методы получения слоев ТДК.

1) Окисление кремния в сухом кислороде.

Окислителем является чистый кислород. Стандартная температура составляет 1000°С. Имеет место реакция:



При более детальном рассмотрении эта реакция может быть представлена в виде двустадийного процесса:





2) Окисление кремния с участием воды.

Окисление происходит за счет реакции:



которая также может идти в две стадии. На первой стадии образуются немостиковые соединения кремния:



а) Влажное окисление.

Окислителем выступает смесь воды и кислорода, полученная путем пропускания кислорода через водяную баню. Вместо кислорода в качестве газаносителя могут выступать азот или инертные газы. Температура окисления чаще всего составляет примерно 1150°C.

б) Окисление в парах воды.

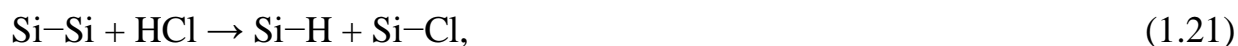
Окислитель – пары воды, образующиеся путем нагревания емкости с водой. Температура, как правило, составляет около 900°C.

в) Пирогенное окисление.

Окислитель – вода, получаемая прямо в реакторе в результате реакции водорода и кислорода. Типичная температура составляет 850°C.

3) Окисление кремния с участием хлора.

В окислитель добавляются хлорсодержащие катализаторы: хлор ( $\text{Cl}_2$ ), соляная кислота ( $\text{HCl}$ ), трихлорэтилен ( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ ), четыреххлористый углерод ( $\text{CCl}_4$ ) и т.д. При этом возможно протекание следующих реакций:



Рассмотрение формул промежуточных и побочных процессов (1.16), (1.17), (1.19) – (1.22) помогает понять причины формирования в конечной структуре ТДК таких центров, как фиксированного заряда, оборванных связей и оборванных связей, пассивированных водородом, ОН-группами или хлором. С учетом

температуры процессов можно сравнить методы окисления по вероятному количеству оборванных связей в ТДК.

При паровом окислении остаточные трехкоординированные атомы кремния  $\equiv\text{Si}\cdot$  могут связываться фрагментами молекулы воды с образованием центров  $\text{Si-H}$  и  $\text{Si-OH}$ . При этом достаточно низкая температура процесса приводит к их сохранению в окончательной структуре. При влажном окислении более высокая температура приводит к освобождению атомов водорода и гидроксильных групп с сохранением в конечной структуре большего количества трехкоординированных атомов кремния. Сухое окисление занимает в этом неравенстве промежуточное положение между паровым и влажным окислением, потому что отсутствие связывания фрагментами молекулы воды атомов кремния способствует свободному протеканию реакции ( $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ ), а значит, меньшему количеству центров  $\equiv\text{Si}\cdot$  (связанных или несвязанных) в конечной структуре, чем при паровом и влажном окислении, но эти центры все же присутствуют в некотором количестве, в то время как в паровом окисле подавляющее большинство трехкоординированных атомов кремния оказывается в связанном состоянии. Введение хлора в окислительную смесь, вероятно, способствует увеличению числа оборванных связей в конечной структуре. Это, по-видимому, связано с тем, что протекание дополнительных реакций ( $\text{Si-Si} + \text{HCl} \rightarrow \text{Si-H} + \text{Si-Cl}$ ,  $\text{Si-Si} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{Si-Cl}$ ) увеличивает концентрацию связанных центров трехкоординированного кремния, которые способны испускать атомы хлора под действием температуры процесса получения ТДК. Следует отметить, что в хлорном оксиде наблюдается также увеличение сечения захвата дефектных центров, поскольку атомы хлора способны заряжаться отрицательно и окружать дефектные центры, тем самым создавая электрическое поле, притягивающее дырки. Как известно, хлор вводится в окислительную смесь с целью снижения влияния подвижных ионов щелочных металлов за счет их связывания. Таким образом, необходимо искать компромисс между обеспечением термополевой стабильности и дозовой стойкости МОП-структур путем варьирования содержания хлора в окислителе и температуры окисления.

## 1.2 Примеси в термическом диоксиде кремния

Рассмотрим свойства примесных центров с глубокими уровнями, присутствие которых в ТДК наиболее характерно для технологии изготовления КМОП-микросхем.

При окислении легированного кремния происходит сегрегация примеси, заключающаяся в перераспределении примеси между кремнием и ТДК [15]. На рисунке 1.3 представлен пример профилей распределения бора и фосфора в системе Si/SiO<sub>2</sub>. Видно, что бор склонен скапливаться в ТДК, а фосфор – в кремнии. Вследствие этого, коэффициент сегрегации  $m$ , являющийся отношением концентрации примеси в кремнии к концентрации примеси в оксиде на границе раздела фаз, для бора меньше единицы, а для фосфора больше единицы.

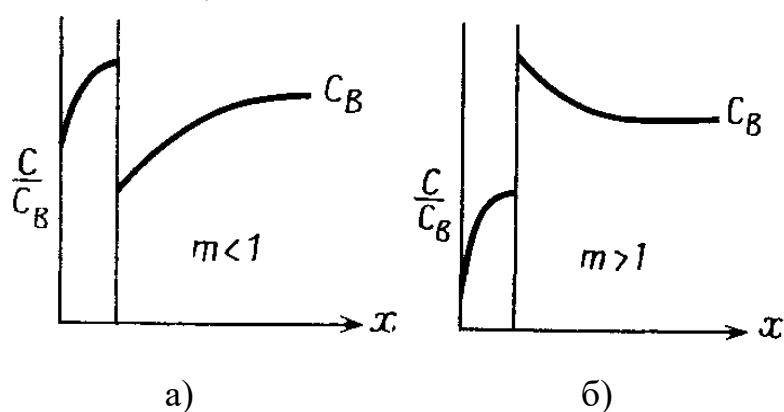


Рисунок 1.3 – Пример профилей распределения бора (а) и фосфора (б) в системе Si/SiO<sub>2</sub>. Здесь  $C$  – концентрация примеси;  $C_B$  – концентрация примеси в объеме кремния

Бор может замещать в ТДК атом кремния и создавать акцепторный уровень с энергией 1.18 эВ выше потолка валентной зоны [16]. Фосфор способен замещать как атом кремния, так и атом кислорода, создавая соответственно донорный уровень с энергией 0.74 эВ ниже дна зоны проводимости и акцепторный уровень 3.73 эВ выше потолка валентной зоны [16].

Известно, что при получении структур КНС происходит автолегирование кремниевого слоя алюминием из сапфировой подложки [15]. При получении ТДК алюминий проникает в оксид вследствие сегрегации. На рисунке 1.4 представлены зависимости предельных растворимостей примесей в кремнии от температуры (а) и распределение алюминия в системе Si/SiO<sub>2</sub>

при сегрегации (б) [17]. Атомы алюминия в ТДК замещают атомы кремния с образованием акцепторного уровня с энергией 0.86 эВ выше потолка валентной зоны [17].

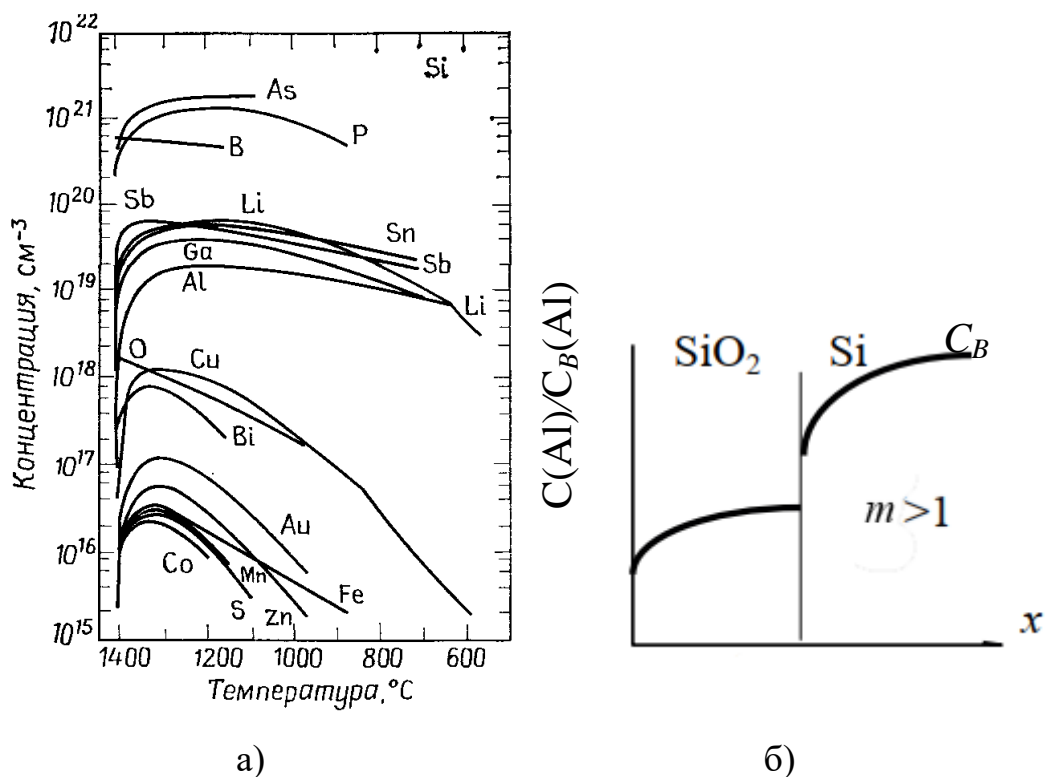


Рисунок 1.4 – а) зависимости предельных растворимостей примесей в кремнии от температуры; б) профиль распределения алюминия в системе Si/SiO<sub>2</sub> при сегрегации

При получении слоев ТДК часто применяется отжиг в среде азотсодержащих газов для улучшения его характеристик, в частности, для создания центров захвата электронов, способных компенсировать захват дырок при радиационном воздействии. На рисунке 1.5 представлен центр мостикового азота N<sub>B</sub> в диоксиде кремния, который является результатом захвата электрона центром Si<sub>2</sub>NH [18]. Данный центр создает акцепторный уровень с энергией 2.34 эВ выше потолка валентной зоны [16]. Сечение захвата данного центра составляет 10<sup>-15</sup> см<sup>2</sup>.

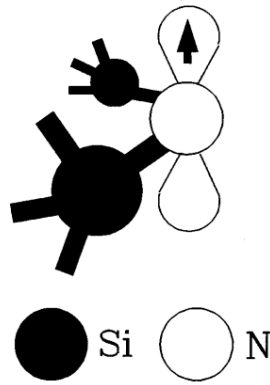


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение центра мостикового азота  $N_B$  в диоксиде кремния

В различных процессах травления часто применяются газы, содержащие фтор. Вследствие этого в ТДК проникает значительное количество атомов фтора. В работе [19] с помощью квантово-химических расчетов было показано, что центры в диоксиде кремния, содержащие фтор, характеризуются напряженными связями, которые могут релаксировать путем захвата электрона. Встраивание фтора в решетку  $SiO_2$  может происходить по двум реакциям:



Структура фторсодержащих центров представлена на рисунке 1.6.

Таким образом, в качестве центров захвата заряда в ТДК могут выступать как собственные, так и примесные дефекты. Вследствие их многообразия их экспериментальная идентификация представляется крайне сложной задачей. С точки зрения прогнозирования дозовой стойкости микросхем наиболее важной характеристикой диэлектрического слоя являются суммарная концентрация центров захвата положительного заряда. В связи с этим, в настоящей диссертационной работе предлагается и разрабатывается метод интегральной оценки дефектности, определяющей ионизационную реакцию слоев ТДК.

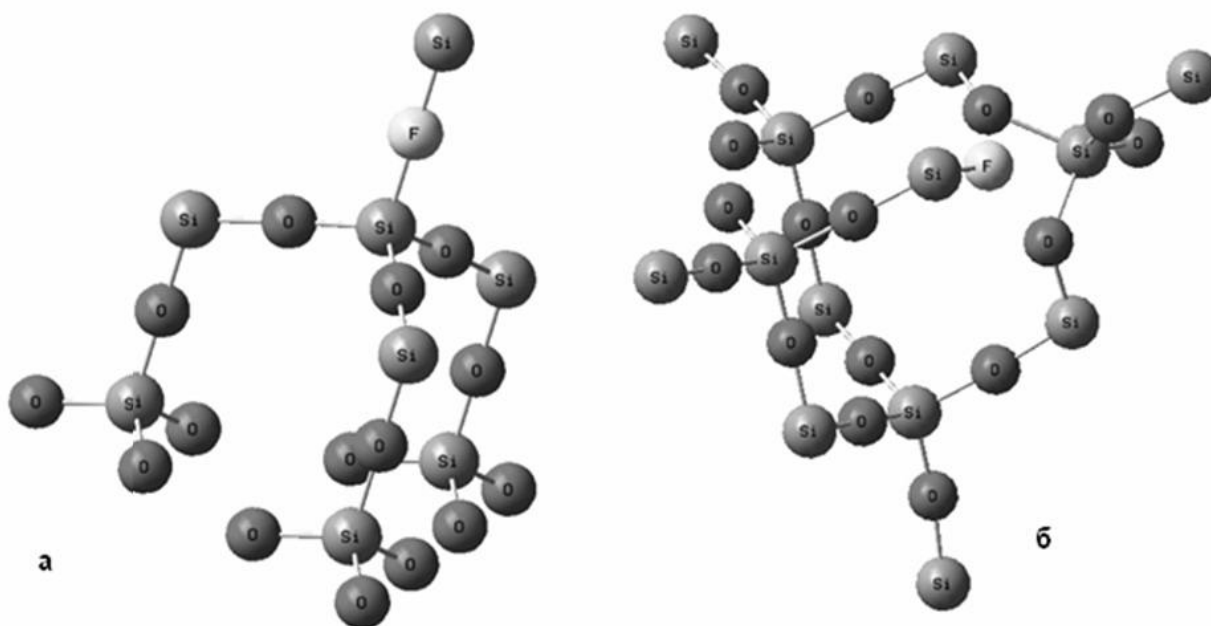


Рисунок 1.6 – Структура фторсодержащих центров в диоксиде кремния: а) атом фтора связан с двумя атомами кремния; б) атом фтора связан с одним атомом кремния

### 1.3 Механические напряжения, области утонения и трещины термического диоксида кремния

В системе Si/SiO<sub>2</sub> неизбежно присутствуют механические напряжения, вызванные различием параметров решеток и коэффициентов термического расширения кремния и диоксида кремния. При этом значения углов тетраэдра SiO<sub>4</sub> в структуре ТДК оказываются отличными от соответствующих значений в релаксированной структуре диоксида кремния [5].

В ряде работ [11,20] говорится о том, что напряженная связь в диоксиде кремния может являться центром захвата радиационно-индуцированных дырок. Захват дырок  $h^+$  вызывает релаксацию структуры за счет разрыва валентной связи и смещения атомов. В результате образуется «псевдовакансия»:



Похожим образом с напряженными связями взаимодействуют протоны, которые освобождаются с центров Si–H Si–OH:





То есть можно сказать, что протон может мигрировать по структуре ТДК с образованием большого количества зарядов и оборванных связей.

В работе [10] уточняется, что захват дырок на напряженные связи может происходить и без разрыва связи Si–O. В результате образуются дефектов двух видов: STN1 и STN2 (от англ. *self-trapped holes*). Центр STN1 представляет собой дырку, локализованную на мостиковом кислороде, а центр STN2 – дырку, локализованную в области перекрытия орбиталей двух соседних атомов кислорода (рисунок 1.7).

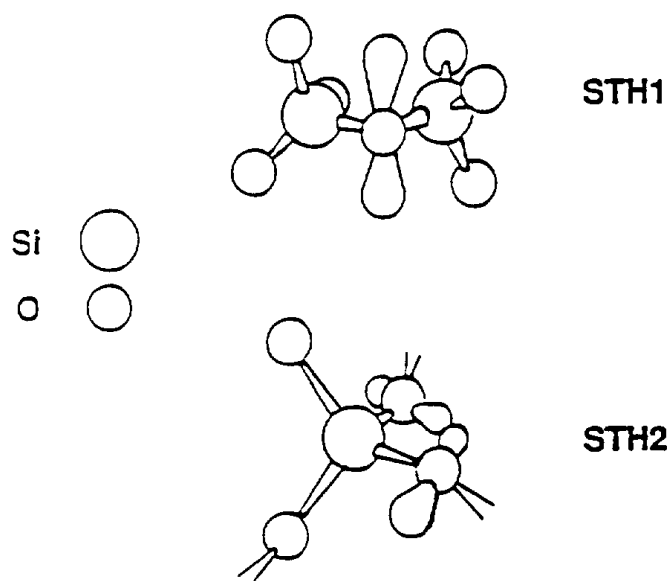


Рисунок 1.7 – Структура центров STN1 и STN2

При релаксации механических напряжений в слое ТДК могут образовываться трещины [21], причем как не сквозные, уменьшающие электрическую прочность слоя, так и сквозные, приводящие к короткам. Кроме того, если подложка имеет рельеф, например, в виде островка, вследствие анизотропии процессов формирования слоев и травления в местах перехода между горизонтальной и вертикальной поверхностью могут образовываться области утонения слоя ТДК. Можно предположить, что в случае не сквозных трещин и областей утонения два фактора, определяющие радиационную чувствительность будут конкурировать между собой: меньшее количество

генерируемых электронно-дырочных пар и большее значение напряженности поля.

В процессе изготовления кристаллов микросхем распределение механических напряжений в слоях ТДК меняется, причем релаксация механических напряжений приводит к образованию новых дефектов в слое ТДК. Можно предположить, что в областях высоких механических напряжений исходной КНИ-структуры и структуры на этапе формирования подзатворного ТДК после изготовления микросхем будет наблюдаться повышенная концентрация образовавшихся дефектов. Таким образом, зная начальное распределение механических напряжений, можно прогнозировать распределение механических напряжений и дефектов, вызванных их релаксацией, в конечной структуре.

#### **1.4 Метод, основанный на электронном парамагнитном резонансе**

Теперь перейдем к рассмотрению методов диагностики слоев диоксида кремния, представленных в литературе. Основной метод прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем заключается в моделировании микросхем с использованием компактных моделей элементов, учитывающих дозовое воздействие [20]. В свою очередь, для построения соответствующих компактных моделей проводятся измерения ВАХ и ВФХ тестовых структур под действием ИИ на некоторой выборке [22-25]. Этот метод является обязательным при проектировании ИС, поскольку он дает информацию о стойкости микросхемы в целом. Что касается компактных моделей, то они позволяют в некоторой степени проследить взаимосвязь технологии и дозовой стойкости МОП-транзисторов. Однако такой подход к оценке радиационной чувствительности технологических слоев требует больших материальных и временных затрат. Кроме того, он требует информации о природе дефектов, вызывающих деградацию характеристик транзисторов.

Поскольку к задачам настоящей диссертационной работы относятся разработка метода оперативной оценки дефектности слоев диоксида кремния,

влияющей на дозовую стойкости транзисторов, который позволил бы связать поведение характеристик транзисторов под действием ИИ с параметрами технологии получения диэлектрических слоев, то и в литературном обзоре диссертации делается акцент на методах, обладающих данными качествами.

Поскольку  $E'$ -центры парамагнитны, для оценки их концентрации применяется метод электронного парамагнитного резонанса [26]. Измеряется спектр поглощения электромагнитного излучения ТДК в постоянном магнитном поле. По нему определяют значение постоянного магнитного поля, при котором происходит резонансное поглощение, и  $g$ -фактор. На рисунке 1.8 показаны ЭПР-спектры ТДК сразу после облучения и спустя 1250 минут. Видно, что сначала образуются  $E'_\delta$ -центры, а потом они преобразуются в  $E'_\gamma$ -центры, причем им соответствуют  $g$ -факторы 2.0019 и 2.0005 соответственно (по ним идентифицируют центры). Концентрацию центров определяют по сравнению добротности системы, содержащей исследуемый образец, с добротностью системы, содержащей калибровочный образец. Пространственное распределение центров определяют путем последовательного стравливания слоев  $SiO_2$  и измерения ЭПР-спектров [27].

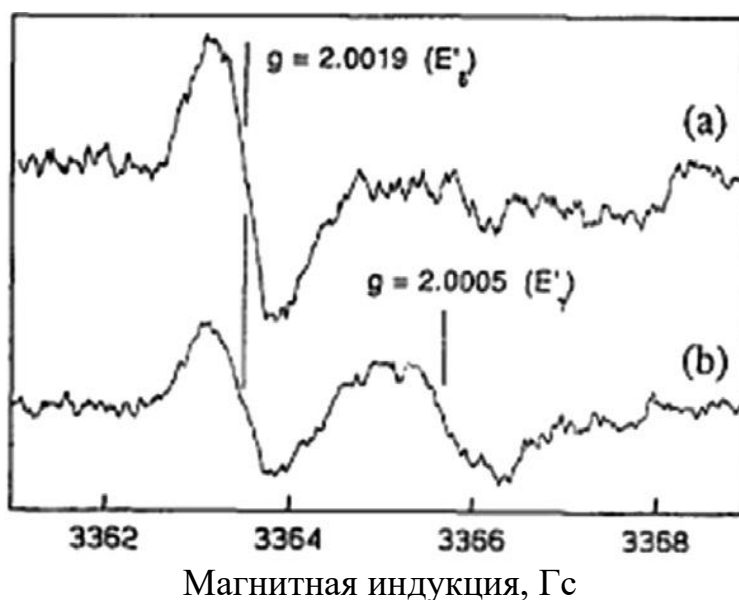


Рисунок 1.8 – ЭПР-спектры ТДК сразу после облучения ИИ (а) и спустя 1250 мин

Как правило, ЭПР-анализ применяют после радиационного воздействия на ТДК, поскольку многие центры (кислородные вакансии, напряженные связи, оборванные связи, пассивированные водородом и ОН-группами) до облучения являются диамагнитными и становятся парамагнитными под действием ИИ. Несмотря на это, существует возможность прогнозировать величину захваченного радиационно-индуцированного заряда в ТДК с помощью метода, представленного в работе [12]. Он основан на термодинамическом описании образования кислородных вакансий при окислении кремния и модели их влияния на сдвиг напряжения плоских зон МОП-структуры.

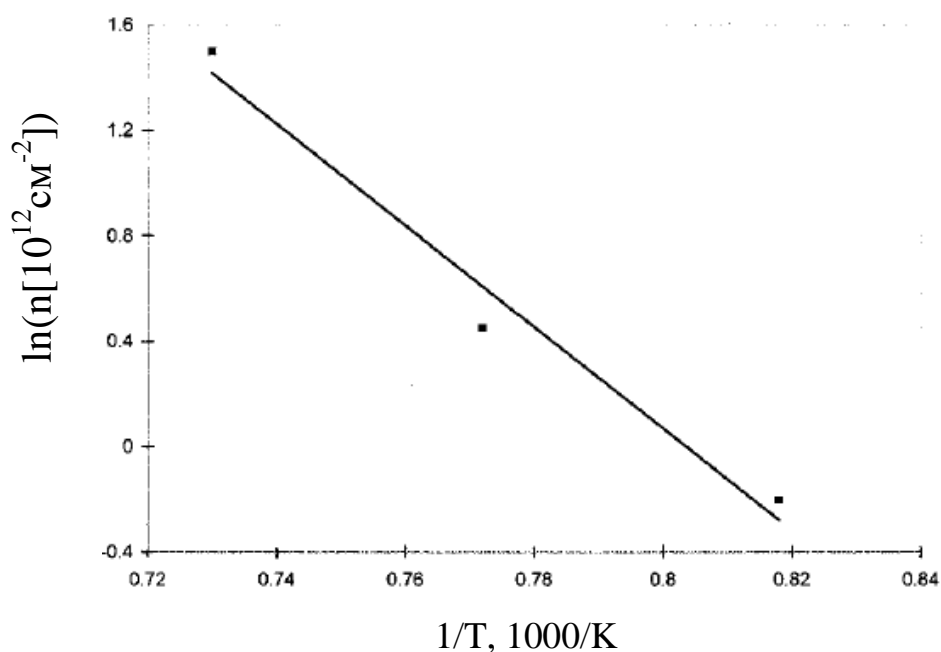


Рисунок 1.9 – Зависимость натурального логарифма концентрации E'-центров от обратной температуры для серии калибровочных измерений

Сначала необходимо охарактеризовать технологический процесс получения слоя ТДК путем ЭПР-измерений концентрации парамагнитных центров в слоях ТДК, подвергнутых отжигу при разных температурах. По результатам этой серии измерений (рисунок 1.9) определяются калибровочные коэффициенты  $a$  и  $b$  для следующего уравнения:

$$n(E') = a \exp\left(-\frac{b}{T}\right), \quad (1.27)$$

где  $n(E')$  – концентрация E'-центров. Коэффициенты  $a$  и  $b$  связаны с термодинамическими параметрами следующим образом:

$$a = N \exp\left(\frac{\Delta S_f}{k}\right), \quad (1.28)$$

$$b = \frac{\Delta H_f}{k}, \quad (1.29)$$

где  $N$  – концентрация точек, доступных для образования E'-центров;  $\Delta S_f$  – вклад неконфигурационной энтропии на один E'-центр;  $\Delta H_f$  – энтальпия формирования одного E'-центра. В результате прогнозирование сдвига напряжения плоских зон осуществляется по следующей формуле:

$$\Delta V_{fb} = \frac{qa \exp\left(-\frac{b}{T}\right)}{C_{ox}} [1 - \exp(-\sigma\eta)], \quad (1.30)$$

где  $\sigma$  – сечение захвата E'-центра;  $\eta$  – флюенс дырок (в результате ионизации или других воздействий). На рисунке 1.10 представлены экспериментальные и моделируемые зависимости  $\Delta V_{fb}$  от  $\eta$ , показывающие хорошее совпадение.

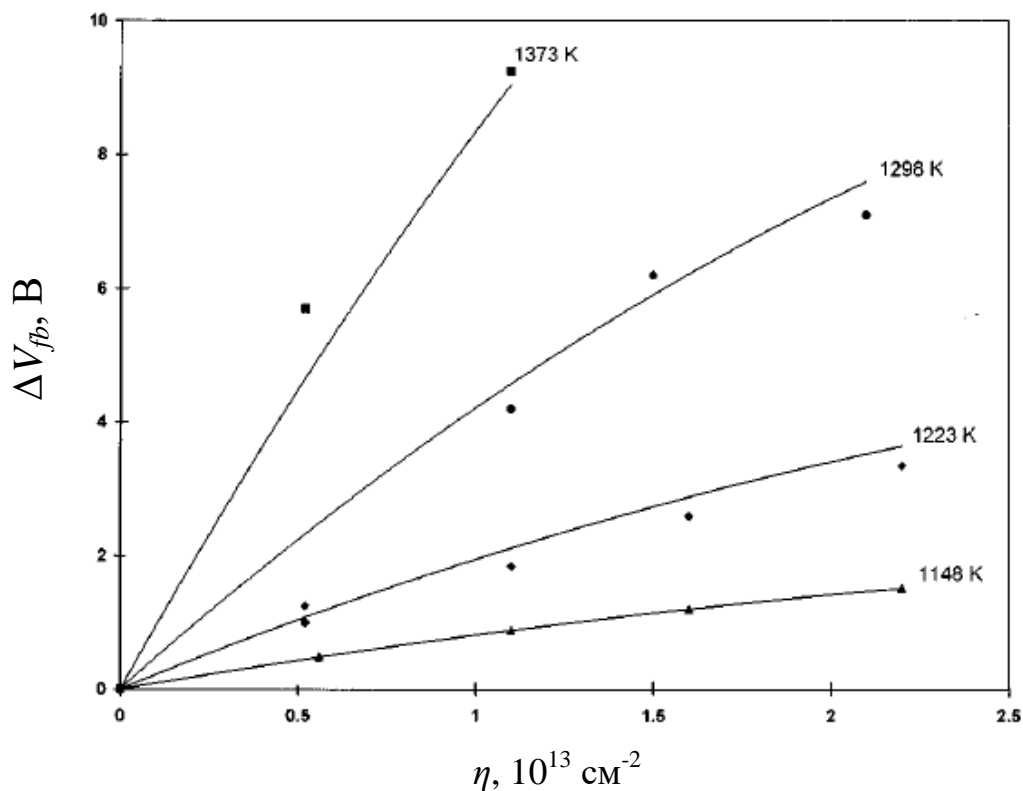


Рисунок 1.10 – Экспериментальные и моделируемые зависимости сдвига напряжения плоских зон от флюенса дырок

## 1.5 Метод, основанный на контроле коэффициента низкочастотного шума тока в канале транзистора

Дефектные центры в слое диоксида кремния и на границах раздела могут быть исследованы путем измерений низкочастотного шума тока транзистора [28]. Для проведения измерения шума транзистор включают в схему, показанную на рисунке 1.11. Измеряется низкочастотный шум тока в канале транзистора в диапазоне 1 – 255 Гц. На затвор и на сток транзистора подаются постоянные напряжения, соответствующие линейному режиму работы транзистора. Исток и подложка заземляются. Флуктуации напряжения канала усиливаются предусилителем и передаются в анализатор спектра.

Типичный вид измеряемого спектра, очищенного от посторонних шумов, представлен на рисунке 1.12 (красная линия). Следует отметить, что данный метод требует специального оборудования, в частности, специальной зондовой системы, предназначенной для исследования низкочастотных шумов. Шум при  $V_D = 0$  В, спектр которого вычитается из измеренного спектра, обусловлен термическим движением носителей в канале, шумом приборов и шумом сети питания.

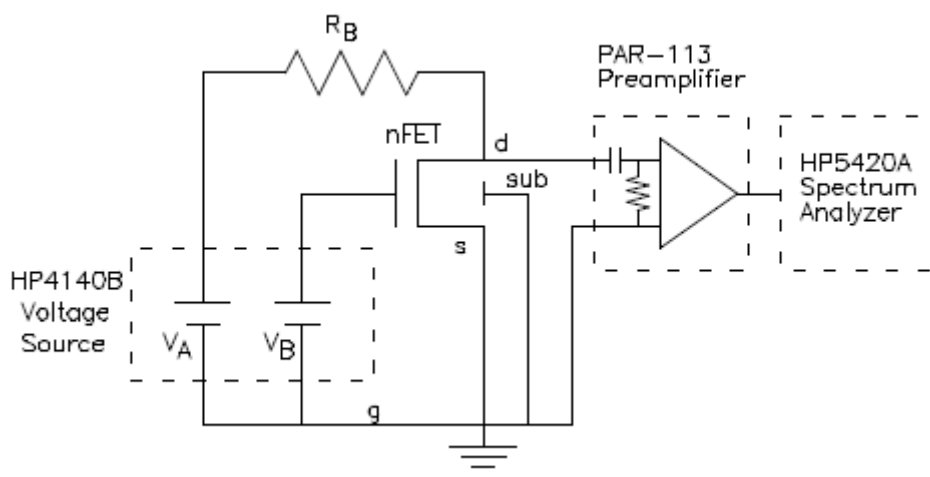


Рисунок 1.11 – Электрическая схема измерений низкочастотного шума тока в канале транзистора

Авторы статьи [28], в которой описывается данный метод, для установления связи между спектром и плотностью ловушек использовали модель, согласно которой носители, перемещаясь по каналу, туннелируют на распределенные

равномерно в пространстве и по энергии ловушки в оксиде и обратно в канал. В этом случае спектр шума определяется следующим выражением

$$S_V(f, \overline{V}_D, V_G) = \frac{q^2}{(LWC_{ox})^2} \frac{\overline{V}_D^2}{f(V_G - V_{th})^2} \frac{kTLWD_{it}(E_F)}{\ln(t_{max}/t_{min})} \quad (1.31)$$

где  $f$  – частота;  $\overline{V}_D$  – среднее напряжение на стоке;  $V_G$  – напряжение на затворе;  $L$  и  $W$  – длина и ширина канала;  $t_{max}$  и  $t_{min}$  – максимальное и минимальное времена туннелирования, зависящие от расстояния между ловушкой и каналом;  $D_{it}(E_F)$  – плотность ловушек в оксиде на единицу энергии на единицу площади в окрестности квазиуровня Ферми для ловушек. Следует отметить, что использовалось допущение об идентичности центров захвата радиационно-индуцированного заряда и центров, вызывающих низкочастотный шум, а также о постоянстве концентрации центров при радиационном воздействии. При этом учитывался захват только основных носителей, а влияние этого процесса на подвижность носителей в канале не учитывалось.

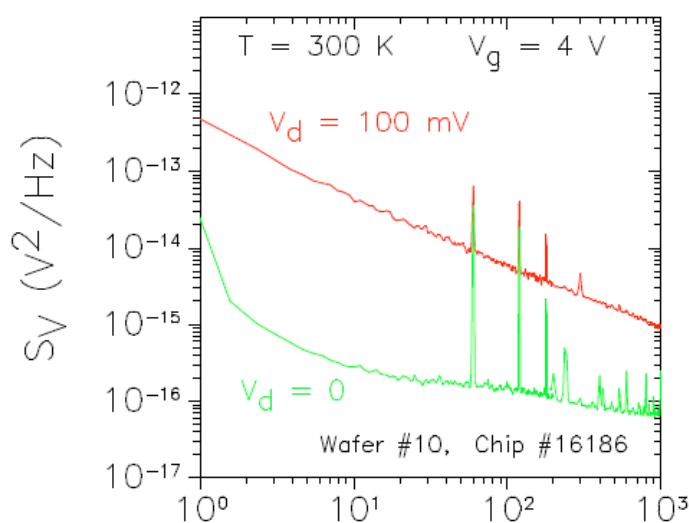


Рисунок 1.12 – Спектр низкочастотного шума тока в канале транзистора

Несмотря на эти допущения в [28] приводятся данные о ярко выраженной зависимости радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения транзистора от коэффициента низкочастотного шума тока в канале транзистора (рисунок 1.13). При этом зависимости для плотности ПС не было обнаружено.

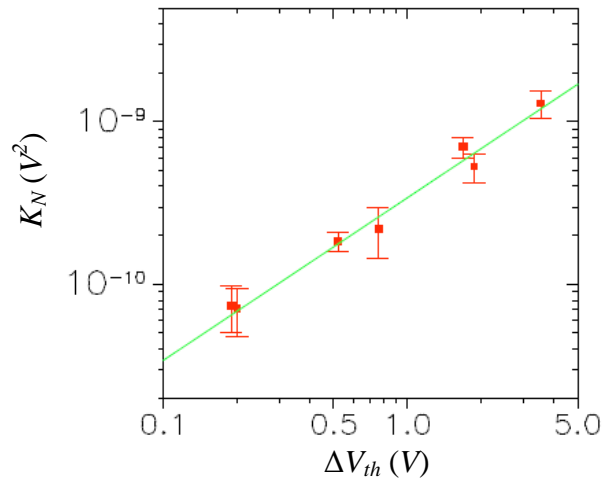


Рисунок 1.13 – Зависимость радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения транзистора от коэффициента низкочастотного шума тока в канале транзистора. Зеленая линия – аппроксимация методом наименьших квадратов

При этом авторы [28] отмечают, что использованные допущения привносят значительную ошибку в моделируемую зависимость сдвига напряжения плоских зон от коэффициента шума (на рисунке 1.13 не показана). Моделируемая зависимость для коэффициента шума получена в следующем виде:

$$K_N \approx \frac{qd_{ox}kT}{\lambda \varepsilon_0 \varepsilon E_g LW \ln(t_{max} / t_{min})} |\Delta V_{th}|, \quad (1.32)$$

где  $\lambda$  – отношение количества центров, захвативших носитель заряда, к общему количеству центров;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Данная оценка дает значения коэффициента шума в 1.15 раза выше измеренного значения.

## 1.6 Методы, основанные на измерении силы тока, протекающего через диэлектрический слой

В результате анализа литературных данных можно выделить три подхода к исследованию диэлектрических слоев на основе измерений их электропроводности: метод термостимулированного тока, методы на основе инжекции носителей заряда и анализ вольт-амперных характеристик диэлектрического слоя.

Метод термостимулированного тока (ТСТ) – это классический метод исследования глубоких центров в диэлектриках и высокоомных полупроводниках [29]. Образец охлаждается до криогенных температур, а затем



медленно нагревается с контролем его проводимости. Далее процедура повторяется с добавлением перевода образца в неравновесное состояние с помощью излучения перед началом нагревания. В процессе нагрева центры возвращаются в равновесное состояние, что сопровождается изменениями тока через образец. Из сравнения измерений образца с возбуждением и образца без возбуждения получают спектр термостимулированного тока (рисунок 1.14).

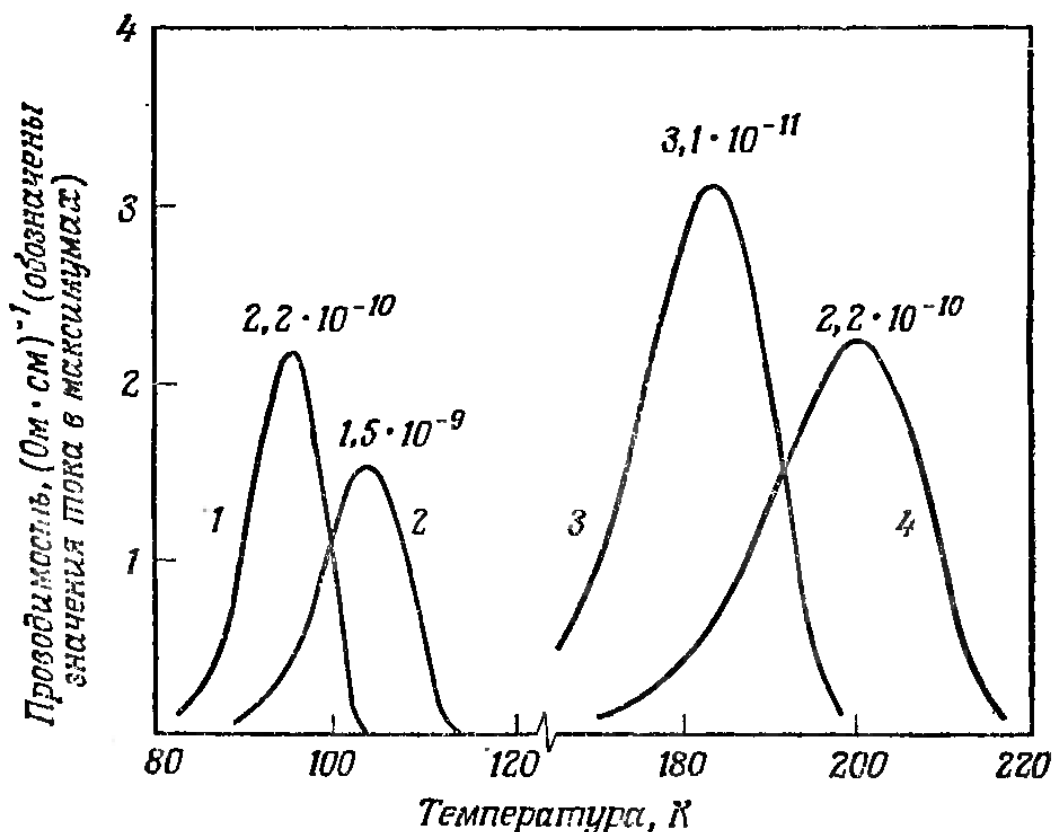


Рисунок 1.14 – Зависимости термостимулированной проводимости от температуры при разной скорости нагрева: 1 и 2 – пики уровня с глубиной залегания 0.2 эВ при скорости нагрева 0.1 и 1 К/с соответственно; 3 и 4 – пики уровня с глубиной залегания 0.4 эВ при скорости нагрева 0.1 и 1 К/с соответственно

Для расчета глубины залегания, концентрации и сечения захвата донорных центров используются следующие уравнения:

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i N_c \sigma_i \nu_T \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{kT}\right) + n(N_i - n_i) \sigma_i \nu_T, \quad (1.33)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau} - \sum_i \frac{dn_i}{dt}, \quad (1.34)$$

где  $n_i$  – концентрация электронов на  $i$ -ом уровне;  $n$  – концентрация электронов в зоне проводимости;  $N_c$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости;  $v_T$  – тепловая скорость электронов;  $\sigma_i$  – сечение захвата электрона на  $i$ -ый уровень;  $N_i$  – концентрация  $i$ -ых центров;  $\tau$  – постоянная времени рекомбинации электронов.

В работе [30] метод термостимулированного тока применяется для исследования энергетического распределения дырок на дефектных центрах в диоксиде кремния путем последовательного проведения циклов облучение ИИ – измерение термостимулированного тока. В работе [31] данный метод (также в сочетании с воздействием ИИ) был применен для исследования дефектности слоя оксида на карбиде кремния. Полученный спектр представлен на рисунке 1.15. Следует отметить, что исследуемыми образцами являлись как конденсаторы, так и транзисторы, что позволило исследовать латеральное распределение центров по площади транзистора путем подачи потенциала на различные контакты. Считалось, что центры представляют собой поверхностные состояния, расположенные на различном удалении от границы раздела («медленные» ПС).

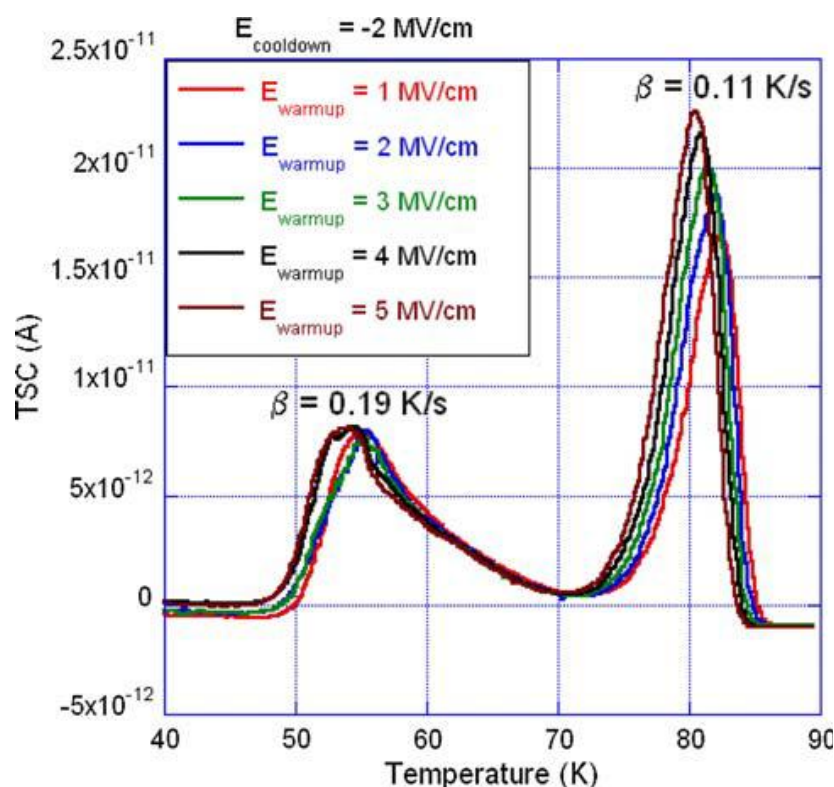


Рисунок 1.15 – Спектр термостимулированного тока для слоя ТДК на карбиде кремния 4H-SiC при разных напряженностях поля в процессе нагрева [31]. Указаны вариации скорости нагрева, которые необходимо учитывать

В качестве итога можно сказать, что метод термостимулированного тока направлен, в первую очередь, на определение глубин залегания центров, т.е. на их идентификацию и изучение их природы. Определение концентрации центров происходит со значительной ошибкой вследствие использования допущений. В частности, считается, что уровень центра в состоянии равновесия заполнен электроном, что наблюдается не всегда. Следует также отметить, что метод требует специального оборудования для создания криогенных температур и относительно больших временных затрат, связанных с циклами нагревания и охлаждения образца.

Поскольку инжектируемые в диэлектрический слой носители заряда способны взаимодействовать с глубокими центрами с определенным сечением захвата, существует возможность оценки дефектности диэлектрического слоя на основе данного процесса.

Измеряется ВАХ диэлектрика с использованием инжектирующего контакта или сильного электрического поля. В случае инжектирующего контакта барьер двойного слоя на контакте металла с изолятором существенно ниже соответствующего барьера – работы выхода носителей из металла в вакуум. Поэтому даже при температурах, не превышающих комнатную, контакт может поставлять достаточное количество носителей для поддержания тока, ограниченного объемным зарядом [32]. Таким образом эффективность инжекции зависит от материала электрода и от уровня Ферми слоя ТДК. В таблице 1.1 представлены работы выхода электронов из некоторых металлов в вакуум [33]. Поскольку уровень Ферми в ТДК в большинстве случаев незначительно отличается от середины запрещенной зоны, то есть потенциальный барьер составляет около 4.5 эВ, для инжекции электронов в ТДК предпочтительнее использовать золотой электрод. Также возможно повышение эффективности инжекции с помощью контакта в виде острия, повышающего локальную напряженность поля [34].

Таблица 1.1 – Работы выхода электронов из некоторых металлов в вакуум (эВ).

Mg	Al	Ni	Cu	Au	Ag
3.7	4.25	4.5	4.25	4.8	4.3

Для повышения уровня инжекции дырок применяется подсветка поверхности диэлектрика вакуумным ультрафиолетовым излучением через полупрозрачный электрод [35] или через бесконтактный электрод в виде острия, создающий коронный разряд и зарядку поверхности диэлектрика ионами [36].

Одним из способов создания инжектирующего контакта является использование между слоями Si и SiO<sub>2</sub> инжектора – слоя пиролитического оксида толщиной около 20 нм, обогащенного кремнием [5]. В инжекторе содержатся области кремния диаметром около 5 нм. Между ними и исследуемым слоем SiO<sub>2</sub> создается сильное локальное электрическое поле, вызывающее туннелирование носителей из областей кремния в исследуемый слой SiO<sub>2</sub>.

Инжектирующий контакт, как правило, используют при монополярной инжекции, то есть при инжекции одного типа носителей с одной стороны диэлектрического слоя. При создании инжектирующего контакта и наличии в диэлектрике мелких моноэнергетических уровней прилипания ВАХ диэлектрика будет иметь вид, показанный на рисунке 1.16 [34] и обусловленный протеканием тока, ограниченного пространственным зарядом, (ТОПЗ). Участок 3, на котором наблюдается резкое возрастание тока, соответствует состоянию системы, при котором все центры захвата в диэлектрике оказываются заполненными и процессы захвата перестают препятствовать перемещению носителей от инжектирующего электрода к противоположному электроду.

В данном случае расчетной формулой для концентрации центров прилипания  $N_T$  для электронов может служить следующее выражение [34]:

$$N_T = 1.1 \cdot 10^6 \frac{\epsilon V_3}{d_{ox}^2} (\text{см}^{-3}) \quad (1.35)$$

где  $V_3$  – напряжение, обозначенное на рисунке 1.16.

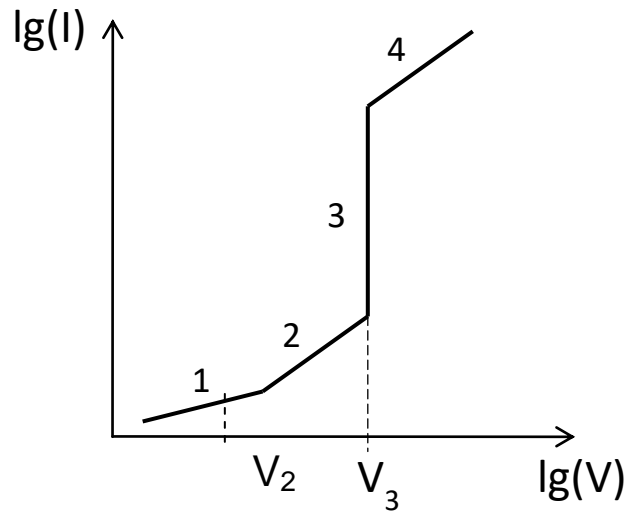


Рисунок 1.16 – ВАХ диэлектрика, содержащего мелкие моноэнергетические уровни прилипания, при монополярной инжекции с помощью инжектирующего контакта

Энергетическое положение центров определяется по следующей формуле:

$$E_c - E_T = kT \ln \frac{N_C}{\theta g N_T}, \quad (1.36)$$

где  $E_T$  – энергетический уровень центра;  $N_C$  – плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика;  $g$  – коэффициент спинового вырождения;  $\theta$  – отношение свободного заряда к захваченному, определяемое по формуле:

$$\theta = 1,8 \cdot 10^{-6} \frac{n_0 d_{ox}^2}{\epsilon V_2}, \quad (1.37)$$

$n_0$  – равновесная концентрация электронов,  $V_2$  – напряжение перехода от закона Ома к току эмиссии (начало участка 2).

В работах [37,38] говорится о наблюдении ТОПЗ при инжекции электронов в ТДК через границу с кремнием, что подтверждается соответствием формы ВАХ рисунку 1.16, в особенности наличием участка 4, когда рост тока замедляется вследствие влияния пространственного заряда (рисунок 1.17). Наличие ТОПЗ можно объяснить специальными методами подготовки поверхности кремния к окислению.

В результате анализа литературных данных можно сделать вывод, что метод оценки концентрации дефектных центров на основе измерения ТОПЗ применяется редко, что можно объяснить сложностью создания инжектирующего

контакта, а также сложностью интерпретации результатов, поскольку для создания пространственного заряда требуется наличие специфических центров – мелких моноэнергетических уровней прилипания.

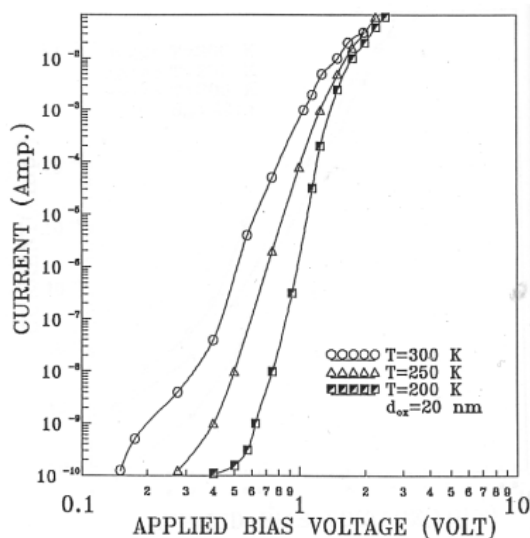


Рисунок 1.17 – ВАХ слоя ТДК, демонстрирующие протекание ТОПЗ [38]

Без создания инжектирующего контакта инжекция, как правило, осуществляется приложением электрического поля высокой напряженности (сильнополевая инжекция). Она обусловлена эмиссией Фаулера-Нордгейма [39]. В данном случае зоны диэлектрика изгибаются достаточно сильно, чтобы происходило туннелирование электронов через треугольный потенциальный барьер (рисунок 1.18). Повышение температуры уменьшает длину потенциального барьера для электронов.

Инжекция Фаулера-Нордгейма широко применяется для электрической имитации радиационного воздействия на диэлектрический слой [40], поскольку инжектированные электроны, разгоняясь, ионизируют диэлектрик, что приводит к процессам, схожим с процессами в диэлектрике под действием ИИ. Дефектность диэлектрика можно оценить по вольт-фарадным характеристикам МДП-структуры до и после инжекции. Данный вид инжекции будет подробно рассмотрен в главе 4 при разработке методики электрической имитации воздействия ИИ на тестовые структуры.

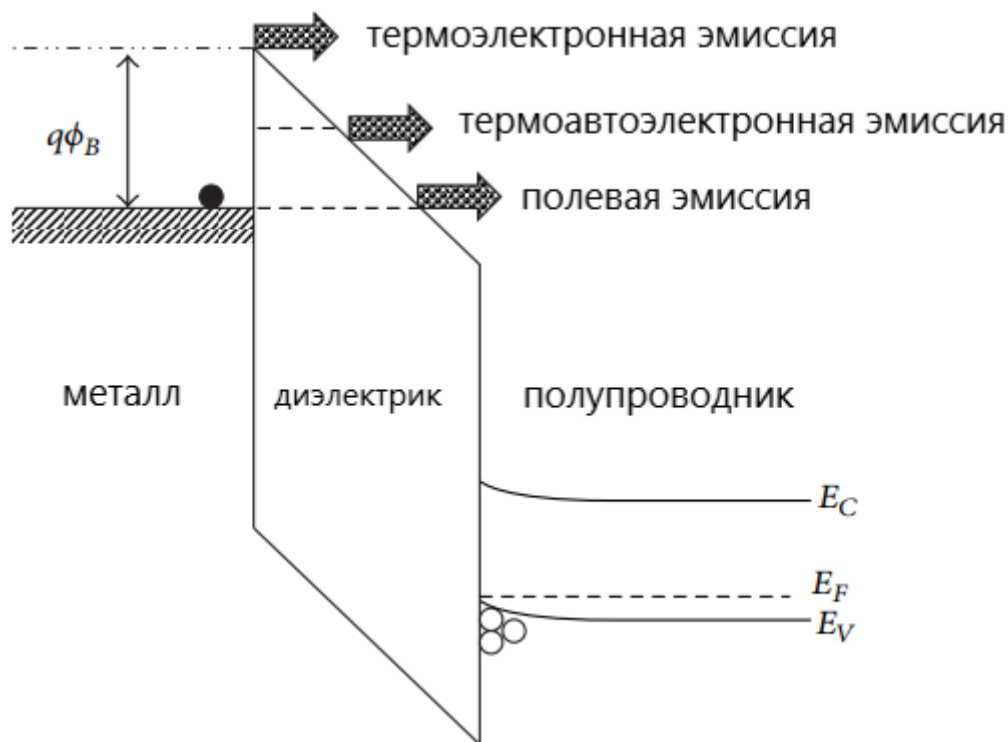


Рисунок 1.18 – Виды эмиссии в МОП-структуре без создания инжектирующего контакта. Полевая и термоавтоэлектронная (термополевая) эмиссии соответствуют эмиссии Фаулера-Нордгейма

Здесь следует отметить, что в литературе существуют данные о взаимосвязи эффективной массы и концентрации центров в запрещенной зоне. Так, в работе [41] проведено моделирование ВАХ тонкопленочного транзистора на основе аморфного соединения InGaZnO, которое показало, что изменение эффективной массы сопровождается изменением плотности ловушек. В работе [42] имеются данные, подтверждающие зависимость эффективной массы электронов от плотности состояний в зоне проводимости.

Ток эмиссии Фаулера-Нордгейма зависит от эффективной массы электронов при туннелировании через треугольный потенциальный барьер вследствие зависимости коэффициента прозрачности от эффективной массы [43]. Коэффициент прозрачности  $D$  также зависит от длины потенциального барьера [44]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m^*(U - E)} dx\right), \quad (1.38)$$

где  $D_0$  – коэффициент пропорциональности;  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка;  $x_1$  и  $x_2$  – точки начала и конца потенциального барьера соответственно;  $U$  – высота потенциального барьера;  $E$  – энергия электрона;  $m^*$  – эффективная масса.

Если рассматривать потенциальный барьер с энергетическим уровнем как два потенциальных барьера с меньшей длиной, то можно сделать вывод, что присутствие центров в приповерхностной области ТДК будет увеличивать коэффициент прохождения, что будет эквивалентно уменьшению эффективной массы. Таким образом, значение эффективной массы в некоторой степени несет информацию о дефектности диэлектрического слоя.

Ток эмиссии Фаулера-Нордгейма также зависит от высоты потенциального барьера. В работе [5] говорится о том, что высота потенциального барьера также зависит от концентрации и вида ловушечных центров вблизи границы раздела, поскольку заряд захваченных на ловушки инжектированных носителей локально изменяет электрическое поле. Это изменение электрического поля позволяет определять количество накопленного в диэлектрике заряда по величине изменения напряжения, необходимого для поддержания постоянного значения тока через диэлектрик.

Для инъекции электронов в диоксид кремния без создания инжектирующего контакта чаще применяется эмиссия Фаулера-Нордгейма. При этом с другой стороны слоя вероятность туннелирования дырок в диоксид кремния меньше вследствие их большей массы. Для инъекции дырок предпочтительнее использовать метод лавинной инъекции [5]. На МДП-структуру подаются импульсы напряжения большой амплитуды, вызывающие в полупроводнике состояние глубокого неравновесного обеднения (рисунок 1.19). Благодаря сильному искривлению валентной зоны полупроводника и кратковременности процесса, инжектируемые дырки при перемещении из толщи полупроводника к диэлектрику успевают сохранить энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера на границе диэлектрика и полупроводника, вызвать ударную ионизацию кремния и проникнуть в диэлектрик вместе с вновь



образовавшимися при ударной ионизации дырками. Лавинная инжекция электронов может осуществляться аналогичным образом.

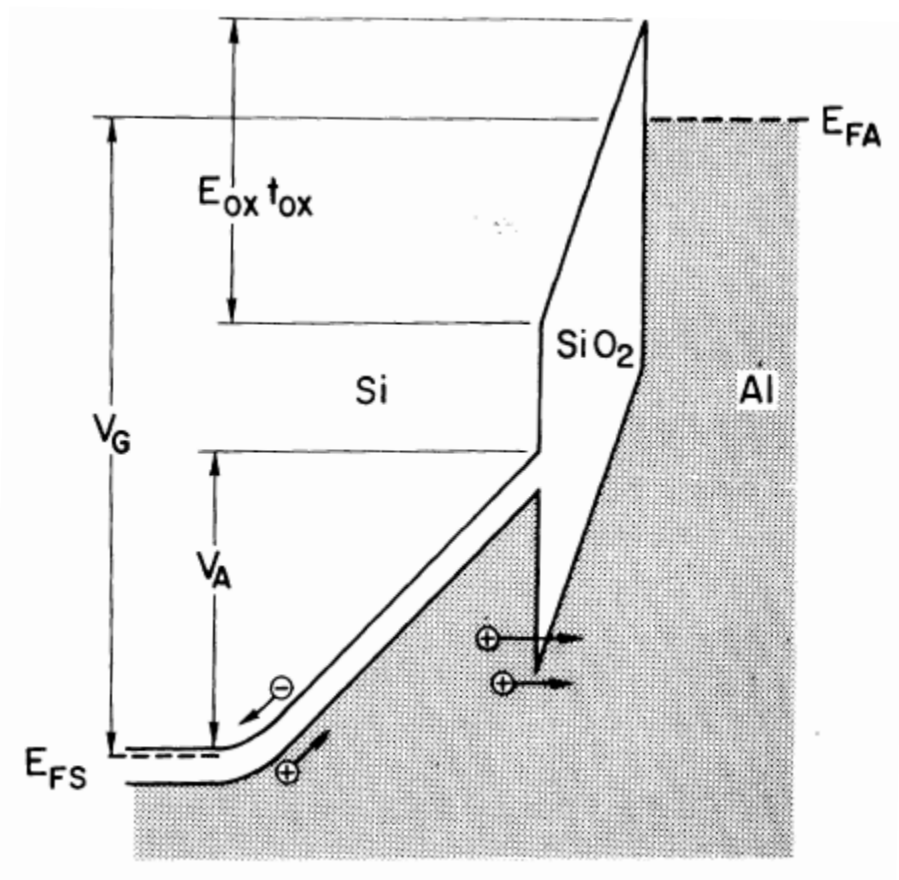


Рисунок 1.19 – Зонная диаграмма МОП-структуры при лавинной инжекции дырок из кремния в SiO<sub>2</sub>

В данном методе вместо МДП структуры может использоваться транзисторная структура (рисунок 1.20). В этом случае изменяя напряжение на затворе и подложке можно регулировать отдельно напряженность в диэлектрике и плотность инжектируемого тока. Для этой же цели может быть использована оптическая подсветка структуры МОП- или транзисторной структуры.

В работе [45] методом лавинной инжекции дырок определены концентрации и сечения захвата дырок на центры в диоксиде кремния и показана схожесть процесса захвата дырок при лавинной инжекции и при воздействии ИИ. В работе [46] проведено сравнение эффективности лавинной инжекции дырок и электронов в SiO<sub>2</sub>. Эффективность лавинной инжекции электронов оказалась в несколько раз выше, но при этом в отличие от дырок их захвата в диэлектрике не наблюдалось вследствие их высокой подвижности.

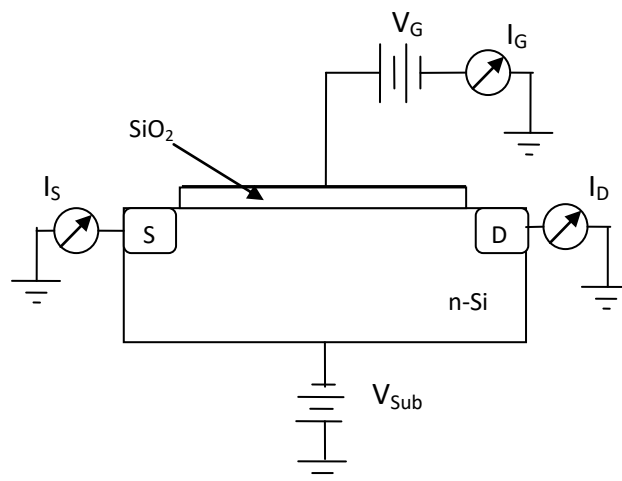


Рисунок 1.20 – Схема эксперимента по исследованию лавинной инжекции в подзатворный диэлектрик МДП-транзистора, которая позволяет независимо регулировать ток инжекции и электрическое поле в диэлектрике

Таким образом, возможны два механизма электрической имитации воздействия ИИ на диэлектрический слой: инжекция Фаулера-Нордгейма и лавинная инжекция. Оба варианта показали свою применимость [40,46]. Однако следует отметить их принципиальное различие. В случае инжекции Фаулера-Нордгейма инжектируемые электроны ионизируют слой диоксида кремния, выступая в роли квантов ИИ. При этом возможна деградация структуры, не свойственная воздействию ИИ: предпробойное состояние и пробой [47]. В случае же лавинной инжекции дырок инжектируемые дырки выступают в роли результата ионизации. В данном случае на адекватность имитации может повлиять отсутствие интенсивной рекомбинации электронно-дырочных пар и менее интенсивное образование поверхностных состояний.

Электропроводность слоев диоксида кремния интенсивно изучалась в научно-технической литературе. При этом измерение ВАХ диэлектрического слоя позволяло получить информацию о всем диапазоне рабочих напряжений вплоть до пробоя. ВАХ слоя диоксида кремния на всем диапазоне напряжений, как правило, нелинейная и состоит из нескольких участков, разделенных точками перегиба, которые соответствуют разным механизмам электропроводности.

В литературе исследование ВАХ не относят к отдельному методу и, как правило, применяют данный подход для получения общей информации об

электропроводности диэлектрического слоя. То есть результатом, как правило, является идентификация механизма электропроводности для данного конкретного случая, а расчет параметров дефектности слоя и их систематизация с учетом технологии получения слоя обычно не проводится.

Рассмотрим литературные данные более подробно.

Идентификация механизма электропроводности заключается в построении ВАХ в системе координат, для которой предполагаемый механизм имеет линейную характеристику. Механизмы электропроводности диэлектрического слоя делятся на граничные, для которых величина тока определяется свойствами границ раздела, и объемные, для которых основной вклад вносят объемные процессы [48]. К граничным относятся эмиссия Шоттки, прямое туннелирование и эмиссия Фаулера-Нордгейма. К объемным механизмам относятся омический механизм, прыжковый, ток, ограниченный пространственным зарядом, ионный механизм и механизм Пула-Френкеля.

В монографии [49] говорится о том, что в подзатворном диоксиде кремния могут наблюдаться два механизма электропроводности: прямое туннелирование (при толщине порядка нанометров) и туннелирование Фаулера-Нордгейма. Действительно, ВАХ слоев ТДК обычно выглядят так, как показано на рисунке 1.21. Участок, соответствующий показанному на рисунке 1.21 для толщины 10 нм и напряжения менее 7 В, часто не поддается анализу и определяется измерительной системой. ВАХ, соответствующая эмиссии Фаулера-Нордгейма, описывается следующей формулой [39]:

$$J = \frac{q^3 E^2 m_0}{8\pi h \varphi_B m^*} \left[ \frac{1}{t^2(y)} \right] \left[ \frac{\pi c k T}{\sin(\pi c k T)} \right] \exp \left( - \left[ \frac{4(2m^*)^{1/2} \varphi_B^{3/2}}{3\hbar q E} \right] v(y) \right), \quad (1.39)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\varphi_B$  – высота потенциального барьера;  $m_0$  – масса свободного электрона;  $m^*$  – эффективная масса;  $t(y)$  и  $v(y)$  – коррекционные параметры, слабо зависящие от параметра  $y$ , определяемого по формуле:

$$y = \frac{1}{\varphi_B} \left( \frac{q^3 E}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0} \right)^{1/2}; \quad (1.40)$$

$c$  – параметр, определяемый по формуле:

$$c = \frac{2(2m^* \varphi_B)^{1/2} t(y)}{\hbar q E} \quad (1.41)$$

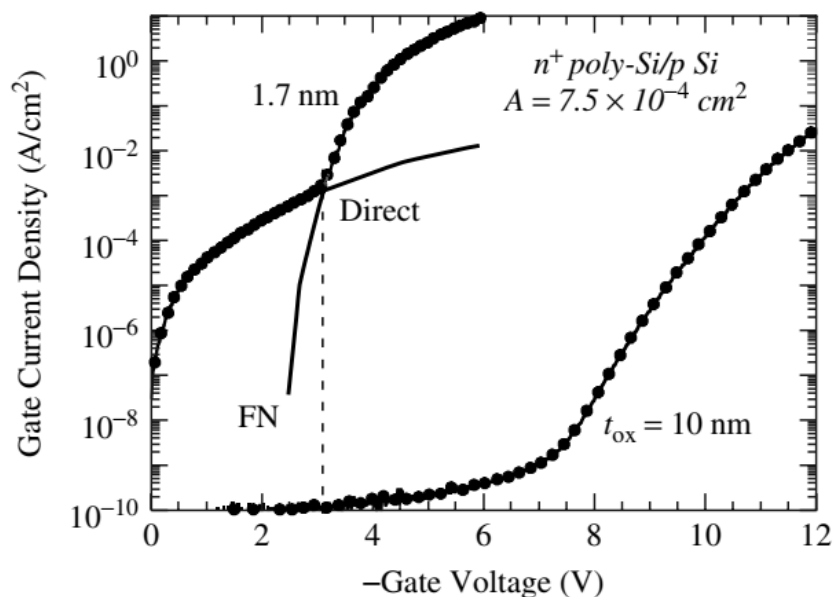


Рисунок 1.21 – Типичные ВАХ подзатворного ТДК

Однако в литературе встречаются наблюдения и других механизмов электропроводности в диоксиде кремния. Это обычно обусловлено повышенной дефектностью слоя или особыми условиями получения исследуемой структуры, созданием повышенной или пониженной температуры при измерении, созданием инжектирующих контактов и т.д. Так, в работе [50] наблюдалась эмиссия Шоттки в МОП-структурах при температуре выше 300°C. В работе [51] исследовались слои диоксида кремния на кремнии в широком диапазоне температур. При температуре выше 450°C при малой напряженности поля (до 0.1 МВ/см) наблюдался омический механизм электропроводности. Эти данные согласуются с теоретическими представлениями, согласно которым эмиссия Шоттки происходит за счет преодоления электронами потенциального барьера на границе раздела слоя, а при омическом механизме электронам необходимо преодолеть всю ширину запрещенной зоны.

Эмиссия Шоттки описывается следующей формулой [48]:

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q(\varphi_B - \sqrt{qE/(4\pi\epsilon\epsilon_0)})}{kT}\right), \quad (1.42)$$

где  $A^*$  - эффективная постоянная Ричардсона, определяемая по формуле:

$$A^* = \frac{4\pi q k^2 m^*}{h^3} = \frac{120 m^*}{m_0}. \quad (1.43)$$

Участок омической проводимости описывается следующим выражением [48]:

$$J = q\mu E N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right), \quad (1.44)$$

где  $\mu$  - подвижность электронов в  $\text{SiO}_2$ ;  $N_C$  - плотность состояний в зоне проводимости  $\text{SiO}_2$ ;  $E_C$  - энергия дна зоны проводимости;  $E_F$  - уровень Ферми.

Наблюдение ионного механизма электропроводности на ВАХ затруднено вследствие их низкой подвижности и пониженной растворимости щелочных металлов (вносящих основной вклад в ионную проводимость) в кремнии относительно диоксида кремния [52]. Поэтому, как правило, измеряется ток смещения при измерении низкочастотной ВФХ при температуре около (200 – 300) °С (рисунок 1.22). При наличии загрязнений подвижными ионами на уровне  $10^9 - 10^{13} \text{ см}^{-2}$  [53] на низкочастотной ВФХ в области обеднения появляется пик тока смещения за счет отклика ионов на переменное электрическое поле [49].

Однако при некоторых условиях ионная проводимость может проявляться на ВАХ, в результате чего плотность тока будет соответствовать следующему выражению [33]:

$$J = a \frac{E}{T} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT}\right), \quad (1.45)$$

где  $a$  - коэффициент пропорциональности;  $\Delta E_a$  - энергия активации перемещения ионов.

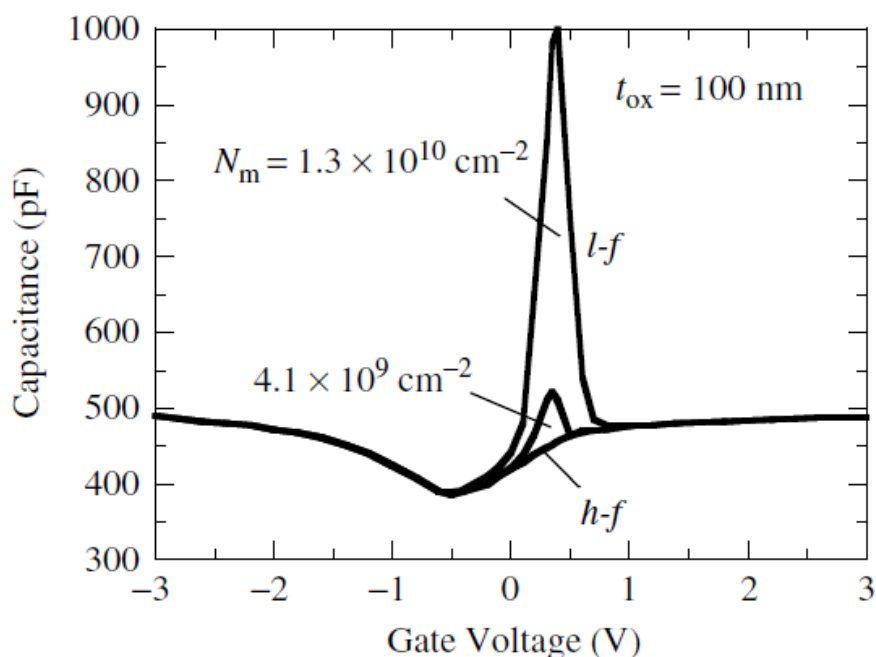


Рисунок 1.22 – Низкочастотная ВФХ и низкочастотные ВФХ МОП-структуры в случае различного уровня загрязнения диэлектрика подвижными ионами [49]

Прыжковый механизм заключается в туннелировании электронов между достаточно близко расположенными центрами в объеме диэлектрика. В однородных слоях ТДК он практически не наблюдается вследствие ряда причин. Во-первых, несмотря на большую концентрацию центров в переходном слое, а расстояние между центрами в объеме ТДК слишком велико. При прыжковом механизме расстояния туннелирования составляют порядка 1 нм [48]. Это соответствует концентрации центров порядка  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , что значительно больше концентрации центров в объеме ТДК, полученного без специального введения центров и по стабильной технологии. Следует отметить, что прыжковый механизм наблюдается в диоксиде кремния, содержащем кластеры таких элементов, как С, Si, Ge [54]. Это можно объяснить тем, что кластеры создают уровни вблизи уровня Ферми диэлектрика, что способствует туннелированию электронов через границы раздела слоев. Кроме того, возможно локальное увеличение поля на границах кластеров, повышающее вероятность туннелирования. Следует отметить, что влияние центров в приповерхностной области ТДК на эффективную массу электронов при туннелировании Фаулера-Нордгейма схоже с прыжковым механизмом электропроводности.

Прыжковый механизм описывается следующей формулой [48]:

$$J = qa_j n \nu \exp\left(\frac{qaE}{kT} - \frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.46)$$

где  $a_j$  – расстояние прыжка между уровнями;  $\nu$  – частота температурных колебаний электрона на уровне;  $E_a$  – энергия активации прыжка.

Также в слое ТДК возможна проводимость за счет эффекта Пула-Френкеля [55,56]. Он заключается в понижении потенциального барьера для электронов на донорных уровнях диэлектрика под действием электрического поля (рисунок 1.23). При достаточной температуре электроны попадут в зону проводимости через пониженный потенциальный барьер и внесут вклад в проводимость диэлектрика.

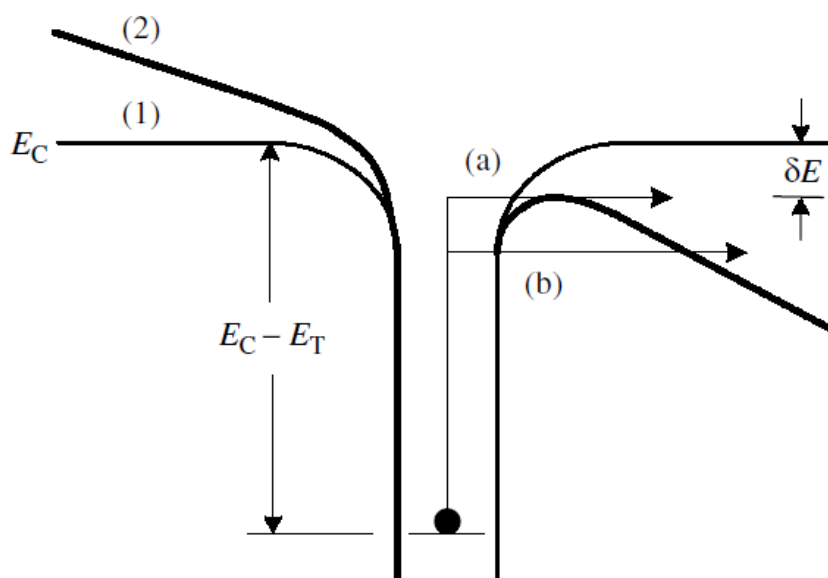


Рисунок 1.23 – Иллюстрация эффекта Пула-Френкеля на участке зонной диаграммы: 1 – край зоны проводимости в отсутствие внешнего электрического поля; 2 – край зоны проводимости при воздействии внешнего поля; а – перемещение электрона в зону проводимости через пониженный потенциальный барьер; б – туннелирование электрона в зону проводимости через пониженный потенциальный барьер с участием фонона

В работе [57] путем анализа ВАХ слоя диоксида кремния показано, что ток утечки, вызванный стрессом, (*SILC – stress induced leakage current*) может быть обусловлен эффектом Пула-Френкеля. В работе [58] исследованы слои диоксида кремния, подверженные отжигу в азоте, и показано протекание в них тока как за счет прыжкового механизма, так и за счет эффекта Пула-Френкеля. В работе [59] эффект Пула-Френкеля наблюдался в слоях диоксида кремния, содержащих ионы меди. Можно сделать вывод, что эффект Пула-Френкеля возникает, как правило,

при повышенной дефектности слоя диоксида кремния – как собственной, так и примесной. Данный механизм электропроводности имеет важное значение в настоящей диссертационной работе, поэтому будет более подробно рассмотрен далее.

### **Выводы по главе 1**

1) В слоях диоксида кремния присутствуют различные дефекты (собственные, примесные, обусловленные механическими напряжениями).

2) Присутствие тех или иных дефектов и их количество определяются технологией получения слоя диоксида кремния (влажное, пирогенное, паровое, сухое окисление), исходной структурой кремния, термическим бюджетом всего технологического процесса.

3) Основную роль в накоплении заряда в слое диоксида кремния под действием ионизирующего излучения играют следующие дефекты: вакансии кислорода, трехкоординированный кремний, междоузельный кислород, а также водород и ОН-группы.

4) Наибольшее распространение в области прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем получили методы: электронного парамагнитного резонанса; контроля ВАХ и ВФХ тестовых структур в процессе набора дозы с последующей разработкой компактных моделей транзисторов; метод, основанный на измерении коэффициента низкочастотного шума транзистора; методы, основанные на инъекции заряда в диэлектрический слой.

5) Электропроводность слоя диоксида кремния отражает природу и концентрацию дефектов в его объеме и на границах раздела.

6) К распространенным методам оценки дефектности диэлектрических слоев на основе измерения силы тока, протекающего через диэлектрик, относятся: метод термостимулированного тока и методы, основанные на инъекции заряда в диэлектрический слой.

7) Как правило ВАХ слоя диоксида кремния содержит два участка: омической и туннельной проводимости. Однако в зависимости от содержания тех



или иных дефектов могут проявляться и участки, обусловленные другими механизмами, в частности, эффектом Пула-Френкеля.

8) Необходима разработка 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 является возможность идентификации дефектов для обеспечения обратной связи с параметрами технологического процесса получения слоев.

9) Необходима разработка 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.

## **2. Разработка метода диагностики слоев диоксида кремния на основе анализа ВАХ тестовых конденсаторов**

### **2.1 Суть метода**

В предыдущей главе были рассмотрены работы, посвященные механизмам электропроводности диэлектрических слоев. 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 ТДК. Между тем, различные механизмы электропроводности ТДК так или иначе зависят от дефектности в объеме слоя или на границах раздела [60, 61]. При этом различные дефекты взаимодействуют между собой, что известно под термином геттерирование [6]. Поэтому комплексный анализ ВАХ слоя ТДК может позволить идентифицировать дефекты и в то же время комплексно диагностировать слой с целью прогнозирования количества накопленного на дефектах заряда в результате радиационного воздействия. Это и стало отправной точкой в разработке в настоящей диссертации метода диагностики радиационной чувствительности слоев ТДК на основе анализа ВАХ диэлектрика.

В настоящей диссертационной работе особое внимание уделяется механизму электропроводности Пула-Френкеля. Это связано с тем, что плотность тока для него зависит от концентрации донорных центров в запрещенной зоне диоксида кремния, а большинство центров захвата заряда в диоксиде кремния являются донорными. Кроме того, как было сказано выше, в литературе представлены наблюдения данного эффекта в диоксиде кремния, но при этом эти исследования не были направлены на прогнозирование величины накопленного заряда под действием ИИ. Возможно, это связано с тем, что эффект Пула-Френкеля в диоксиде кремния проявляется не всегда и при этом в электропроводности участвует лишь часть центров захвата заряда. Однако, основываясь на представлениях о геттерировании примесей и дефектов [6], можно предположить о взаимосвязи различных компонентов примесно-

дефектного состава. Такой подход может позволить не только прогнозировать величину захваченного радиационно-индуцированного заряда, но и установить ее связь с особенностями технологии получения структур, содержащих диэлектрические слои.

Однако рассмотрение механизмов в отдельности является очень грубым приближением. Как говорилось в предыдущей главе, ВАХ слоев ТДК толщиной более 10 нм обязательно содержит участок проводимости Фаулера-Нордгейма вследствие искривления зон под действием поля, а участок Пула-Френкеля проявляется не всегда. При этом он также требует достаточного искривления зон, поэтому участки Пула-Френкеля и Фаулера-Нордгейма будут накладываться друг на друга. Несмотря на то, что это затрудняет анализ ВАХ, это в то же время дает дополнительные преимущества, поскольку участок Фаулера-Нордгейма содержит информацию об эффективной массе электронов и толщине диэлектрического слоя. Эффективная масса, как уже говорилось в главе 2, может зависеть от дефектности переходного слоя, а толщина определяет количество генерируемых под действием ИИ электронно-дырочных пар. Также следует отметить, что в омическом механизме электропроводности также участвуют донорные центры диэлектрика. Таким образом, роли различных механизмов электропроводности будут дополнять друг друга.

Эффект Пула-Френкеля заключается в следующем. Электроны под действием температуры эмитируются с донорных уровней диэлектрика в зону проводимости диэлектрика при снижении потенциального барьера за счет прикладываемого электрического поля (рисунок 1.23). Существует несколько модификаций формулы для плотности тока Пула-Френкеля. Если принять, что в диэлектрическом слое присутствуют только донорные центры, то плотность тока будет определяться по следующей формуле:

$$J_{PF} = \frac{1}{\sqrt{2}} q \mu \left( N_C N_D \frac{1}{d_{ox}} \right)^{\frac{1}{2}} E \exp \left( - \frac{\varphi_D - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \varepsilon \varepsilon_0}}}{2kT} \right), \quad (2.1)$$

где  $q$  – элементарный заряд;  $\mu$  – подвижность электронов в диэлектрике;  $N_C$  – объемная плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика;  $N_D$  – поверхностная концентрация донорных центров в запрещенной зоне диэлектрика;  $d_{ox}$  – толщина диэлектрика;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\varphi_D$  – энергетический уровень донорных центров относительно дна зоны проводимости;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

На рисунке 2.1 представлен пример экспериментальных ВАХ подзатворного ТДК, на одной из которых присутствует участок Пула-Френкеля, а также моделируемые ВАХ, соответствующие омической проводимости, эффекту Пула-Френкеля и сильнополевой инжекции. На участке Пула-Френкеля экстрагируется концентрация центров  $N_D$ . В случае отсутствия участка Пула-Френкеля концентрация донорных центров экстрагируется на участке омической проводимости.

В разделе 2.2 будет описана методика измерений по данному методу, предусматривающая совмещение измерений ВАХ и ВФХ. Из ВФХ до измерения ВАХ рассчитывается толщина ТДК:

$$d_{ox} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C_{ox}}, \quad (2.2)$$

где  $S$  – площадь обкладок тестового конденсатора.

Величина сдвига ВФХ до и после последовательного выполнения измерения ВАХ и прикладывания термополевого стресса применяется для

определения эффективного сечения захвата центров в ТДК по следующей формуле:

$$\sigma = S \frac{\Delta V_{fb} C_{ox}}{Q_i}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta V_{fb}$  – сдвиг напряжения плоских зон,  $Q_i$  – инжектированный заряд.

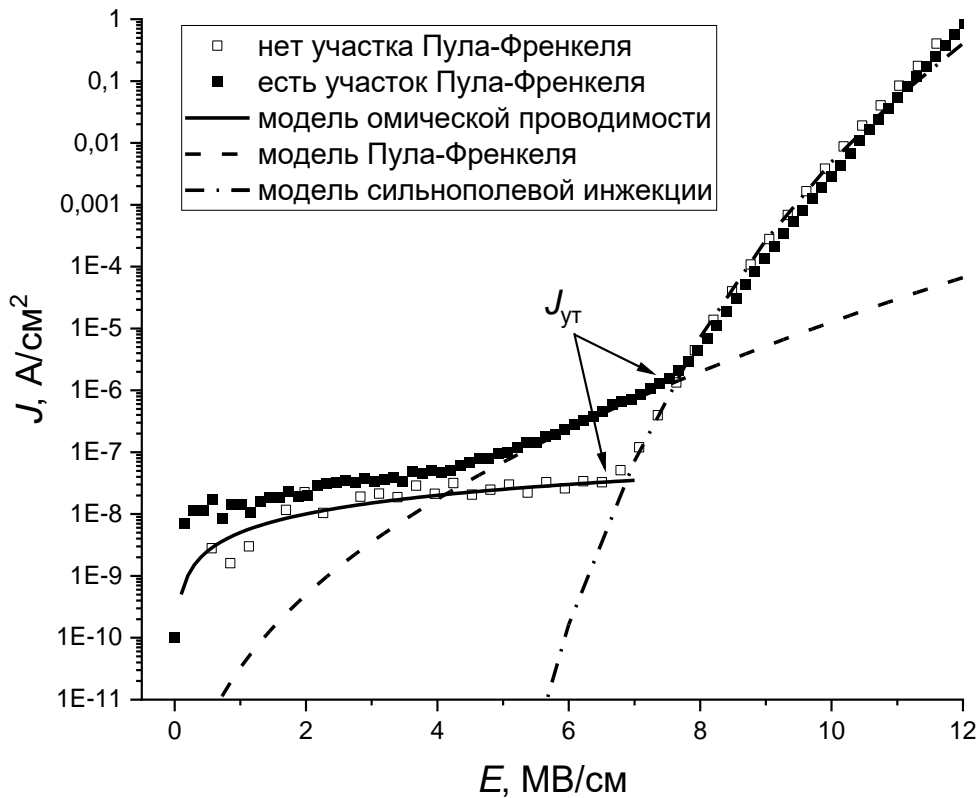


Рисунок 2.1 – Типичные экспериментальные ВАХ подзатворного диоксида кремния на объемном кремнии и моделируемые участки омической проводимости, эффекта Пула-Френкеля и сильнополевой инжекции с указанием точек, соответствующих параметру плотности тока утечки  $J_{ут}$

На участке Фаулера-Нордгейма экстрагируются величины эффективной массы  $m^*$  и длины потенциального барьера. Величина  $m^*$  экстрагируется напрямую из выражения (2.13), длина барьера  $l$  рассчитывается на основании зонной диаграммы (рисунок 1.18) по формуле:

$$l = \varphi_B \frac{d_{ox}}{qV}, \quad (2.4)$$

где  $\varphi_B$  – высота потенциального барьера, экстрагируемая из выражения (2.13);  $V$  – напряжение на тестовом конденсаторе, соответствующее началу участка проводимости Фаулера-Нордгейма.

В результате можно ввести интегральный параметр, позволяющий оценить дефектность слоя:

$$\xi = \alpha + \beta = \frac{d_{ox}}{l} N_D \sigma + \frac{m_0}{m^*} \frac{l}{d_{ox}}. \quad (2.5)$$

Слагаемое  $\alpha$  отражает дефектность объема слоя, а слагаемое  $\beta$  – качество границы раздела [62-66]. Использование суммирования обусловлено тем, что ток через диэлектрик представляет собой сумму токов для разных механизмов электропроводности. Первое слагаемое является аналогом коэффициента  $\alpha_{ox}$  из формулы (1.3) через концентрацию донорных центров в диэлектрике. Оно по сути представляет собой отношение суммы сечений захвата дефектных центров к площади диэлектрика.

Второе слагаемое представляет собой произведение. Отношение длины потенциального барьера к толщине диэлектрика умножается на отношение массы покоя электрона к его туннельной эффективной массе. В первом приближении можно считать, что длина потенциального барьера равна толщине переходного слоя  $\delta x$ . Таким образом, оба слагаемых как бы являются отношением неидеальности структуры к идеальности, умноженным на взвешивающий коэффициент.

Поскольку участок Пула-Френкеля, в отличие от участка Фаулера-Нордгейма, проявляется не всегда, он более чувствителен к дефектности слоя. С учетом этого, а также учитывая тот факт, что при оценке технологического разброса очень важна точность при относительном определении параметров, можно сказать, что при оценке дефектности с помощью коэффициента  $\xi$  целесообразно величины  $\sigma$ ,  $l$  и  $m^*$  определить однократно для оценки технологии в целом, а затем величину  $N_D$  определять для каждой тестовой структуры. Это можно считать физически обоснованным, поскольку величины  $\sigma$  и  $l$  описывают природу дефектов, а  $N_D$  – их количество. Что касается туннельной эффективной

массы  $m^*$ , то ее чувствительность к количеству дефектов значительно ниже, чем чувствительность тока Пула-Френкеля  $I_{PF}$  к величине  $N_D$ , поскольку туннелирование может происходить напрямую в зону проводимости диэлектрика без участия дефектного центра. Таким образом, для характеристики технологии получения слоя в целом следует применять коэффициент дефектности  $\zeta$  путем его усреднения по партии, а для описания технологического разброса использовать параметр плотности тока утечки  $J_{ут}$ .

## **2.2 Методика измерений (тестовые структуры, схема измерений, условия измерений)**

Для полной совместимости метода с методиками контроля электрофизических параметров тестовых структур, в частности, емкости конденсаторов, для измерений ВАХ диэлектрических слоев были использованы стандартные МОП-конденсаторы. К некоторым особенностям можно отнести применение конденсаторов большой площади для повышения чувствительности измерений в области малых напряженностей, а также использование потенциала столика зондовой системы в случае исследования захороненного оксида.

На рисунках 2.2 и 2.3 представлен поперечный разрез и топология тестовых конденсаторов для исследования подзатворного ТДК и вспомогательных диэлектрических слоев, которые осаждались в качестве подзатворного диэлектрика. На рисунке 2.4 представлена топология конденсатора большой площади.

Рассмотрим тестовые конденсаторы для исследования захороненного оксида. Толщины захороненного оксида составляли 150 и 200 нм. Конденсатор на основе транзисторной структуры с размерами  $200 \times 500$  мкм<sup>2</sup> и  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> представлен на рисунке 2.5. Данная ТС позволяет исследовать свойства верхней границы раздела захороненного оксида в транзисторной структуре.

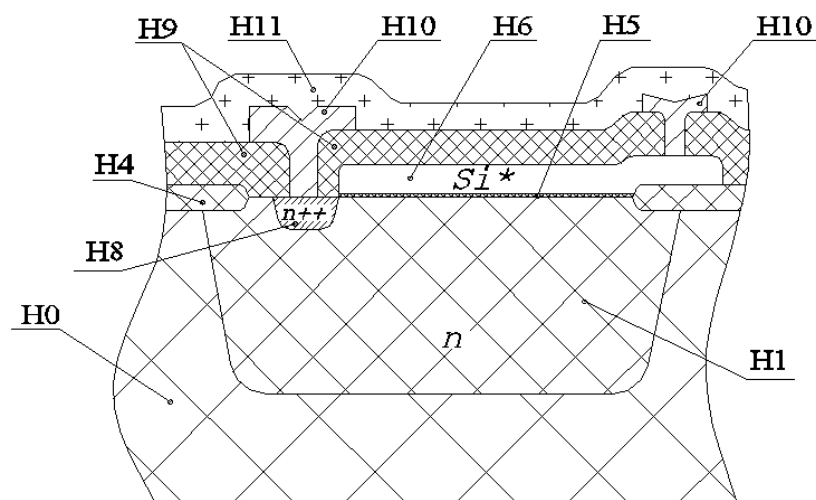


Рисунок 2.2 – Поперечный разрез тестового конденсатора: Н0 – подложка p-Si; Н1 – n-карман; Н4 – боковая изоляция LOCOS; Н5 – исследуемый диэлектрический слой; Н6 – поликремниевый затвор; Н8 – сильнолегированная область n++-Si; Н9, Н10, Н11 – изоляционные и пассивирующие слои

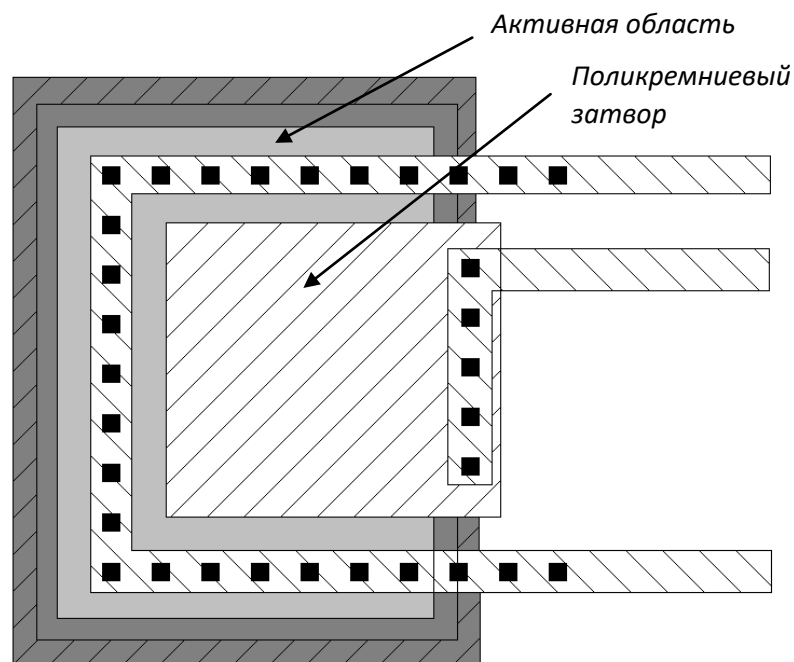


Рисунок 2.3 – Топология тестового конденсатора 100x100 мкм<sup>2</sup>

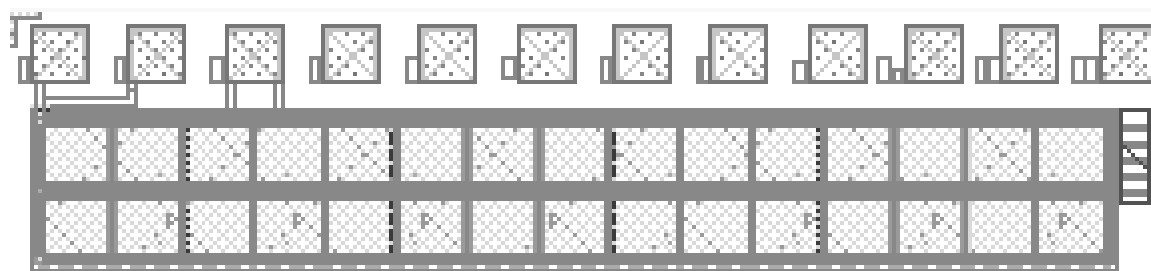


Рисунок 2.4 – Топология тестового конденсатора большой площади, состоящего из 30 конденсаторов 100x100 мкм<sup>2</sup>, соединенных параллельно



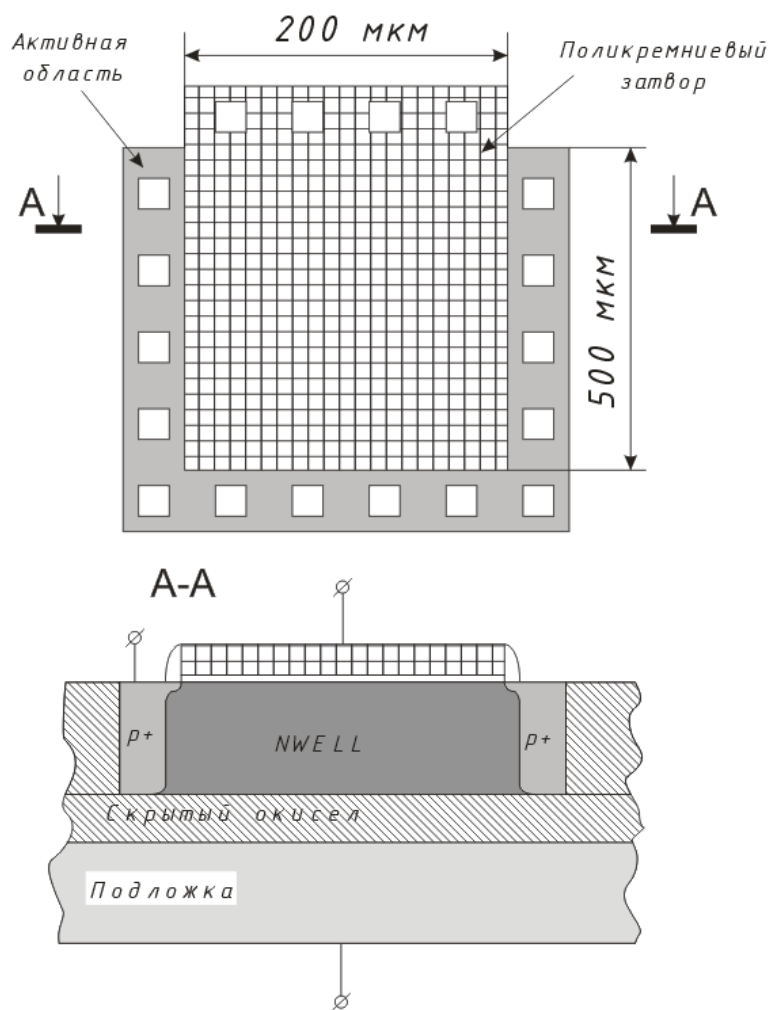


Рисунок 2.5 – Емкость между n – карманом и p<sup>+</sup> - поликремнием

Конденсатор между p-карманом и p<sup>+</sup>-поликремнием с размерами 200×500 мкм<sup>2</sup> и 100×100 мкм<sup>2</sup> показан на рисунке 2.6. Благодаря отсутствию p-n-перехода в активной области данная емкость позволила упростить расчет параметров захороненного оксида по измеренным ВЧ ВФХ.

Конденсатор между p<sup>+</sup>-Si и подложкой размером 200×500 мкм<sup>2</sup> и 100×100 мкм<sup>2</sup> представлен на рисунке 2.7. Данная тестовая емкость позволила максимально упростить расчет встроенного заряда захороненного оксида, но при этом было невозможно исследовать поверхностные состояния на границе с приборным слоем и разделить встроенный заряд, сосредоточенный у верхней и нижней границ захороненного оксида.

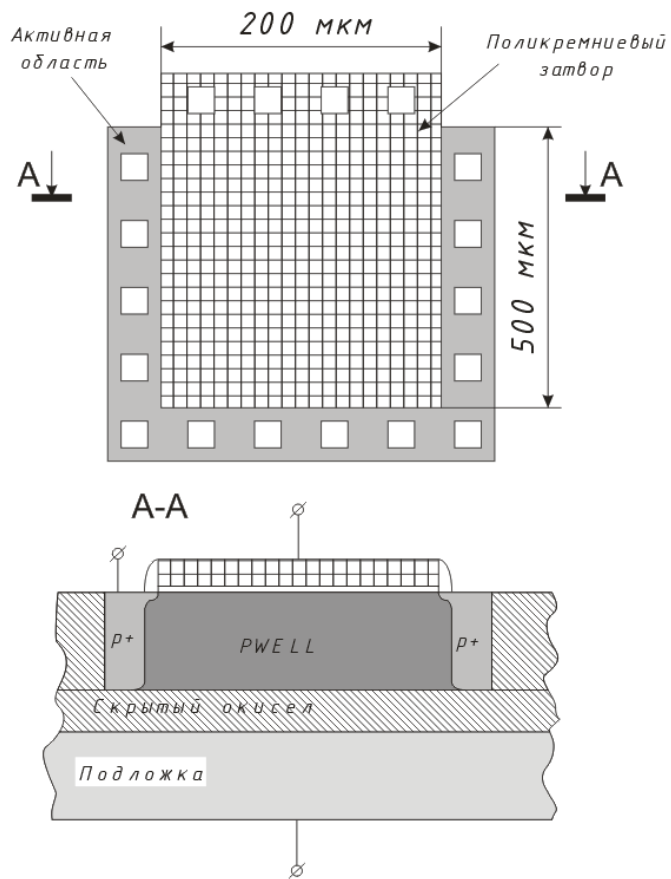


Рисунок 2.6 – Емкость между p-карманом и p<sup>+</sup>-поликремнием

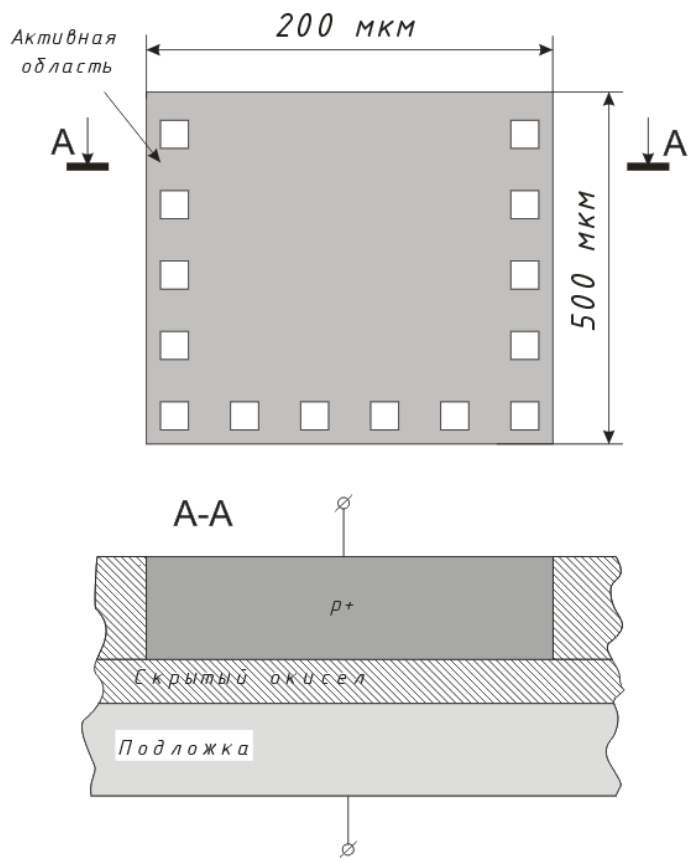
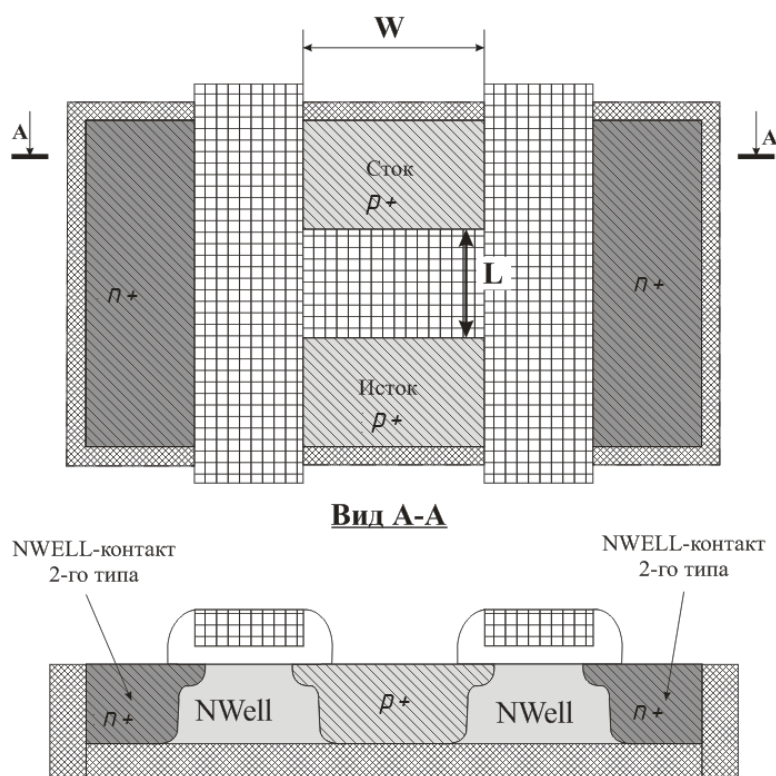


Рисунок 2.7 – Емкость между p<sup>+</sup>-Si и подложкой (200×500 мкм<sup>2</sup>)

В настоящей работе также проводился расчет величины встроенного заряда и плотности поверхностных состояний захороненного оксида по экспериментальным вольтамперным характеристикам обратных транзисторов. Тестовыми структурами являлись стандартные тестовые транзисторы, в том числе, транзисторы Н-типа, однако в качестве затвора и подзатворного диэлектрика выступали кремниевая подложка и захороненный оксид структуры КНИ соответственно.

Транзистор Н-типа (рисунок 2.8) обеспечивает независимый контакт к телу транзистора. Благодаря этому были измерены семейства входных ВАХ обратных n-канальных транзисторов при различных напряжениях на теле транзистора, по которым были рассчитаны профили легирования р-карманов исследованных партий КМОП КНИ ИС.



W-ширина канала; L-длина канала

Рисунок 2.8 – Транзистор Н-типа

На рисунке 2.9 представлена блок-схема измерительного комплекса. Измерения ВЧ ВФХ проводятся при частоте 1 МГц с помощью четырехпроводного модуля измерителя ВЧ ВФХ (далее – измеритель емкости),

работающего в режиме автобалансировки. Для измерений ВАХ применяется два модуля источника-измерителя с разрешением по току 10 фА, подключаемые к нижней и верхней обкладке тестового конденсатора. Коммутация измерительных модулей и терминалов конденсатора выполняется с помощью матричного коммутатора. Измерения автоматизируются посредством интерфейса GPIB в соответствии с алгоритмом измерений.

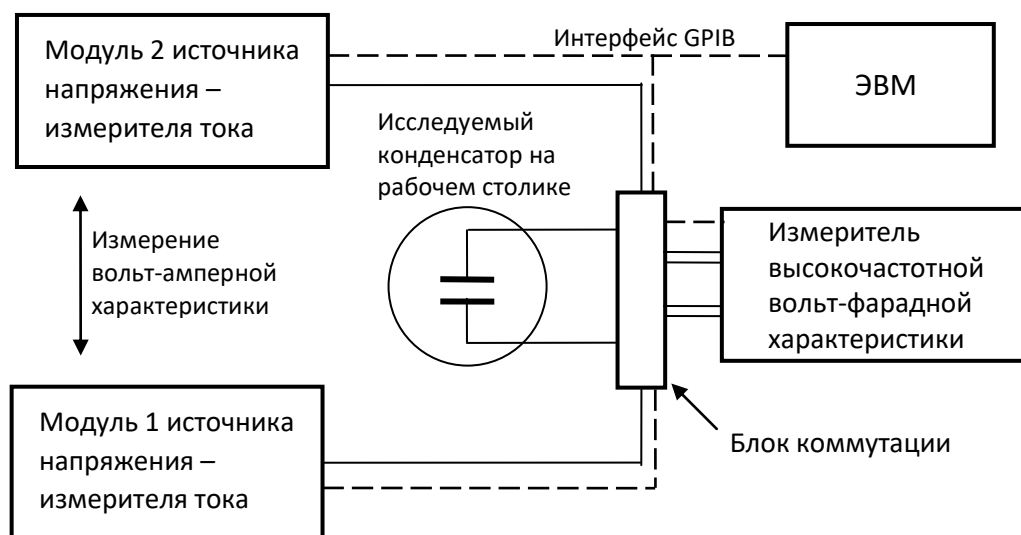


Рисунок 2.9 – Блок-схема измерительного комплекса [62]

На рисунке 2.10 представлен алгоритм измерений по разработанному методу. В начале измерений блок коммутации соединяет контакты с низким и высоким потенциалами измерителя емкости соответственно с нижней и верхней обкладками тестового МОП-конденсатора, содержащего слой ТДК. Производится измерение ВЧ ВФХ. Затем блок коммутации отключает от терминалов конденсатора измеритель емкости и подключает два модуля источника-измерителя каждый к своей обкладке тестового конденсатора. Производится измерение ВАХ. Затем напряжение устанавливается на уровне стресса и выдерживается в течение некоторого интервала времени. Далее блок коммутации снова переключает тестовый конденсатор к измерителю емкости. Измеряется повторная ВЧ ВФХ в том же режиме.

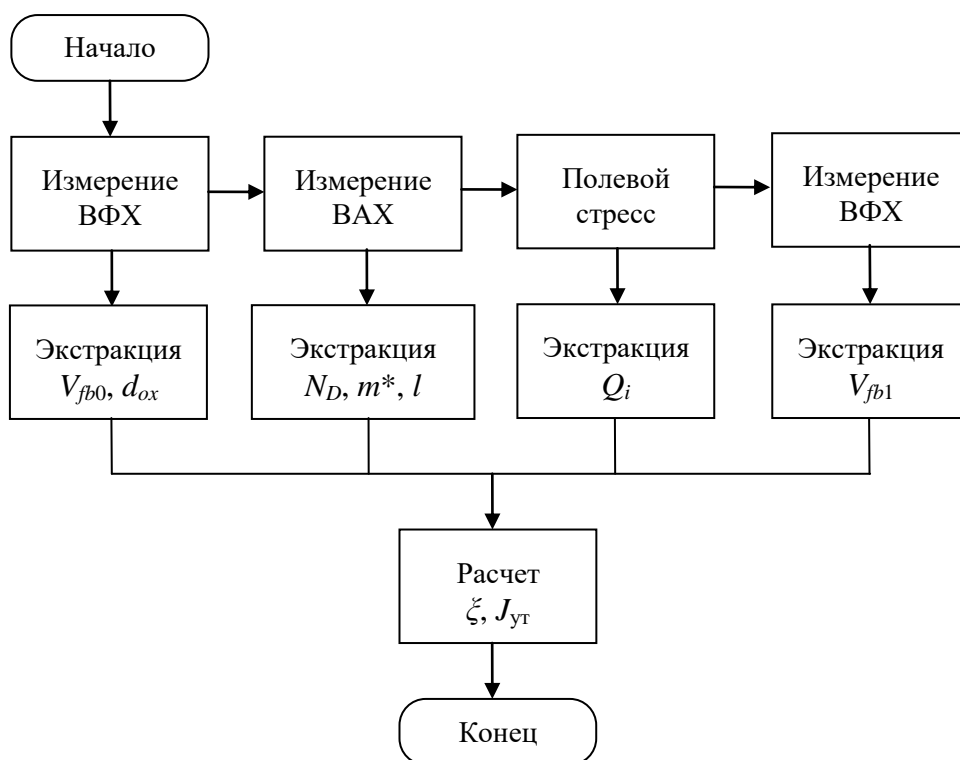


Рисунок 2.10 – Алгоритм измерений по разработанному методу. Здесь  $V_{fb0}$  и  $V_{fb1}$  – напряжение плоских зон конденсатора до и после измерений ВАХ и термополевого стресса [62]

На рисунке 2.11 представлена схематическая временная развертка измерений ВАХ и стрессового воздействия. На каждом этапе производится экстракция соответствующих параметров, входящих в формулу (2.5), путем моделирования ВАХ и ВЧ ВФХ. Наличие стрессового воздействия необходимо для электрической имитации радиационного воздействия на слой ТДК с помощью сильнополевой инжекции носителей заряда с количеством инжектированного заряда  $Q_i$ . Сдвиг ВЧ ВФХ до и после стресса несет информацию об эффективном сечении захвата  $\sigma$ .

Следует отметить, что целесообразно применять коэффициент  $\xi$  для диагностики слоя ТДК 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  $J_{ут}$ , соответствующей максимальной точке участка Пула-Френкеля или омической проводимости (см. рисунок 2.1).

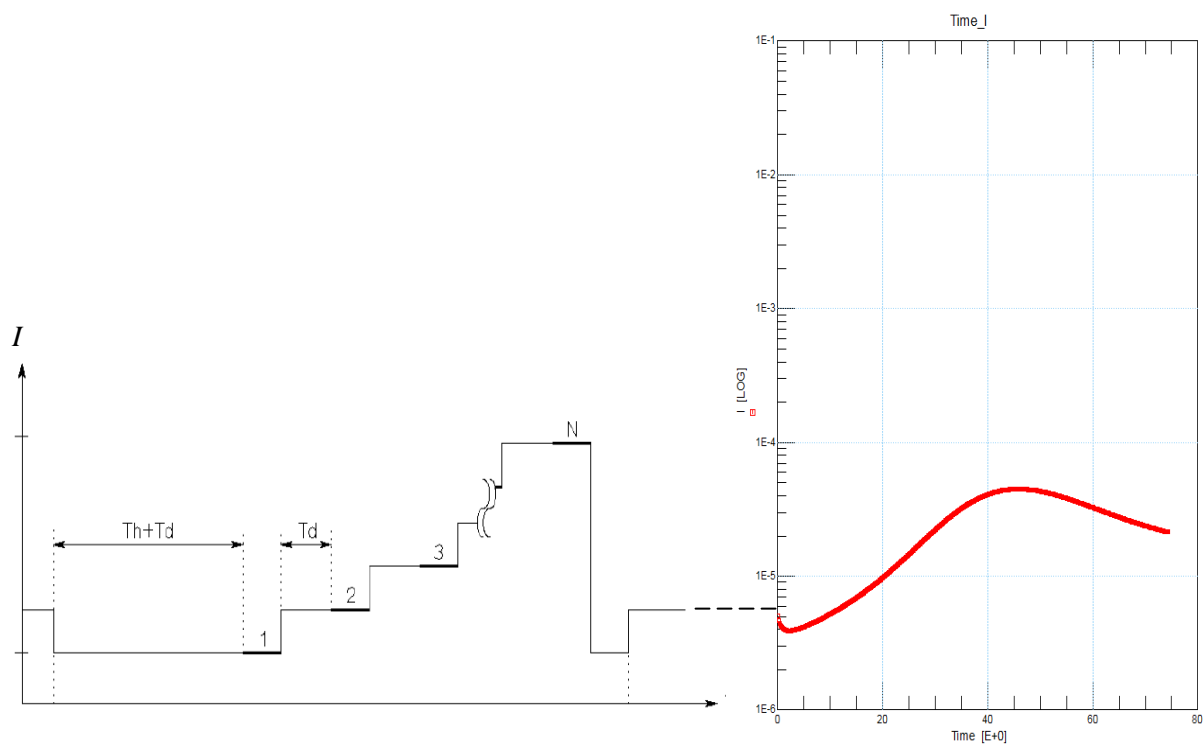


Рисунок 2.11 – Временная развертка измерений

В разделе 2.1 была рассмотрена ВАХ подзатворного ТДК. Рассмотрим вопрос задания параметров модели при экстракции концентрации центров Пула-Френкеля  $N_D$ . К параметрам модели следует отнести глубину залегания донорных центров диэлектрика  $\varphi_D$ , плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика  $N_C$  и подвижность электронов в диэлектрике  $\mu$ .

Как уже говорилось, к центрам захвата радиационно-индуцированного заряда принято относить прежде всего трехвалентный кремний ( $\varphi_D = 3$  эВ), междоузельный кислород ( $\varphi_D = 7.5$  эВ) [7] и вакансию кислорода ( $\varphi_{D1} = 2.5$  эВ,  $\varphi_{D2} = 6.3$  эВ) [13]. Все три дефекта являются донорами. Среди центров, ответственных за ИР ТДК, также выделяют междоузельный кремний. Данному центру соответствуют донорные уровни  $\varphi_{D1} = 0.5$  эВ,  $\varphi_{D2} = 5$  эВ.

Показатель экспоненты в формуле (2.1) представляет собой разность отношений к  $kT$  глубины залегания донорного центра  $\varphi_D$  и понижения потенциального барьера для электрона на данном центре за счет внешнего поля. Поскольку расстояние по энергии между центрами превышает  $kT$ , эти центры могут участвовать в проводимости при измерении ВАХ только по отдельности, то есть последовательно при повышении напряжения. Двумя наименее глубокими

центрами являются междоузельный кремний (0.5 эВ) и вакансии кислорода (2.5 эВ). Значение напряженности электрического поля, соответствующее переходу ВАХ от участка Пула-Френкеля к участку Фаулера-Нордгейма, как правило, составляет около 8 МВ/см. В этом случае понижение потенциального барьера равно примерно 1.45 эВ. Глубина залегания центра междоузельного кремния (0.5 эВ) меньше понижения потенциального барьера на величину, значительно превышающую  $kT$ . В свою очередь, глубина залегания центра вакансии кислорода (2.5 эВ), напротив, превышает понижение потенциального барьера на величину, значительно превышающую  $kT$ . Таким образом, участвовать в электропроводности Пула-Френкеля будут преимущественно центры междоузельного кремния. Следовательно, в качестве параметра модели  $\varphi_D$  следует использовать глубину залегания верхнего уровня междоузельного кремния.

Поскольку принципиально важным в настоящей работе является именно оценка неконтролируемого разброса дефектности ТДК, а не ее абсолютной величины, то вместо измерения  $\varphi_D$  экспериментальным путем целесообразнее зафиксировать значение, взятое из литературы (0.5 эВ), для всех образцов ТДК. То же самое касается параметров  $N_C$  ( $1.5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ) и  $\mu$  ( $20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ).

Рассмотрим особенности ВАХ захороненного оксида (рисунок 2.12) [67]. На рисунке 2.13 также представлены ВАХ захороненного оксида, измеренные первоначально, повторно и после отжига. Видно, что в процессе первоначального измерения ВАХ после эффекта Пула-Френкеля, который, как было показано, наблюдается в диапазоне 2.5 – 3 МВ/см, начинается линейный участок, который продолжается в диапазоне 3 – 5 МВ/см. Этот участок соответствует омическому механизму электропроводности. При повторном измерении ВАХ ее форма качественно меняется. В этом случае наблюдается экспоненциальный рост тока при напряженности более 4.5 МВ/см. После отжига форма ВАХ восстанавливается.

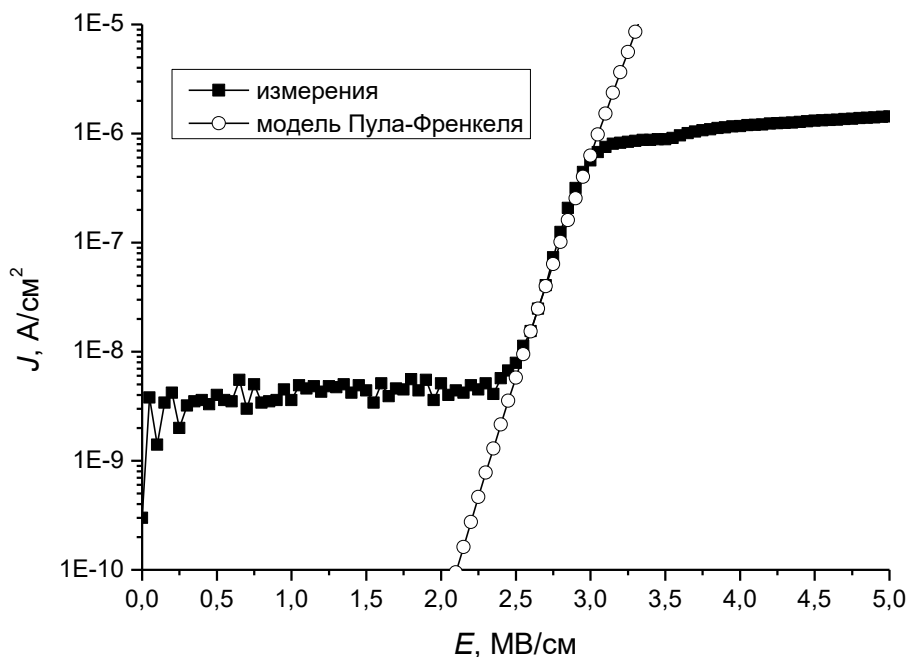


Рисунок 2.12 – Экспериментальная зависимость плотности тока  $J$  от напряженности электрического поля  $E$  захороненного оксида и зависимость, смоделированная по формуле (2.1), описывающей эффект Пула-Френкеля. Температура составляла 295 К

Эти наблюдения можно объяснить следующим образом. Когда при первом измерении напряженность достигает значения 3 МВ/см, все донорные центры, участвующие в проводимости Пула-Френкеля, оказываются ионизованными. При дальнейшем увеличении напряженности проводимость осуществляется только за счет электронов, попавших в зону проводимости диэлектрика с этих центров. После окончания первого измерения ВАХ электроны быстро покидают диэлектрик, а донорные центры остаются ионизованными. Поэтому при втором измерении ВАХ эффекта Пула-Френкеля не наблюдается, а рост тока при напряженности более 4.5 МВ/см соответствует механизму Фаулера-Нордгейма. В свою очередь отжиг способствует нейтрализации донорных центров.

На рисунке 2.14 показаны экспериментальные ВАХ захороненного оксида, измеренные при разных температурах. Видно, что ток возрастает с повышением температуры, но качественного изменения характеристики не происходит. Можно сделать вывод, что для оценки дефектности захороненного оксида по разрабатываемому методу достаточно комнатной температуры (295 К).



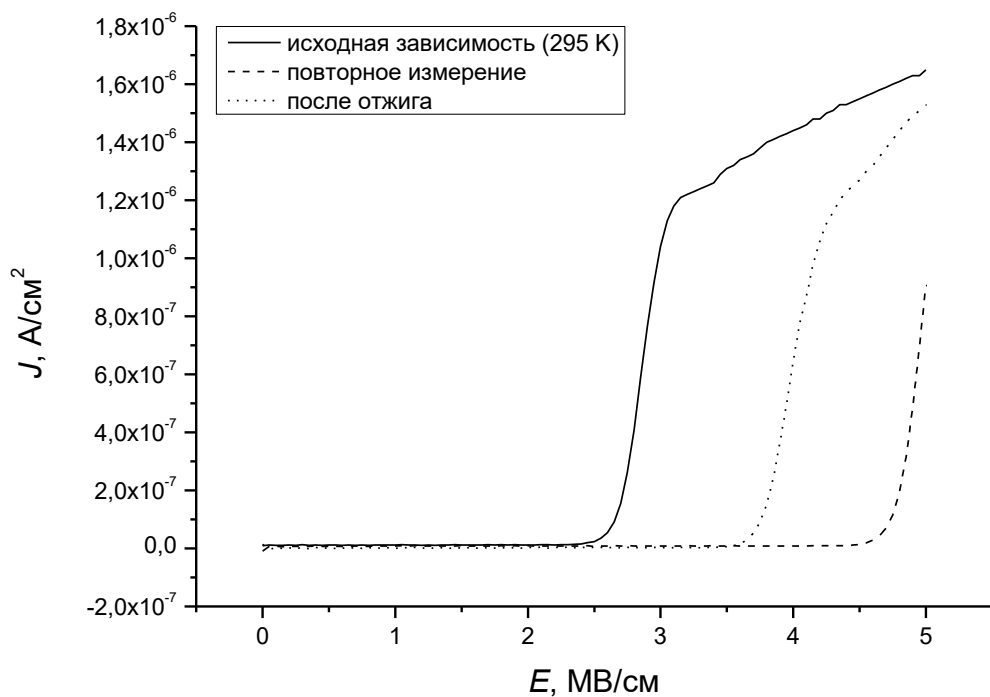


Рисунок 2.13 – Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля для захороненного оксида, измеренные первоначально, повторно и после отжига

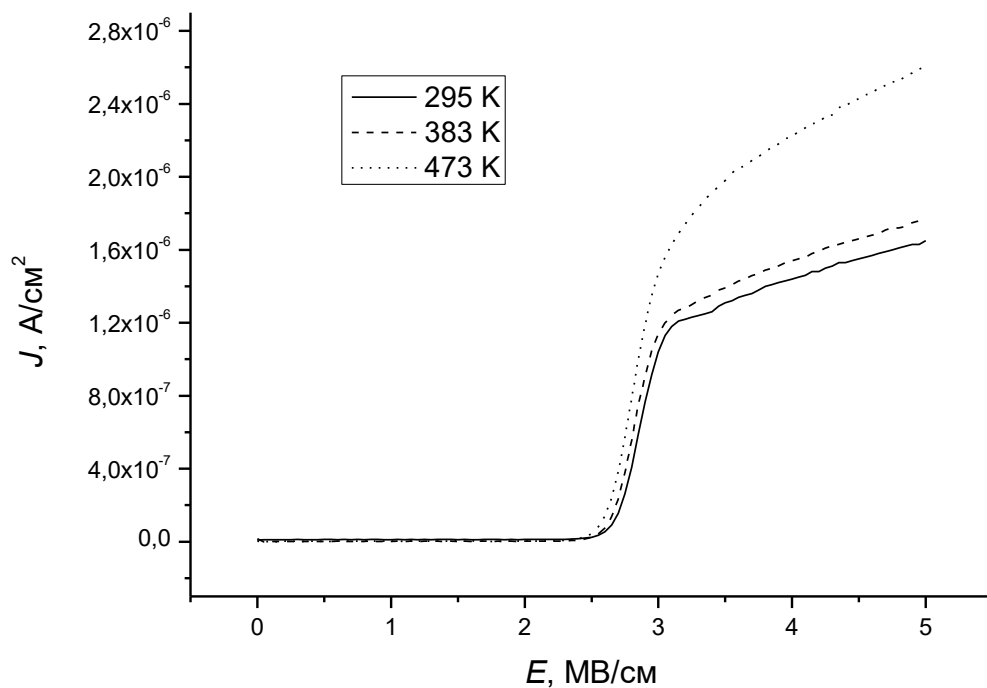


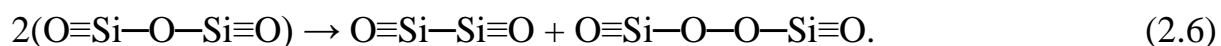
Рисунок 2.14 – Зависимости плотности тока от напряженности электрического поля для захороненного оксида при разных температурах

### **2.3 Апробация разработанного метода диагностики слоев диоксида кремния**

В главе 1 были рассмотрены дефекты, на которых может накапливаться радиационно-индуцированный заряд в ТДК. Все виды внутренних дефектов в ТДК объединяет их способность захватывать в процессе окисления частицы, содержащиеся в окислительной среде. В свою очередь, на стабильность процесса захвата оказывает влияние температура окисления. В связи с этим, можно выделить следующие основные технологические факторы, определяющие концентрацию дефектов в слое ТДК: концентрация в окислительной среде атомов водорода и гидроксильных групп, концентрация в окислительной среде атомов хлора, температурный режим процесса, условия отжига. Разному соотношению этих факторов соответствуют пять способов получения ТДК: паровое, пирогенное, сухое, влажное и хлорное окисление (см. главу 1). Однозначно ответить, какой из этих пяти окислов обладает наименьшей ионизационной реакцией, затруднительно по двум причинам. Во-первых, сам процесс пассивации такого многообразия дефектов примесями окислителя очень сложен. Во-вторых, ионизационная реакция слоя ТДК сильно зависит от условий облучения, в частности, от энергии гамма-квантов. В связи с этими факторами неопределенности следует, во-первых, выделить дефекты, оказывающие наибольшее влияние на ионизационную реакцию слоя ТДК, и, во-вторых, обозначить рабочие условия облучения, в рамках которых мы будем рассматривать ионизационную реакцию слоя ТДК.

В главе 1 было показано, что в литературе в контексте радиационной стойкости делается акцент на трех видах дефектов: трехвалентный кремний, междоузельный кислород и вакансии кислорода. Следует отметить, что, как показано в разделе 2.3, с точки зрения прогнозирования ионизационной реакции слоя ТДК по разработанному в настоящей работе методу на основе эффекта Пула-Френкеля важно также рассматривать дефект типа междоузельный кремний. Также важно помнить, что разные дефекты как компоненты примесно-дефектного состава количественно взаимосвязаны.

Рассмотрим процесс пассивации дефектов для разных технологий окисления на примере кислородной вакансии. Образование кислородных вакансий в ТДК происходит по следующей формуле:



В процессе роста парового оксида OH-группы гидролизуют кислородные вакансии:



В процессе роста сухого оксида отсутствие молекул воды способствует свободному протеканию основной реакции окисления, но свободные кислородные вакансии все же образуются в большем количестве, чем в паровом ТДК. Во влажном ТДК, в отличие от парового, высокая температура процесса приводит к освобождению молекул воды из связанного на кислородных вакансиях состояния. При этом концентрация кислородных вакансий оказывается большей, чем в паровом и сухом ТДК. В случае хлорного ТДК добавление хлора приводит к дополнительному связыванию атомов кремния и последующему их освобождению в оборванном состоянии под действием температуры. В связи со всем вышесказанным справедливо будет следующим образом расположить виды ТДК в сторону увеличения концентрации кислородных вакансий: паровой, сухой, влажный, хлорный. Пирогенный окисел оказывается близок к паровому благодаря низкой температуре окисления.

В работе [10] на примере кислородной вакансии показано, что для образования нового структурного дефекта требуется энергия кванта излучения около 2 МэВ. Эта энергия превышает требования многих применений микросхем, поэтому будем рассматривать энергии до 2 МэВ и считать, что образования новых структурных дефектов в ТДК под действием ИИ не происходит. В то же время энергия связей Si-H и O-H составляют величины порядка единиц электронвольт. Таким образом, энергии рентгеновского излучения (более 10 эВ) достаточно, чтобы водород освобождался с центров ТДК, оставляя оборванные связи.

Следует также отметить, что концентрация водорода в ТДК оказывает большое влияние на накопление поверхностных состояний на границе с кремнием

при воздействии ионизирующего излучения [9]. При этом водород и гидроксильные группы в ТДК освобождаются, оставляя ловушки для положительного заряда, перемещаются к границе с кремнием и вступают в реакцию с водородом и гидроксильными группами на границе раздела с образованием поверхностных состояний и молекул водорода и воды. Кроме того, наблюдается и прямое образование ПС под действием ИИ, которое также обусловлено освобождением водорода и гидроксильных групп, причем этот процесс в подзатворном ТДК зачастую преобладает над накоплением положительного заряда в объеме ТДК вследствие малой толщины слоя, что подтверждается экспериментальными результатами в настоящей работе.

На рисунке 2.15 представлены ВАХ различных слоев ТДК (пирогенного на объемном кремнии и на КНС, сухого на объемном кремнии и захороненного оксида структуры КНИ). В результате анализа данных графиков были сделаны следующие выводы. Для сухого ТДК на объемном кремнии ток на участке от 4 до 8 МВ/см, соответствующий эффекту Пула-Френкеля, выше, чем для пирогенного ТДК на объемном кремнии. Это свидетельствует о том, что концентрация центров Пула-Френкеля в сухом ТДК выше, чем в пирогенном, что подтверждает предположение, что на ее величину влияет концентрация водорода. Параметр  $\zeta$  для пирогенного ТДК и сухого ТДК на объемном кремнии составил 0.2 и 0.3 соответственно. Однако гораздо большее влияние на концентрацию центров Пула-Френкеля оказывает дефектность подложки или границы сращивания. Этот вывод основывается на том, что ВАХ сухого и пирогенного оксидов на объемном кремнии хоть и отличаются, но близки друг к другу, а ВАХ пирогенного оксида на КНС и захороненного оксида структуры КНИ имеют общие черты (в частности на участке от 2.5 до 3 МВ/см, соответствующем эффекту Пула-Френкеля), отличные от ТДК на объемном кремнии. При этом известно, что приборный слой структуры КНС содержит большое количество дислокаций, а в объеме захороненного оксида структуры КНИ проходит граница сращивания, которая также может быть источником дефектов. В свою очередь, за проявление эффекта Пула-Френкеля при наличии кристаллографических дефектов подложки могут

быть ответственны точечные дефекты в ТДК, скапливающиеся вокруг этих дефектов. Параметр  $\xi$  для пироженного ТДК на КНС и захороненного оксида составил 0.5 и 1.5 соответственно.

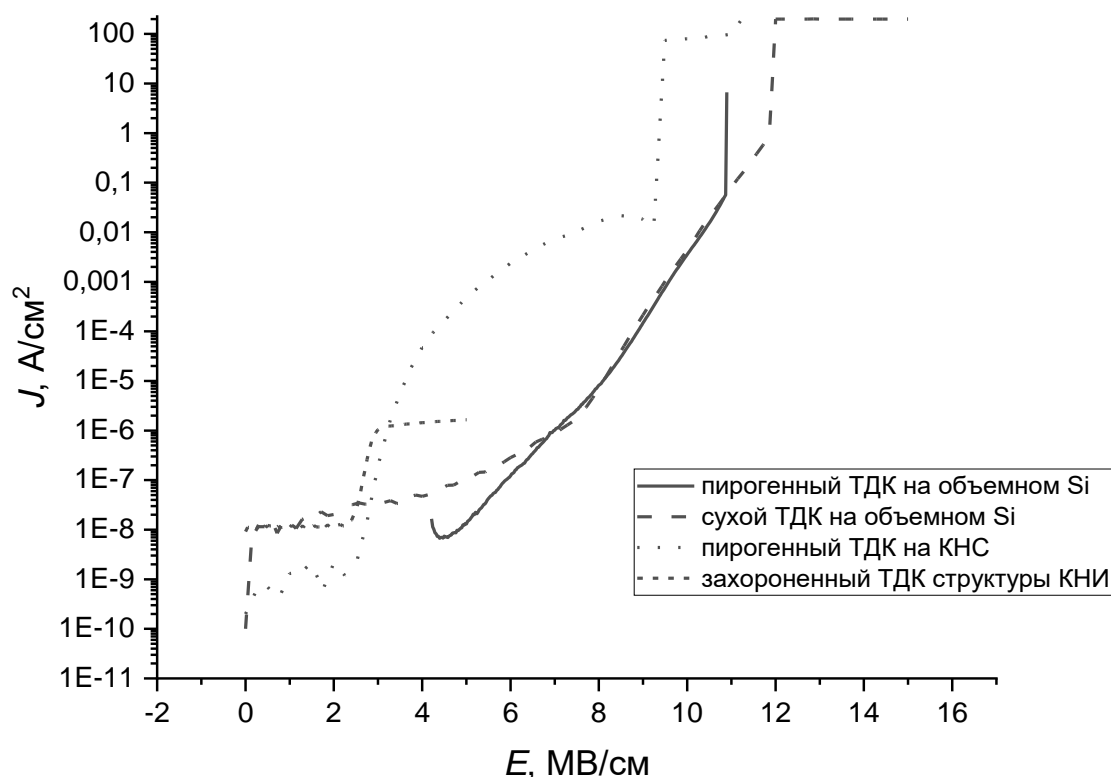


Рисунок 2.15 – Сравнение ВАХ различных слоев ТДК

На рисунке 2.16 представлены ВЧ ВФХ, измеренные согласно разработанному методу до и после измерения ВАХ и стресса для случая подзатворного ТДК на объемном кремнии. Сдвиг напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  составил 1 В. Тогда эффективное сечение захвата по формуле (2.3) примерно равно  $2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ . Соответствующее значение для ТДК на КНС составило  $2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Для захороненного оксида значение  $\sigma$  составило  $1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ .

На рисунке 2.1 проиллюстрировано моделирование ВАХ для подзатворного оксида на объемном кремнии. Экстрагируемая эффективная масса  $m^*$  для случая подзатворного ТДК на объемном кремнии на рисунке 3.14 составила  $0.9m_0$ . На рисунке 2.17 проиллюстрировано моделирование ВАХ для подзатворного оксида на КНС и захороненного оксида структуры КНИ. Следует отметить, что участок Пула-Френкеля для пироженного ТДК на КНС частично перекрыт участком Фаулера-Нордгейма вследствие наличия локальных утонений и трещин в слое

ТДК, причиной которых являются высокие механические напряжения в структуре КНС. Также важно то, что участок Фаулера-Нордгейма для захороненного оксида проявляется при повторном измерении ВАХ, как уже отмечалось в разделе 2.2. Для ТДК на КНС значение  $m^*$  составило  $0.3m_0$ , а для захороненного оксида  $m^* = 0.2m_0$ . Значения длины потенциального барьера по формуле (2.4) оказались равны: 5.0 нм (ТДК на объемном кремнии), 3.3 нм (ТДК на КНС), 25 нм (захороненный оксид).

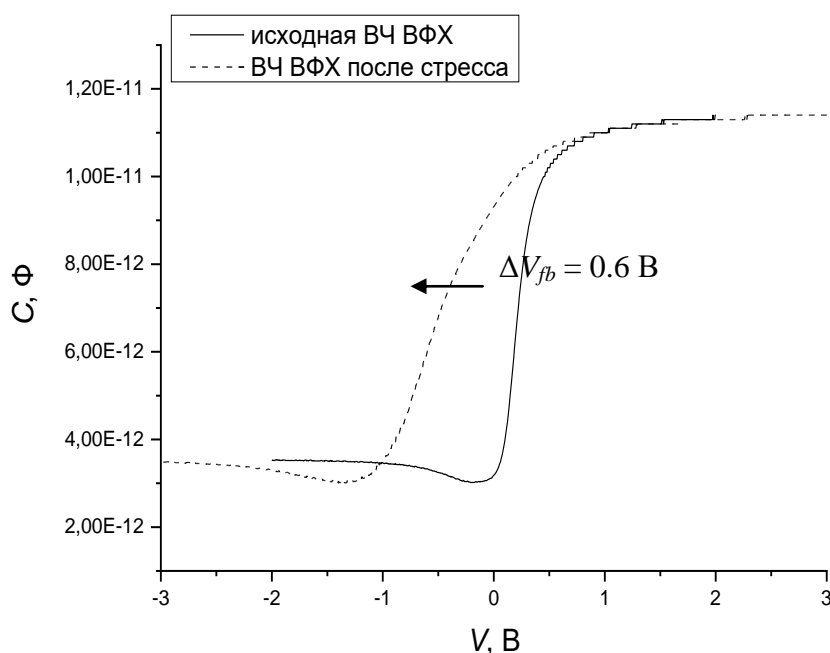


Рисунок 2.16 – Сдвиг ВЧ ВФХ тестового конденсатора на подзатворном ТДК (объемный кремний) в результате измерения ВАХ и стресса согласно разработанному методу

На рисунке 2.18 представлены экспериментальные значения коэффициента  $\alpha$ , характеризующего дефектность объема слоя, коэффициента  $\beta$ , отражающего качество границы раздела, и суммарного коэффициента дефектности  $\zeta$  в виде зависимостей  $\alpha$  и  $\beta$  от  $\zeta$  для четырех слоев диоксида кремния, изготовленных по разным технологиям. Видно, что дефектность возрастает в следующем ряду: 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  $\alpha$  и  $\beta$  видно, что в случае подзатворного оксида дефектность определяется, в первую очередь, границей раздела, а в случае захороненного оксида – объемом слоя.

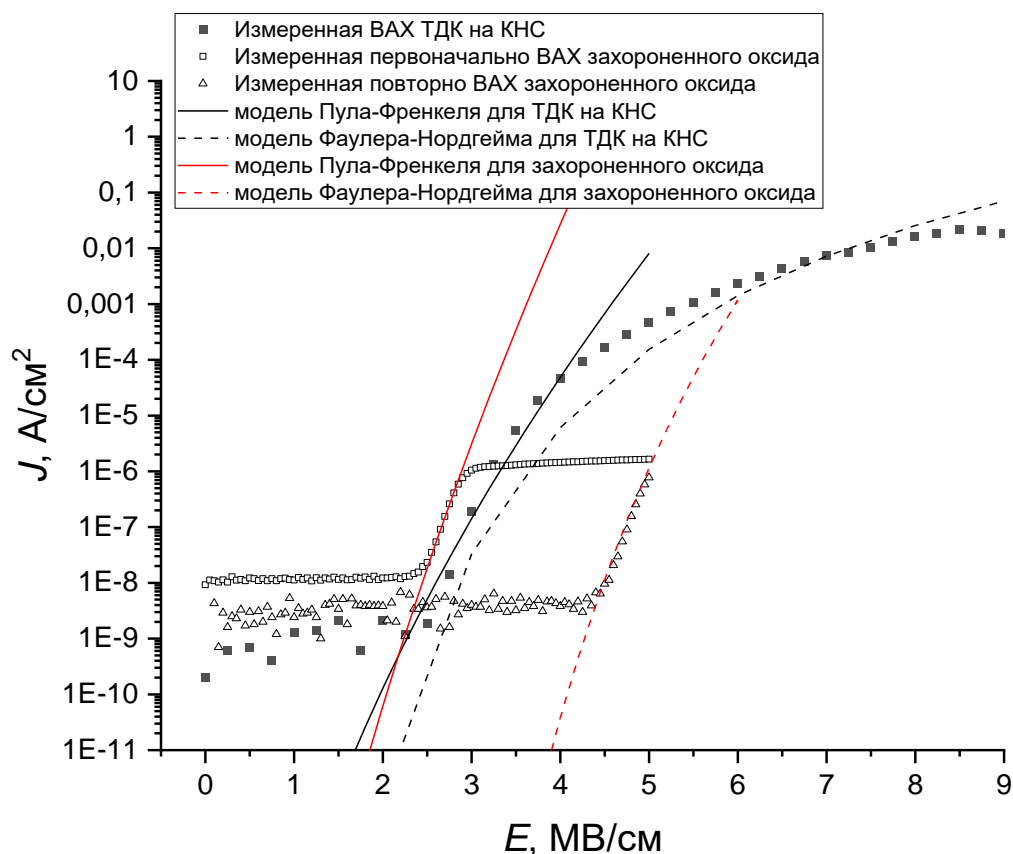


Рисунок 2.17 – Измеренные и моделируемые ВАХ подзатворного ТДК на КНС и захороненного оксида структуры КНИ

Для того чтобы показать, что предложенный коэффициент дефектности адекватно отражает дефектность диэлектрического слоя, были проведены исследования слоев диоксида кремния другими методами. На рисунке 2.18 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. На рисунке 2.19 представлены соответствующие эллипсометрические спектры.

На основании этих значений показателя преломления, а также данных, представленных в работе [68], с помощью формулы Макдональда:

$$\frac{n^2 - 1}{n\rho} = const, \quad (2.8)$$

где  $n$  – показатель преломления,  $\rho$  – плотность, была сделана оценка величины плотности слоев ТДК на объемном кремнии и КНС.

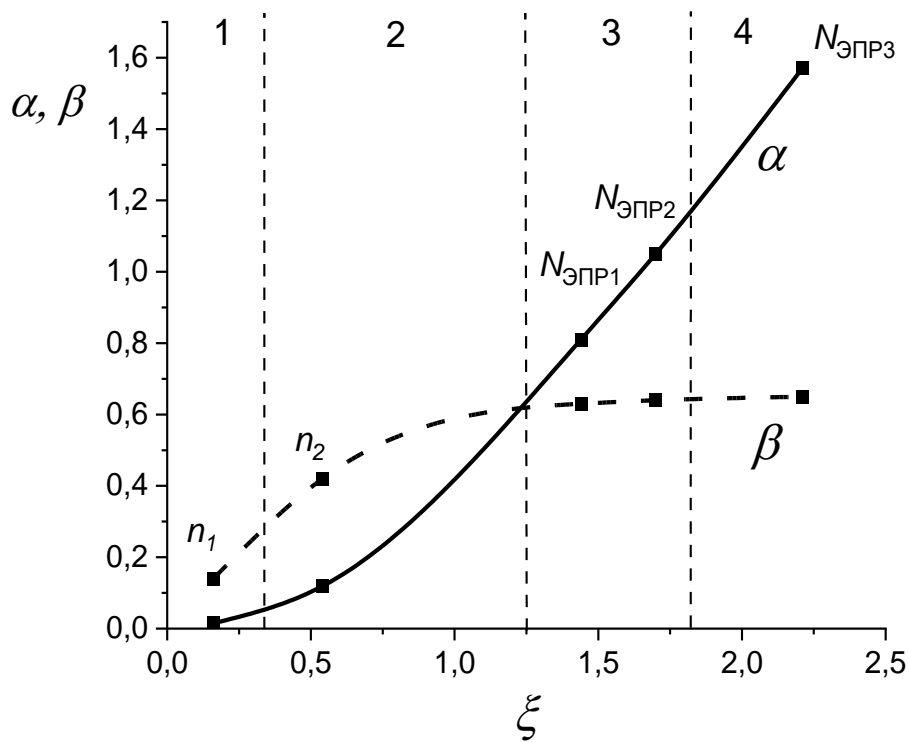


Рисунок 2.18 – Зависимость коэффициента  $\alpha$ , характеризующего дефектность объема слоя, и коэффициента  $\beta$ , отражающего качество границы раздела, от суммарного показателя дефектности  $\zeta$ . Здесь 1 – термический оксид на объемном кремнии; 2 – термический оксид на КНС; 3 – захороненный оксид структуры КНИ (*SmartCut*); 4 – захороненный оксид структуры КНИ (*SIMOX*)

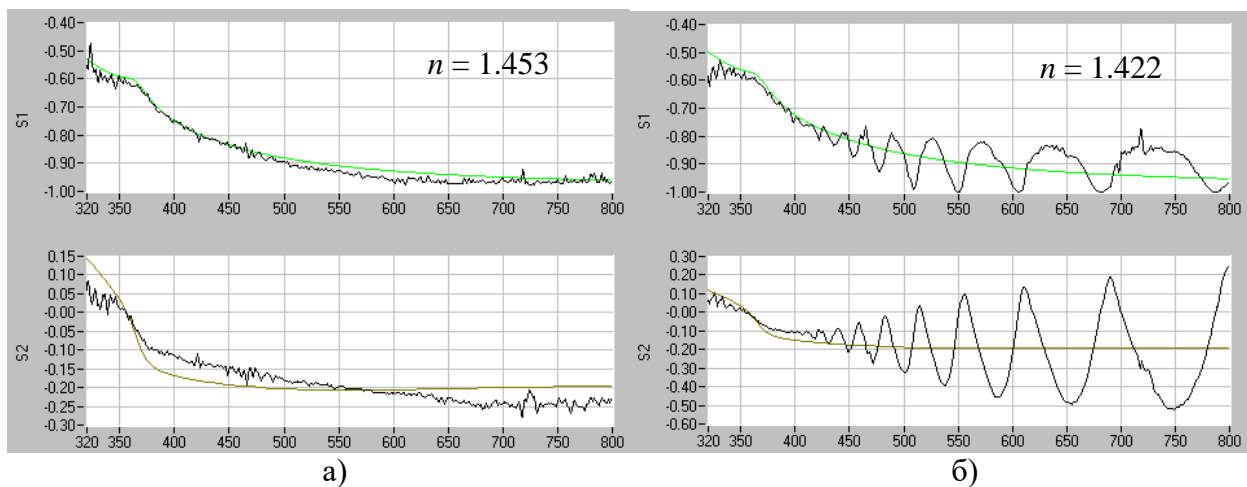


Рисунок 2.19 – Эллипсометрические спектры ТДК на объемном кремнии (а) и на КНС (б)

Для слоя на объемном кремнии плотность составила  $2.17 \text{ г/см}^2$ , а для слоя на КНС –  $2.04 \text{ г/см}^3$  (таблица 2.1). Такое низкое значение плотности слоя ТДК на КНС говорит о значительном нарушении кристаллической структуры ближнего порядка слоя ТДК. Как уже говорилось, приборный слой кремния структуры КНС вследствие различных параметров решетки кремния и сапфира характеризуется большей концентрацией кристаллографических дефектов (дислокаций, дефектов упаковки и др.), чем подложка из объемного кремния. Поскольку собственные



электроактивные центры в ТДК в основном являются нестехиометрическими, можно сделать вывод, что они образуются преимущественно в областях повышенной плотности кристаллографических дефектов окисляемого слоя кремния вследствие нарушения стехиометрии процесса окисления в областях дефектов [69]. Таким образом, эллипсометрические измерения подтверждают вывод о влиянии кристаллографических дефектов на концентрацию центров в ТДК.

Таблица 2.1 – Сравнение параметров, полученных разработанным методом и методом эллипсометрии для подзатворного оксида на объемном кремнии и на КНС

	Пирогенный ТДК на объемном кремнии	Пирогенный ТДК на КНС
Концентрация центров Пула-Френкеля $N_D$	$10^{11} \dots 10^{12}$	$10^{12} \dots 10^{13}$
Коэффициент дефектности $\zeta$	0.2	0.5
Показатель преломления	1.453	1.422
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.17	2.04

Для захороненного оксида были измерены концентрации парамагнитных центров методом ЭПР. На рисунках 2.20 и 2.21 представлены соответственно исходные и сглаженные спектры ЭПР структур КНИ, изготовленных по методу *SmartCut* и *SIMOX*. Для данных структур были определены концентрации ЭПР-активных центров в захороненном оксиде. Для структур *SmartCut* значения составили  $N_{\text{ЭПР1}} = 1.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $N_{\text{ЭПР2}} = 1.18 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , а для структуры *SIMOX*  $N_{\text{ЭПР3}} = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Захороненный оксид в структурах *SIMOX* получают ионной имплантацией кислорода в кремниевую подложку, что может вызывать более сильное нарушение стехиометрии оксида и, как следствие, большую концентрацию центров по сравнению с термическим оксидом в структурах *SmartCut*. На рисунке 2.18 видно, что для захороненного оксида показатель дефектности  $\zeta$  (с учетом постоянства  $\beta$  на участках 3 и 4) пропорционален концентрации ЭПР-активных центров. Соответствующие значения донорных центров  $N_D$ , определенные из анализа ВАХ, составили  $N_{D1} = 5.12 \cdot 10^{11}$ ,  $N_{D2} = 5.93 \cdot 10^{11}$ ,  $N_{D3} = 7.55 \cdot 10^{11}$ . Концентрация ЭПР-активных центров оказалась

пропорциональна с коэффициентом, примерно равным 20-ти, концентрации донорных центров  $N_D$ , определяемой из ВАХ.

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

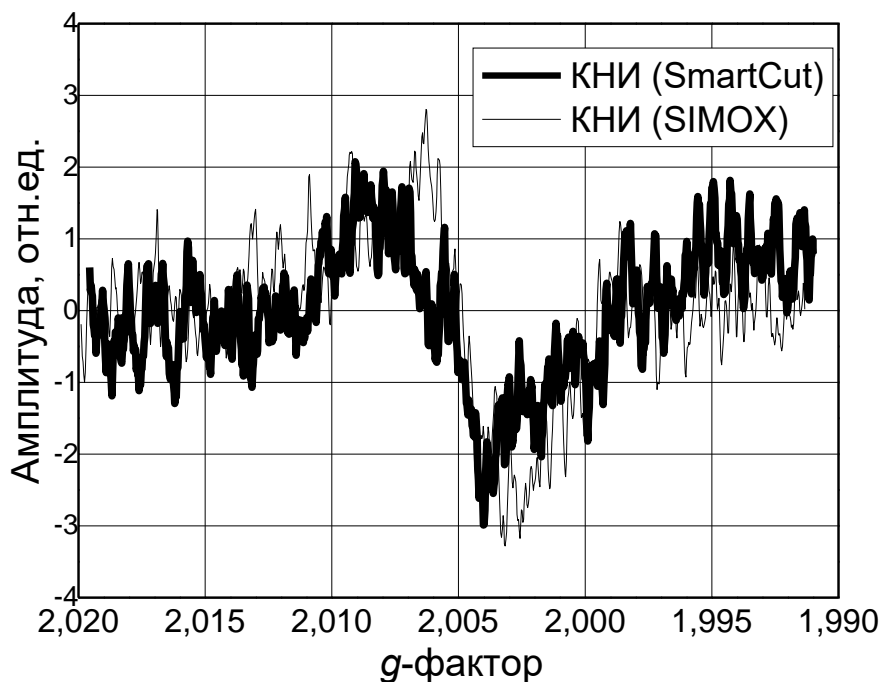


Рисунок 2.20 – Исходные спектры ЭПР для структур КНИ, изготовленных по методам *SmartCut* и *SIMOX*

Рассмотрим подробнее влияние крупных кристаллографических дефектов кремниевой подложки и дефектов границы срачивания на внутреннюю дефектность подзатворного и захороненного оксидов соответственно.

Начнем с подзатворного ТДК. Как известно, в процессе окисления граница раздела Si-SiO<sub>2</sub> перемещается вниз в результате диффузии кислорода через оксид к границе раздела и реакции с кремнием. Поскольку ТДК является аморфным, то есть в нем отсутствует дальний порядок решетки, крупные кристаллографические дефекты, выходящие на поверхность кремния (например, дислокации) в слое оксида перестают существовать. Однако дефекты в рамках ближнего порядка (например, напряженных связей, оборванных связей или кислородных вакансий) в зависимости от условий окисления, возможно, могут появляться в областях дислокаций в большем количестве, чем в областях окисления бездефектного

кремния. Это может быть связано с нарушением в дефектных областях стехиометрии при окислении, причем фиксация структуры дефекта зависит от температурного режима процесса и от наличия частиц Н и ОН, способных пассивировать оборванную связь.

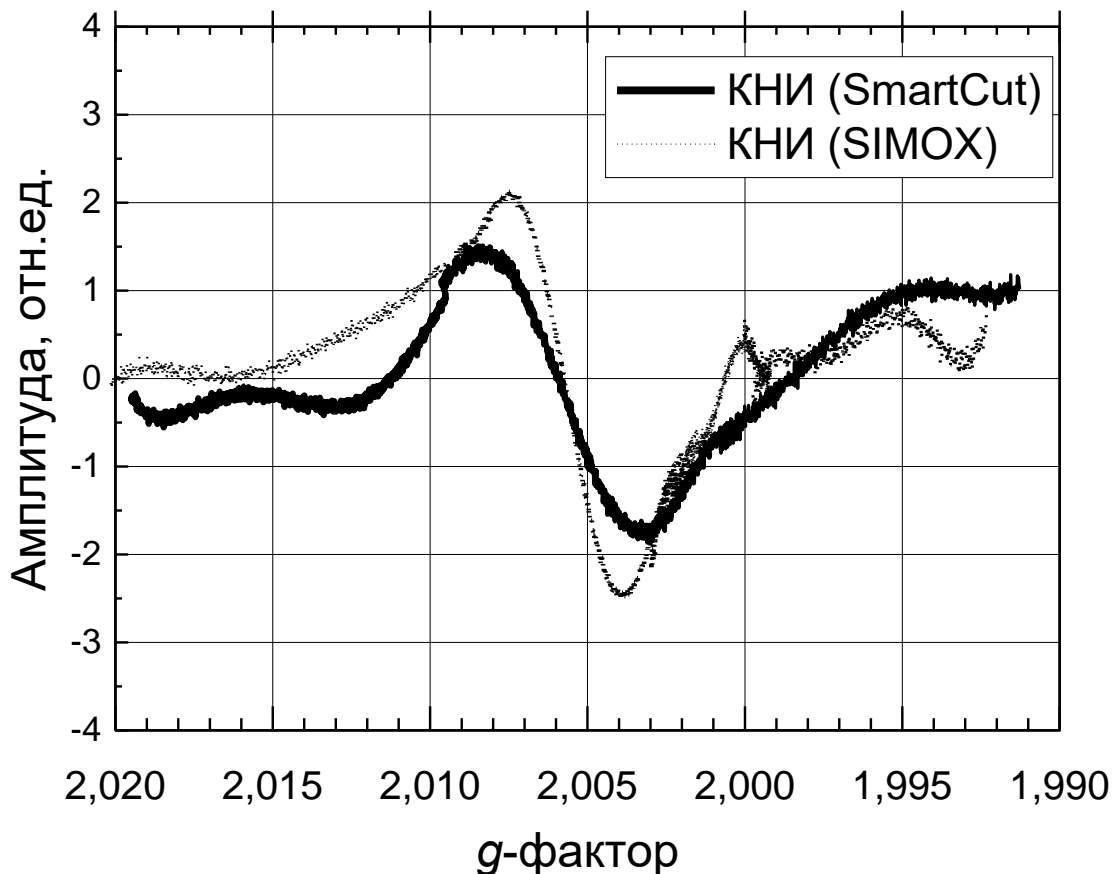


Рисунок 2.21 – Сглаженные спектры ЭПР для структур КНИ, изготовленных по методам *SmartCut* и *SIMOX*

Это предположение подтверждаются многочисленными наблюдениями уменьшения времени наработки на отказ и пробивного напряжения термических окислов при увеличении количества дислокаций и других структурных дефектов в полупроводниковой подложке [70-72]. Кроме того, известно, что дислокации и прочие кристаллографические дефекты в кремнии декорируются точечными дефектами, в том числе примесными. В процессе окисления происходит сегрегация примесей, при которой возможно их проникновение в оксид [15]. Их результирующее пространственное распределение в оксиде (как по глубине, так и латеральное) также зависит от температуры, поскольку оно устанавливается, в частности, в результате диффузии.

Рассмотрим теперь дефектность границы сращивания структуры КНИ. Во-первых, стоит сказать, что для получения захороненного оксида, как правило, используются комбинации сухого и влажного окисления, например, сухое – влажное – сухое [73] (сухие стадии – для получения тонких переходных слоев структуры КНИ, а влажная стадия – для достижения необходимой толщины оксида). Свободная поверхность оксида подвергается сращиванию, как правило, либо с естественным окислом несущей кремниевой полочки, либо с термическим окислом подложки. При этом низкое значение свободной энергии двух окислов не влияет на дефектность будущей границы сращивания, поскольку одним из первых этапов процесса сращивания является обработка сращиваемых поверхностей с целью повышения их энергии и гидрофильности благодаря их подтравливанию и размещению на них большого количества ОН-групп [1]. Атомы водорода из этих ОН-групп в сочетании с большим количеством воды между сращиваемых поверхностей обуславливают некоторое сходство свойств захороненного оксида со слоем ТДК, полученным влажным окислением. Кроме того, высокая температура отжига после сращивания (1100°C) также ближе к температуре влажного окисления (1000°C), чем к температуре парового или пирогенного окисления (850°C). Как было сказано выше, высокая концентрация водорода и ОН-групп и высокая температура процесса приводят к высокой концентрации оборванных связей в объеме оксида. Что касается внешних макродефектов, то в случае захороненного оксида в качестве такого дефекта выступает граница сращивания. Если исключить из рассмотрения пустоты на границе сращивания, вызванные крупными загрязнениями (они недопустимы на рабочих пластинах), то важным является то, что при формировании границы сращивания в ее окончательном виде за счет силановых групп (Si-O-Si) неизбежно остаются оборванные связи, поскольку в образовании силановых групп участвуют две ОН-группы:



а значит, это вероятностный процесс. Таким образом, граница сращивания является источником оборванных связей, способных захватывать радиационно-

индуцированный заряд. Следует отметить, что вследствие неравномерности шероховатости и наличия микрозагрязнений на поверхности пластин (требования к шероховатости соединяемых пластин  $\sim 1.5$  нм), наблюдается вариация силы срачивания окисленной и подложечной пластин, приводящая к неравномерности распределения дефектных центров в захороненном оксиде.

В рамках настоящей диссертационной работы были измерены профили распределения кислорода и водорода в структуре КНИ (рисунок 2.22). Видно, что пик концентрации водорода в конечной структуре после всех термических обработок приходится на границу срачивания (точка при времени распыления 840 с), а значит, технологические флуктуации концентрации водорода будут оказывать наиболее критичное влияние именно на границе срачивания. При снижении гидрофильности срачиваемых поверхностей уменьшится вероятность образования мостиковых связей с участием водорода, что приведет к увеличению концентрации оборванных связей в конечной структуре.

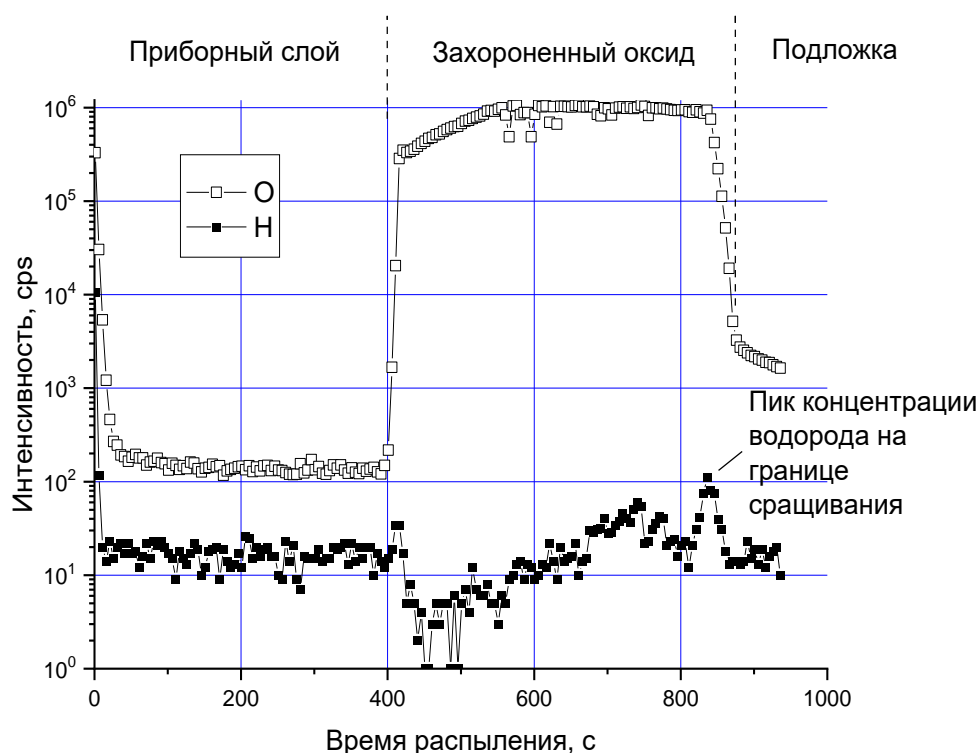


Рисунок 2.22 – Профили распределения кислорода и водорода в структуре КНИ, полученные методом ВИС

В настоящей диссертационной работе также были измерены ВАХ диэлектрических слоев, выступающие в микросхеме в качестве боковой,

межслойной и межуровневой изоляции, пассивации, спейсеров и вспомогательных слоев. ВАХ этих слоев представлены на рисунке 2.23. Видно, что слои делятся на три группы. ВАХ слоев ТДК и нитрида кремния не обладают участком Пула-Френкеля (в данной партии), ВАХ слоев CVD SiO<sub>2</sub> и ФСС показывают ярко выраженный участок Пула-Френкеля, а слои ПХ SiO<sub>2</sub> и TEOS SiO<sub>2</sub> обладают слабо выраженным участком Пула-Френкеля. Сравнение рисунков 2.15 и 2.23 подтверждает вывод, что наличие участка Пула-Френкеля на ВАХ слоя ТДК наблюдается не всегда (не на всех партиях), то есть речь идет о неконтролируемой привносимой дефектности.

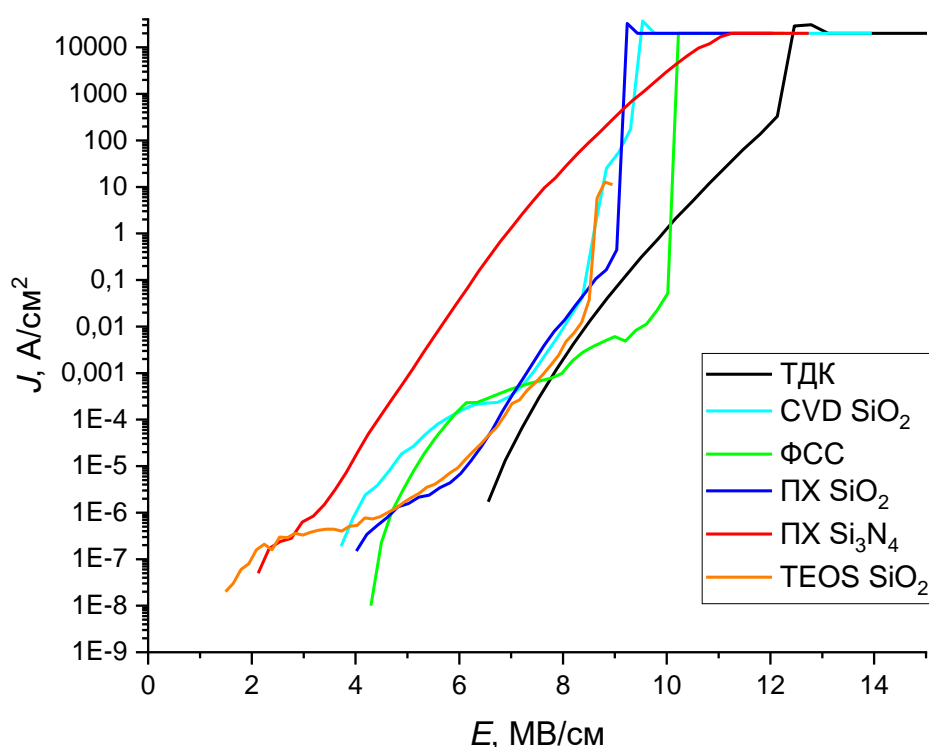


Рисунок 2.23 – ВАХ различных диэлектрических слоев: ТДК – пирогенный термический диоксид кремния; CVD SiO<sub>2</sub> – диоксид кремния, полученный химическим осаждением из газовой фазы с температурой в качестве движущей силы; ФСС – фосфоросиликатное стекло; ПХ SiO<sub>2</sub> – диоксид кремния, полученный плазмохимическим осаждением; ПХ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – нитрид кремния, полученный плазмохимическим осаждением; TEOS SiO<sub>2</sub> – диоксид кремния, полученный разложением тетраэтоксисилана. Все слои получены в рамках одной партии

Также из рисунка 2.23 были сделаны следующие выводы. Результаты подтверждают предположение о том, что водород пассивирует центры Пула-Френкеля и препятствует появлению на ВАХ соответствующего участка, поскольку известно, что и пирогенный ТДК, и плазмохимический нитрид кремния содержат значительное количество атомов водорода. При этом пленки TEOS SiO<sub>2</sub>

обладают низким содержанием водорода и низкой дефектностью, что в сумме объясняет слабое проявление участка Пула-Френкеля на ВАХ. В свою очередь пленки ФСС имеют ярко выраженный участок Пула-Френкеля за счет примеси фосфора. Что же касается пленок CVD SiO<sub>2</sub> и ПХ SiO<sub>2</sub>, то вследствие широких диапазонов технологических режимов их получения, участок Пула-Френкеля на ВАХ может проявляться в разной степени. В данном случае, по-видимому, высокая температура осаждения CVD SiO<sub>2</sub> вызвала механические напряжения, релаксировавшие в дефекты слоя, в то время как воздействие плазмы на кремниевую подложку при плазмохимическом осаждении вызвало меньшую дефектность.

## **Выводы по главе 2**

1) Показана возможность диагностики слоев SiO<sub>2</sub> на основе анализа ВАХ диэлектрика путем моделирования участков ВАХ, обусловленных различными механизмами электропроводности: омическим, Пула-Френкеля, туннельным.

2) Предложен коэффициент, включающий в себя параметры, экстрагируемые из ВАХ диэлектрика, и позволяющий оценивать дефектность объема диэлектрического слоя и границ раздела.

3) Описана методика диагностики: тестовые МОП-конденсаторы, блок-схема измерительного комплекса, алгоритм измерений.

4) Проведена диагностика различных диэлектрических слоев: влажного и сухого подзатворного оксида на объемном кремнии и на структурах КНС и захороненного оксида структур КНИ, а также диэлектрических слоев, выступающих в микросхеме в качестве боковой, межслойной и межуровневой изоляции, пассивации, спейсеров и вспомогательных слоев.

5) Описаны особенности ВАХ подзатворного оксида и захороненного оксида.

6) С помощью методов спектральной эллипсометрии и электронного парамагнитного резонанса показана адекватность диагностики слоев SiO<sub>2</sub> с

помощью разработанного метода. 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. Моделирование деградации порогового напряжения МОП-транзисторов в результате облучения на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида до облучения

#### 3.1 Методика электрической и рентгеновской имитации радиационного воздействия на тестовые структуры

Электрическая имитация радиационного воздействия на диэлектрический слой основана на инъекции Фаулера-Нордгейма [40]. Если создать в диэлектрике достаточно большое электрическое поле, зоны приобретут такую форму, при которой длина потенциального барьера для электронов окажется достаточно малой для тунелирования электронов из зоны проводимости кремния в зону проводимости диэлектрика – в нашем случае диоксида кремния. Инжектированные электроны ускоряются электрическим полем и вызывают процесс ударной ионизации, который приводит к образованию электронно-дырочных пар. Далее носители, избежавшие рекомбинации, разделяются: электроны достигают затвора, а дырки дрейфуют к границе с кремнием и захватываются на ловушки.

Таким образом, возможна имитация радиационного воздействия с помощью инъекции носителей заряда (электрическая имитация). Она осуществляется путем термополевых обработок (ТПО) диэлектрического слоя. Ее преимущество перед наиболее распространенным видом имитации – имитации с помощью рентгеновского излучения – в возможности совмещения процессов имитации и измерения электрофизических параметров на одном оборудовании. Однако электрическая имитация затруднена, главным образом, необходимостью обоснования ее достоверности, в том числе необходимостью определения оптимальных режимов имитации [74-76].

Согласно [40] справедлива следующая формула, связывающая эквивалентные параметры инъекции электронов и воздействия  $\gamma$ -излучения:

$$\left(\alpha_{ox} \bar{x}\right)_i \alpha_i Q_i = \left(\alpha_{ox} \bar{x}\right)_r g_0 f_H D_{eq}, \quad (3.1)$$

где индекс  $i$  соответствует инжекции, а индекс  $r$  – облучению;  $f_H$  – доля дырок, избежавших рекомбинации;  $D_{eq}$  – эквивалентная доза.

Принимая допущение об идентичности ловушек, захватывающих дырки при инжекции и воздействии ИИ, из формулы (3.1) получаем формулу для оценки эквивалентной мощности дозы  $P$  при имитации с помощью термополевой инжекции:

$$P = \frac{\alpha_i}{qg_0f_H} J_{FNT}, \quad (3.2)$$

где  $J_{FNT}$  – плотность тока эмиссии Фаулера-Нордгейма с учетом температуры, зависящая от температуры и напряженности поля по формуле (2.13).

При определении напряженности и длительности ТПО учитывалось то, что подзатворный ТДК на объемном кремнии обладает меньшей дефектностью, чем захороненный ТДК и подзатворный ТДК на КНС. Как было отмечено в главе 2, с ростом дефектности слоя участки ВАХ, соответствующие эмиссии Фаулера-Нордгейма проявляются при меньшей напряженности поля. При исследовании захороненного оксида напряженность поля составляла 5 МВ/см, температура – плюс 200 °С, продолжительность каждой ТПО – 5 минут. При исследовании подзатворного оксида на объемном кремнии напряженность поля составляла 8 МВ/см, температура – плюс 200 °С, продолжительность каждой ТПО – 5 минут. Эти режимы соответствуют одинаковой эквивалентной мощности поглощенной дозы. На рисунке 3.1 представлены расчетные зависимости эквивалентной мощности поглощенной дозы от температуры и напряженности электрического поля при термополевой инжекции.  $P_{max}$  – максимальный уровень воздействия.

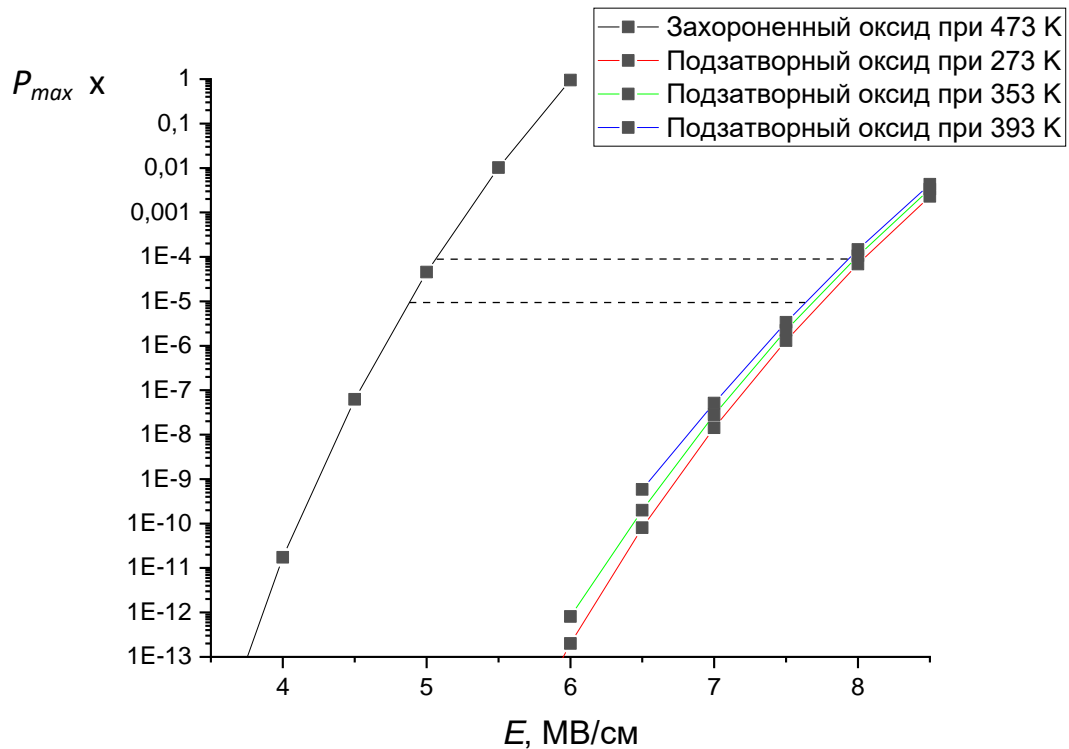


Рисунок 3.1 – Расчетные зависимости эквивалентной мощности поглощенной дозы для слоя ТДК от температуры и напряженности электрического поля при термополевой инжекции

Выбор эквивалентной мощности поглощенной дозы был результатом компромисса между ограничением длительности испытаний и ограничениями, накладываемыми исследуемым материалом. Последнее связано с тем, что при электрической имитации коэффициент ударной ионизации  $\alpha_i$  при повышении напряженности стремится к значению коэффициента  $\alpha_0$  ( $6.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-1}$  для  $\text{SiO}_2$ ) согласно следующей формуле [40]:

$$\alpha_i = \alpha_0 \exp\left(-\frac{H}{E}\right), \quad (3.3)$$

где  $H$  – параметр материала (180 МВ/см для  $\text{SiO}_2$ ). Поскольку коэффициент ударной ионизации оказывается ограничен параметрами материала, эквивалентная мощность дозы согласно формуле (3.2) оказывается ограничена плотностью тока  $J_{FNT}$ , при которой происходит разрушение структуры материала в слишком короткий срок  $t$ . Соответствующее значение  $J_{FNT}$  может быть определено из рисунка 3.2 [77].

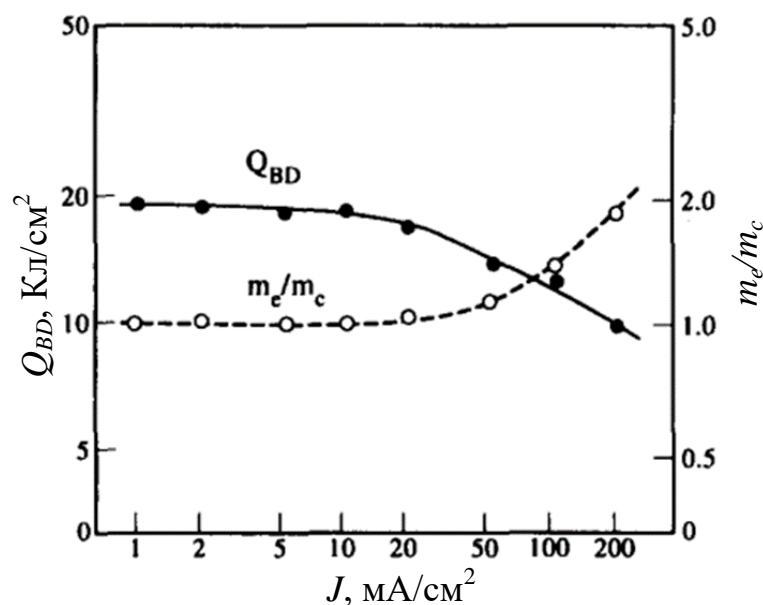


Рисунок 3.2 – Зависимости заряда пробоя  $Q_{BD}$  и отношения  $m_e/m_c$ , отражающего соотношение инжекционного тока на границе и в центре слоя ТДК, от плотности тока инжекции

Зарядовое состояние слоя ТДК отслеживалось путем измерений ВЧ ВФХ тестовой структуры до и после ТПО (рисунки 3.3 и 3.4).

В настоящей работе слой ТДК подвергался последовательно отрицательной (при отрицательном напряжении на верхней обкладке) и положительной (при положительном напряжении на верхней обкладке) ТПО. Также применялась обратная последовательность.

Применение двух последовательных ТПО разной полярности позволяет отделить процесс инжекции носителей заряда от процесса миграции подвижных ионов в ТДК. На рисунке 3.3 показаны в укрупненном виде участки ВЧ ВФХ структуры КНИ, измеренных при температуре 473 К до ТПО и после отрицательной и положительной ТПО. Нижней обкладкой конденсатора служила подложка р-типа, а верхней – карман n-типа в приборном слое структуры КНИ. В результате отрицательной ТПО В ЧВФХ смещается влево, что соответствует накоплению положительного заряда в захороненном оксиде в результате инжекции, на которое накладывается смещение центроида заряда подвижных ионов вверх.

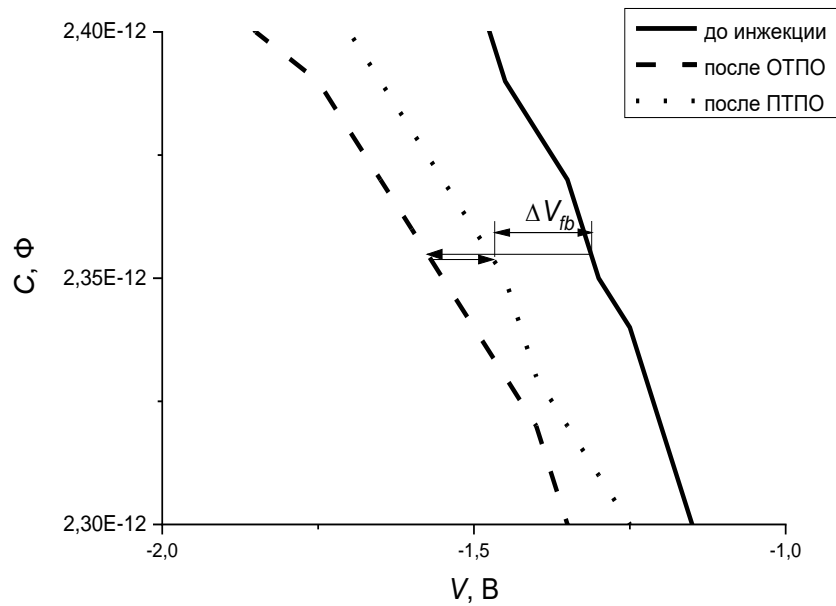


Рисунок 3.3 – Укрупненные участки ВЧ ВФХ структуры КНИ до ТПО и после последовательно отрицательной ТПО и положительной ТПО

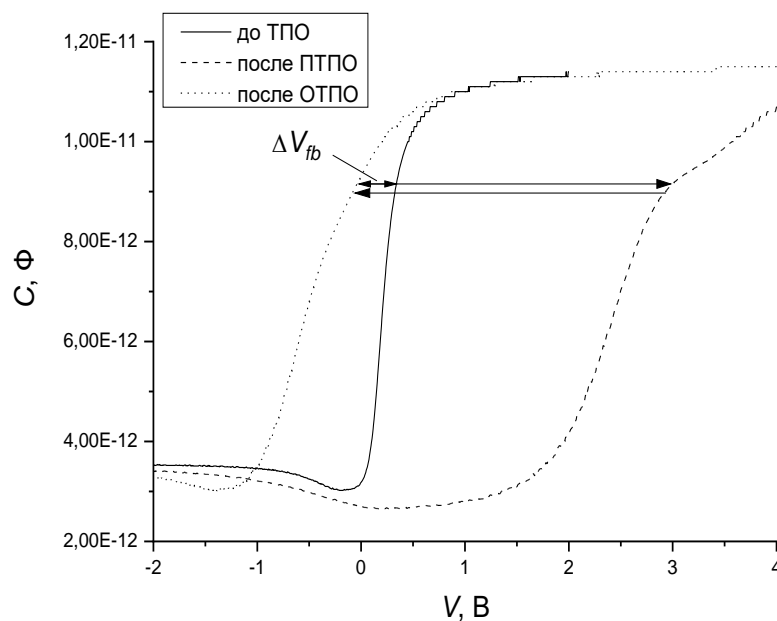
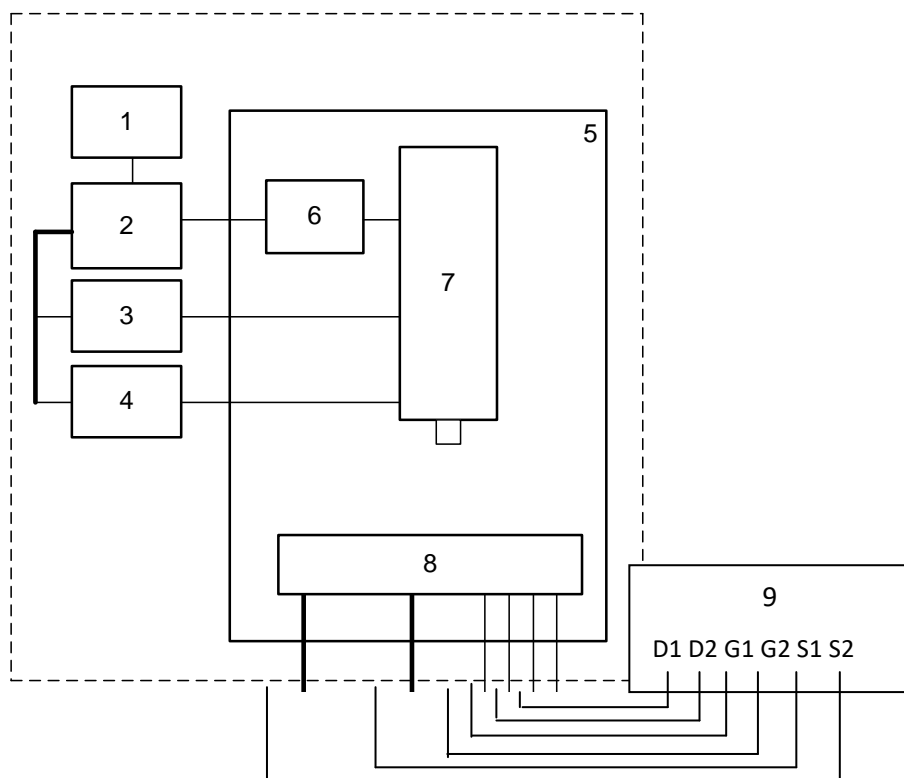


Рисунок 3.4 – ВЧ ВФХ МОП-структуры до ТПО и после последовательно положительной ТПО и отрицательной ТПО

После положительной ТПО, проведенной сразу после отрицательной ТПО, характеристика смещается вправо, что не может быть следствием инъекции, поскольку в результате сильнополевой инъекции электронов при данных условиях в диэлектрике накапливается положительный заряд, и ВЧ ВФХ должна смещаться влево. Поэтому смещение характеристики вправо можно объяснить смещением центраида заряда подвижных ионов захороненного оксида вниз.

Поскольку отрицательная и положительная ТПО отличаются только полярностью, а не напряженностью поля и продолжительностью, можно сделать вывод, что смещения центроида заряда подвижных ионов вверх и вниз сами себя компенсируют, и смещение ВЧВФХ после суммарного действия ОТПО и ПТПО отражает накопленный в захороненном оксиде заряд в результате инжекции. Таким образом, можно заключить, что использование последовательных отрицательной и положительной ТПО позволяет отделить процесс инжекции от миграции подвижных ионов.

Рассмотрим методику рентгеновской имитации радиационного воздействия на тестовые структуры. На рисунке 3.5 представлена блок-схема испытательного комплекса.



1 - монитор; 2 - управляющий компьютер; 3 - блок управления рентгеновским источником; 4 - подсистема охлаждения анода рентгеновского источника; 5 - защитный бокс рентгеновского имитатора; 6 - устройство перемещения рентгеновского источника; 7 - рентгеновский источник; 8 - плата согласования исследуемого объекта; 9 - измеритель параметров полупроводниковых приборов. S – исток, объединенный с подложкой; G – затвор; D – сток. Одновременно испытываются два транзистора.

Рисунок 3.5 – Блок-схема комплекса для исследования тестовых транзисторов на рентгеновском имитаторе

Использовались три режима подачи напряжения на транзистор в процессе облучения. В первом режиме (режим 1) на исток и затвор подавался нулевой потенциал, а на сток – максимальное по модулю рабочее напряжение питания. Во втором режиме (режим 2) нулевой потенциал подавался на исток и на сток, а на затвор подавалось напряжение, не превышающее по модулю напряжение питания, но при этом максимально допустимое напряжение, при котором отсутствуют токи утечки затвора, вызванные инжекцией горячих электронов канала (*Channel Hot Electrons – CHE*), эффектом Пула-Френкеля или инжекцией Фаулера-Нордгейма. В третьем режиме (режим 3) транзисторы были включены в схему в диодном режиме при подаче на сток и затвор напряжения, соответствующего пороговому. Для n-канальных транзисторов напряжение было положительным, для р-канальных – отрицательным. В процессе набора дозы с равномерным шагом измерялись входные и выходные ВАХ транзисторов.

Известно, что смещение порогового напряжения транзистора при воздействии ИИ зависит от напряженности электрического поля в диэлектрических слоях, то есть от режима смещения транзистора в процессе облучения. Эффективная поглощенная доза определяется по следующей формуле:

$$D_e = Df_H, \quad (3.4)$$

где  $D$  – поглощенная доза. В случае рентгеновского излучения доля дырок, избежавших рекомбинации,  $f_H$  зависит от поля  $E$  по следующей формуле:

$$f_H = \left(1 + \frac{1.35}{E}\right)^{-0.9}. \quad (3.5)$$

Очевидно, что режимы 1 и 2 соответствуют максимальной рабочей напряженности поля в диэлектрике, направленного к стоку и к затвору соответственно (в случае р-канального транзистора). Режим 1 соответствует закрытому состоянию транзистора, а режим 2 – открытому. В свою очередь, режим 3 соответствует началу сильной инверсии, и при этом поле направлено от истока к затвору и стоку. Таким образом, данные три режима соответствуют трем основным рабочим состояниям транзистора и трем направлениям поля.

Исследовались кольцевые n- и p-канальные транзисторы трех видов: низковольтный (транзисторы N1 и P1), высоковольтный с LDD-областью под затвором (транзисторы N2 и P2) и высоковольтный с частично вынесенной из-под затвора LDD-областью (транзисторы N3 и P3).

Максимальные напряжения на затворе и стоке для транзисторов N1 и N2 определялись экспериментально путем измерения семейства выходных ВАХ (рисунок 3.6) с контролем тока утечки затвора (рисунок 3.7) при уменьшении диапазонов напряжения на затворе и стоке до значений, при которых отсутствуют пробой в цепи сток-исток и утечки через затвор, вызванные инжекцией горячих электронов канала *SHE*.

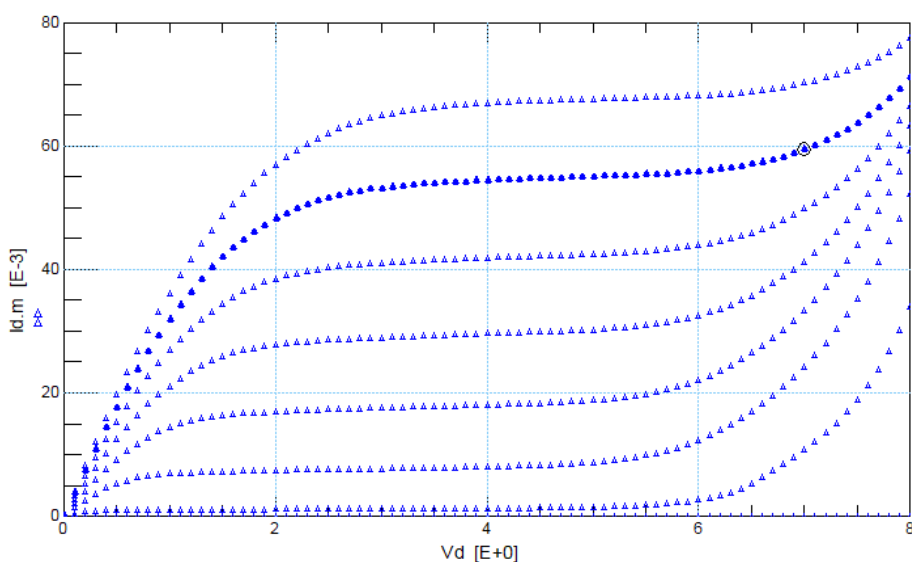


Рисунок 3.6 – Семейство выходных ВАХ для транзистора N1 с указанием максимального напряжения на стоке

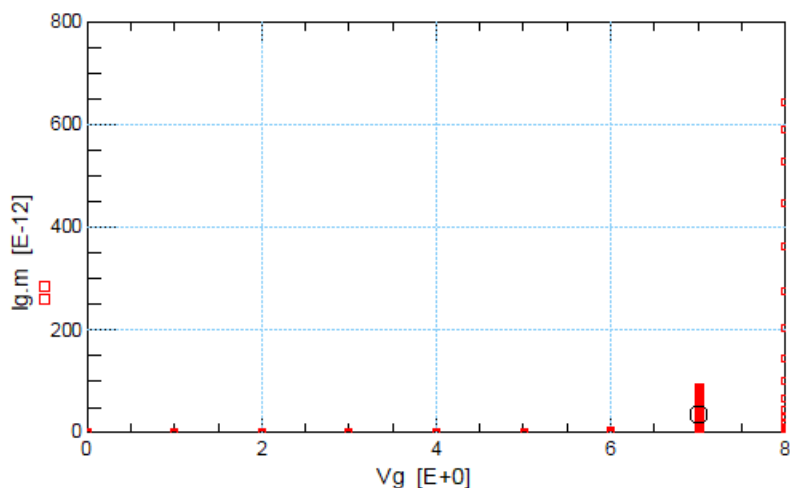


Рисунок 3.7 – Ток утечки через затвор для транзистора N1, обусловленный инжекцией горячих электронов канала, с указанием максимального напряжения на затворе



В случае всех остальных транзисторов (P1, P2, N3, P3) токи утечки затвора были обусловлены инжекцией лавинных горячих носителей стока (*Drain Avalanche Hot Carriers – DAHC*), проявляющейся при меньших напряжениях на затворе (рисунок 3.8). Поэтому для этих транзисторов максимальные напряжения на затворе и стоке определялись путем измерения семейства выходных ВАХ (рисунок 3.9) при уменьшении диапазонов напряжений на затворе и стоке до значений, при которых отсутствуют пробой в цепи сток-исток и ток утечки затвора, вызванный эффектом Пула-Френкеля или инжекцией Фаулера-Нордгейма (рисунок 3.10). На рисунке 3.10 видно, что утечки диэлектрика на n-кармане начинаются при напряжении 22 В и, не проходя точек излома, достигают катастрофического пробоя. Следовательно, в данном случае утечки обусловлены только одним эффектом – инжекцией Фаулера-Нордгейма. В случае р-кармана ток начинает расти при напряжении -17 В, проходит через точку излома при напряжении -31 В и далее растет аналогично току через диэлектрик на n-кармане. Как было показано в главе 2, участок ВАХ ТДК при средних напряжениях соответствует эффекту Пула-Френкеля.

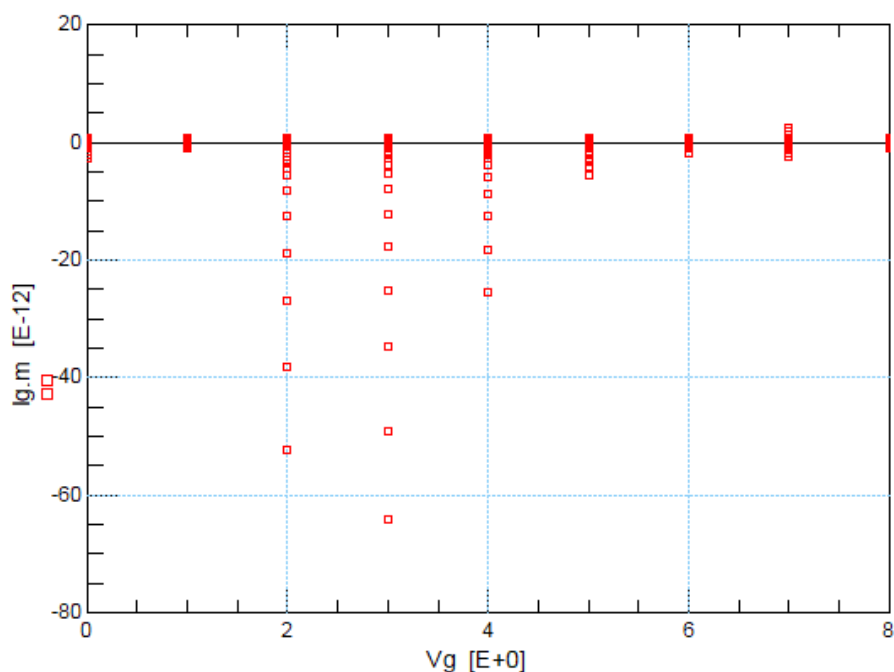


Рисунок 3.8 – Ток утечки через затвор для транзистора N3, обусловленный инжекцией лавинных горячих носителей стока

В таблице 3.1 представлены значения напряжения смещения на затворе и стоке в процессе облучения.

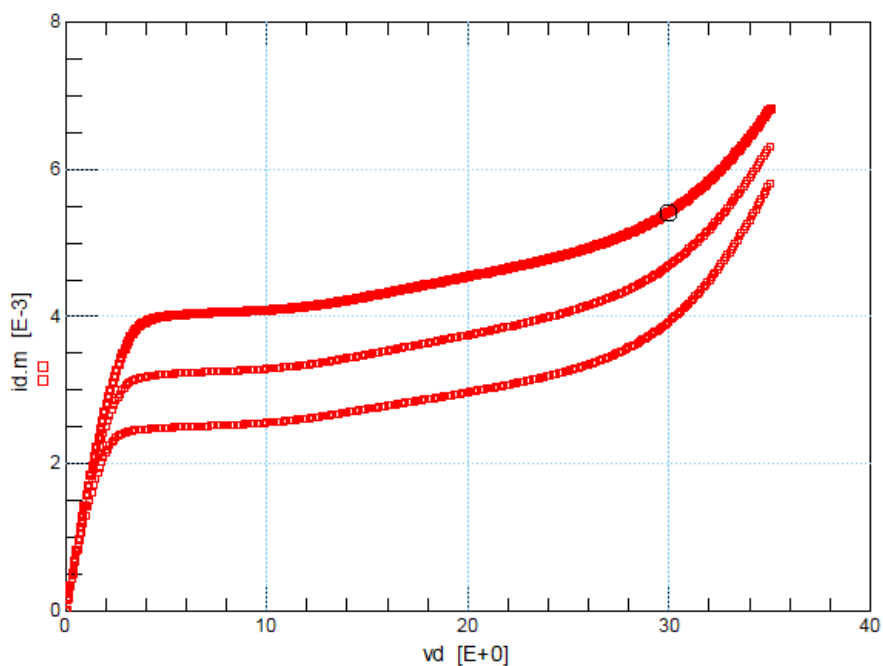


Рисунок 3.9 – Семейство выходных ВАХ для транзистора N3 с указанием максимального напряжения на стоке

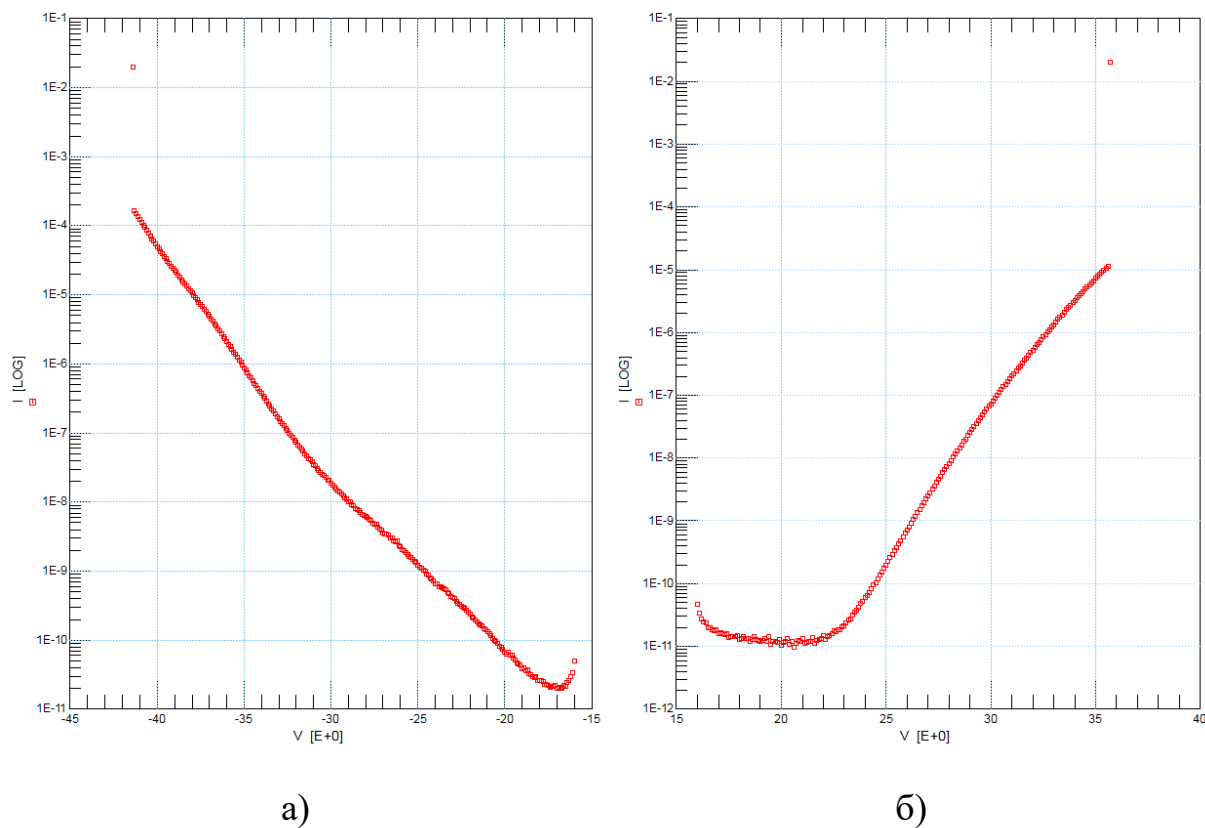


Рисунок 3.10 – ВАХ подзатворного диэлектрика на р-кармане (а) и на п-кармане (б)

Таблица 3.1– Напряжения смещения транзисторов в процессе облучения

<b>п-канальный транзистор</b>	<b><math>V_G</math>, В</b>	<b><math>V_D</math>, В</b>	<b>р-канальный транзистор</b>	<b><math>V_G</math>, В</b>	<b><math>V_D</math>, В</b>
<b>N1</b> (режим 1)	0	7	<b>P1</b> (режим 1)	0	-7
<b>N1</b> (режим 2)	7	0	<b>P1</b> (режим 2)	-7	0
<b>N2</b> (режим 1)	0	17	<b>P2</b> (режим 1)	0	-17
<b>N2</b> (режим 2)	7	0	<b>P2</b> (режим 2)	-7	0
<b>N3</b> (режим 1)	0	30	<b>P3</b> (режим 1)	0	-25
<b>N3</b> (режим 2)	17	0	<b>P3</b> (режим 2)	-17	0

### 3.2 Разработка модели

Разработанный в настоящей работе метод оценки дефектности слоя диоксида кремния на основе анализа его ВАХ позволяет определять параметры диэлектрика, влияющие на его радиационную чувствительность. Для того чтобы количественно прогнозировать радиационную стойкость МОП-транзисторов и микросхем, необходимо разработать математические модели влияния данных параметров дефектности на параметры транзисторов.

На дозовую радиационную стойкость КМОП ИС на объемном кремнии наибольшее влияние оказывает дефектность подзатворного ТДК, а на стойкость КМОП КНИ ИС – дефектность захороненного ТДК. В основе модели лежит расчет радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзистора (подзатворный ТДК) или паразитного МОП-транзистора, в котором в качестве подзатворного диэлектрика выступает захороненный оксид. При этом исходными данными для расчета являются экспериментальные значения концентрации дефектных центров в слое ТДК. Строились экспериментальные и теоретические зависимости деградационных параметров транзисторов от параметров дефектности слоев ТДК. Затем графическим методом экстрагировались параметры моделей.

Из формул (1.1), (1.3) и (1.6) следует, что радиационно-индуцированный сдвиг порогового напряжения паразитного транзистора определяется по следующей формуле:

$$\Delta V_{th} = - \frac{qD_e g_0 d_{ox} \sigma(E) N_t}{C_{ox}} . \quad (3.6)$$

В главе 2 были сделаны выводы о зависимости дефектности слоя диоксида кремния от концентрации кристаллографических дефектов окисляемой подложки, а также о наличии корреляции концентрации центров Пула-Френкеля (преимущественно, атомов междоузельного кремния) и общего количества центров, способных захватывать радиационно-индуцированный заряд. В первом приближении сделаем допущение о пропорциональности (с коэффициентом  $K$ ) концентрации центров, заряжающихся при радиационном воздействии, и концентрации центров Пула-Френкеля [78]. Тогда путем объединения известной зависимости (3.6) радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов от концентрации ловушек заряда в подзатворном оксиде и выражения (2.1), описывающего эффект Пула-Френкеля, с учетом различных типов дефектов получаем формулу, связывающую сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора после воздействия ИИ и плотность тока утечки  $J_{ут}$  подзатворного оксида до воздействия ИИ:

$$\Delta V_{th} = - \frac{qDg_0d_{ox}\sigma}{C_{ox}} \cdot K \frac{J_{ут}^2}{A} , \quad (3.7)$$

где  $q$  – элементарный заряд;  $D$  – эффективная поглощенная доза ИИ;  $g_0$  – скорость генерации электронно-дырочных пар в диэлектрике на единицу поглощенной дозы;  $C_{ox}$  – емкость диэлектрика;  $K$  – отношение общего количества центров к количеству центров Пула-Френкеля;  $J_{ут}$  – плотность тока в точке максимума участка Пула-Френкеля (рисунок 2.1);  $A$  – коэффициент, зависящий от свойств материала, напряженности электрического поля и температуры по следующей формуле:

$$A = \frac{1}{2d_{ox}} N_C \left( q\mu E_{PF} \exp \left[ -\frac{\varphi_D - \sqrt{\frac{q^3 E_{PF}}{\pi \varepsilon \varepsilon_0}}}{2kT} \right] \right)^2, \quad (3.8)$$

где  $E_{PF}$  – напряженность электрического поля в точке ВАХ, соответствующей  $J_{ут}$  (максимальной точке участка Пула-Френкеля); остальные величины обозначены согласно формуле (2.1).

Для экспериментального подтверждения модели были проведены измерения  $I_{PF}$  для пяти пластин КНИ в пяти точках на пластине. На первом этапе разработки модели была проведена электрическая имитация радиационного воздействия. Затем были проведены исследования на рентгеновском имитационном комплексе.

Рассмотрим результаты электрической имитации [67]. В качестве имитации радиационного воздействия проводились отрицательные и положительные термополевые обработки в режимах, описанных в разделе 3.1.

На рисунке 3.11 представлена диаграмма рассеяния зависимости смещения плоских зон структуры КНИ после суммарного действия ОТПО и ПТПО  $\Delta V_{fb2}$  от плотности тока утечки на участке Пула-Френкеля при напряженности 3 МВ/см. На диаграмме точки образуют группы, соответствующие разным пластинам. Видно, что в пределах пластины зависимость не прослеживается. Использование нескольких измерений на пластине позволило снизить влияние погрешности измерений и отследить зависимость при переходе от пластины к пластине. Видно, что зависимость является убывающей. Это противоречит предположению о том, что больший ток Пула-Френкеля (по модулю), свидетельствующий о большей концентрации дефектов в захороненном оксиде, должен соответствовать большему смещению плоских зон структуры КНИ после имитации.

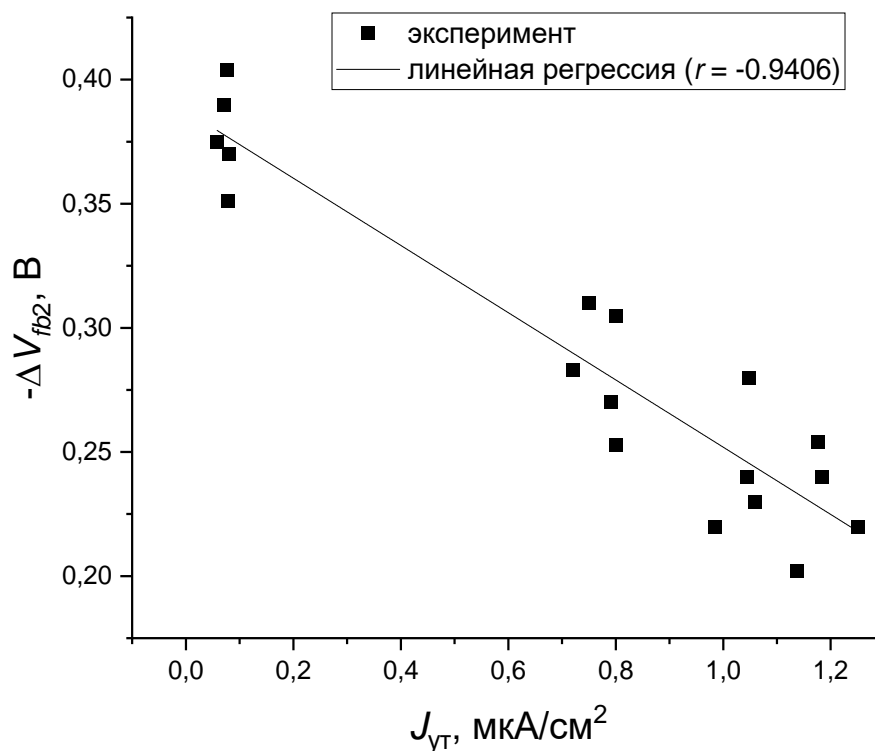


Рисунок 3.11 – Корреляция сдвига напряжения плоских зон структуры КНИ после суммарного воздействия ОТПО и ПТПО от плотности тока утечки захороненного оксида (с указанием коэффициента корреляции Пирсона  $r$ )

Это противоречие разрешается в результате анализа зависимости сдвига напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb0}$ , измеренного до всех ТПО, но после измерения ВАХ захороненного оксида от плотности тока утечки (рисунок 3.12). Здесь следует отметить, что ТПО проводились после измерения тока Пула-Френкеля захороненного оксида, причем на тех же самых тестовых структурах. Видно, что существует квадратичная зависимость, которая может быть описана разрабатываемой моделью. Это говорит о том, что измерение ВАХ захороненного оксида влияет на концентрацию положительного заряда в захороненном оксиде до проведения ТПО.

Это влияние можно объяснить следующим образом. Чем больше концентрация донорных центров в захороненном оксиде, тем большее их число участвует в проводимости Пула-Френкеля и тем больше величина  $J_{ут}$ . Как уже говорилось в главе 2, после измерения ВАХ донорные центры, участвовавшие в проводимости Пула-Френкеля, остаются ионизованными, причем заряженными положительно. Таким образом, чем больше значение  $J_{ут}$ , тем больше напряжение

плоских зон структуры КНИ после измерения ВАХ. Это объясняет убывающую зависимость  $-\Delta V_{fb2}$  от  $I_{PF}$ . Действительно, чем больше донорных центров оказывается ионизованными до ТПО, тем меньше донорных центров сможет зарядиться в результате ТПО.

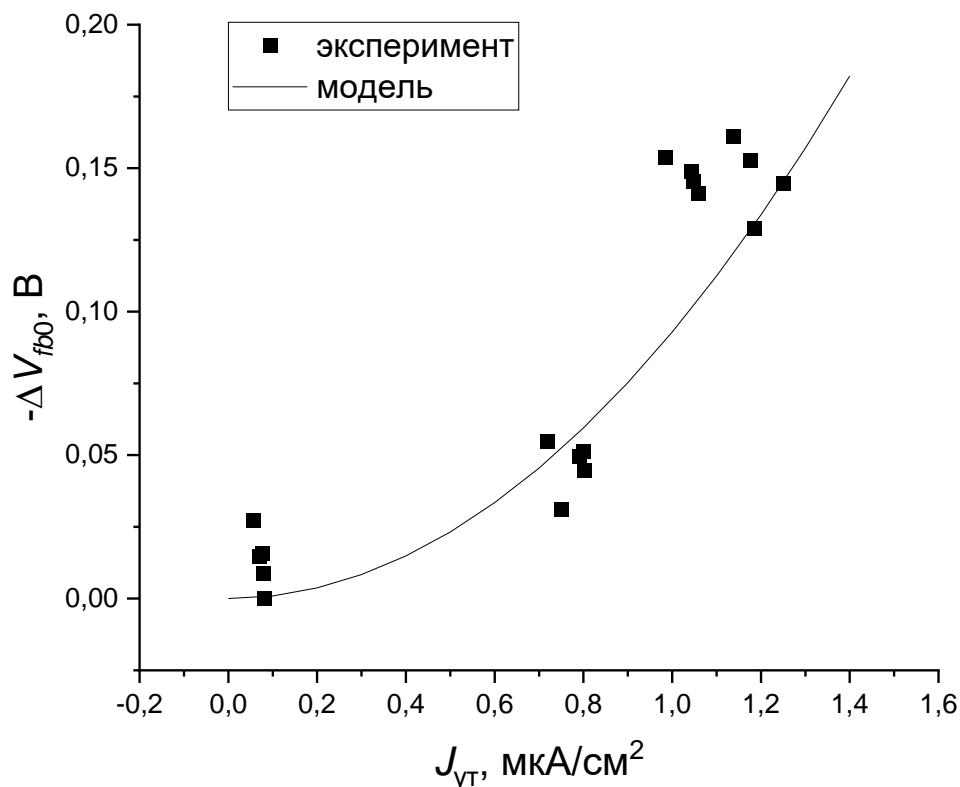


Рисунок 3.12 – Зависимость сдвига напряжения плоских зон структуры КНИ после измерения ВАХ захороненного оксида (но до проведения ТПО) от тока Пула-Френкеля захороненного оксида

При проведении электрической имитации радиационного воздействия на подзатворный ТДК на объемном кремнии учитывался опыт, полученный при исследовании захороненного оксида. Для исключения влияния измерения ВАХ до имитации на сдвиг напряжения плоских зон после имитации измерение ВАХ и ТПО проводились на разных тестовых структурах, но расположенных рядом на пластине. На рисунке 3.13 представлены результаты эксперимента и моделирования.

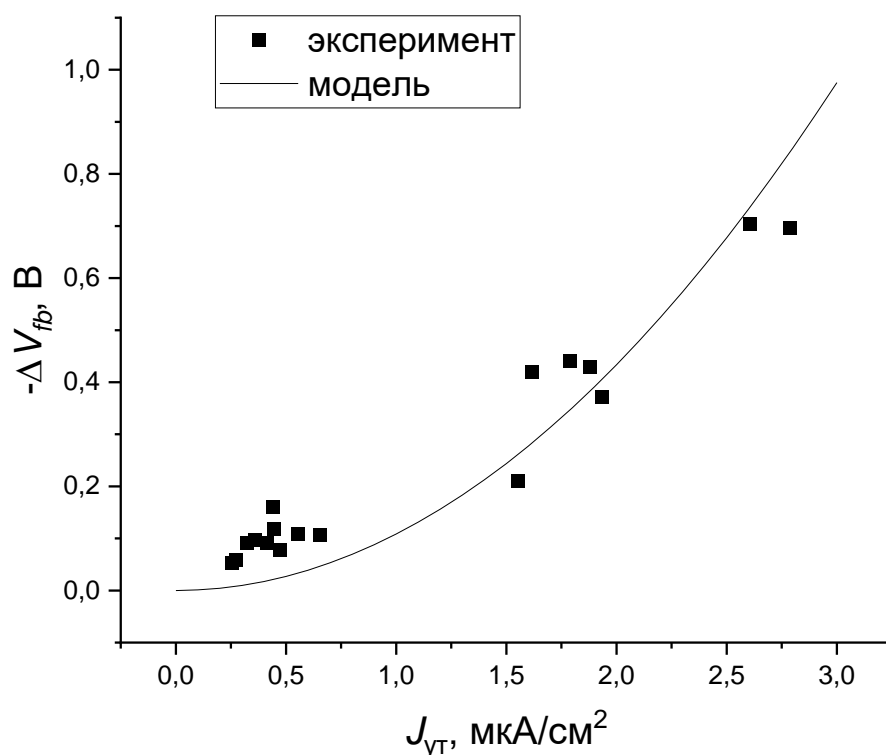


Рисунок 3.13 – Зависимость сдвига напряжения плоских зон МОП-конденсатора в результате электрической имитации от тока утечки подзатворного оксида на объемном кремнии до имитации

Рассмотрим результаты рентгеновской имитации.

На рисунках 3.14 и 3.15 представлены результаты имитационных исследований n- и p-канальных транзисторов в виде набора входных ВАХ в процессе набора дозы (а – линейный масштаб, б – логарифмический по оси Y). Видно, что в случае n-канального транзистора ВАХ по мере накопления дозы сначала немного смещается влево, а затем сильно наклоняется вправо в подпороговой области, что приводит к смещению порогового напряжения в сторону положительных напряжений. Это означает, что сначала преобладает накопление положительного заряда в подзатворном оксиде, а затем имеет место преимущественно накопление поверхностных состояний. В случае p-канального транзистора ВАХ смещается в сторону отрицательных напряжений, а подпороговый наклон практически не меняется, то есть происходит только накопление положительного заряда в подзатворном оксиде, а поверхностные состояния накапливаются в незначительном количестве.



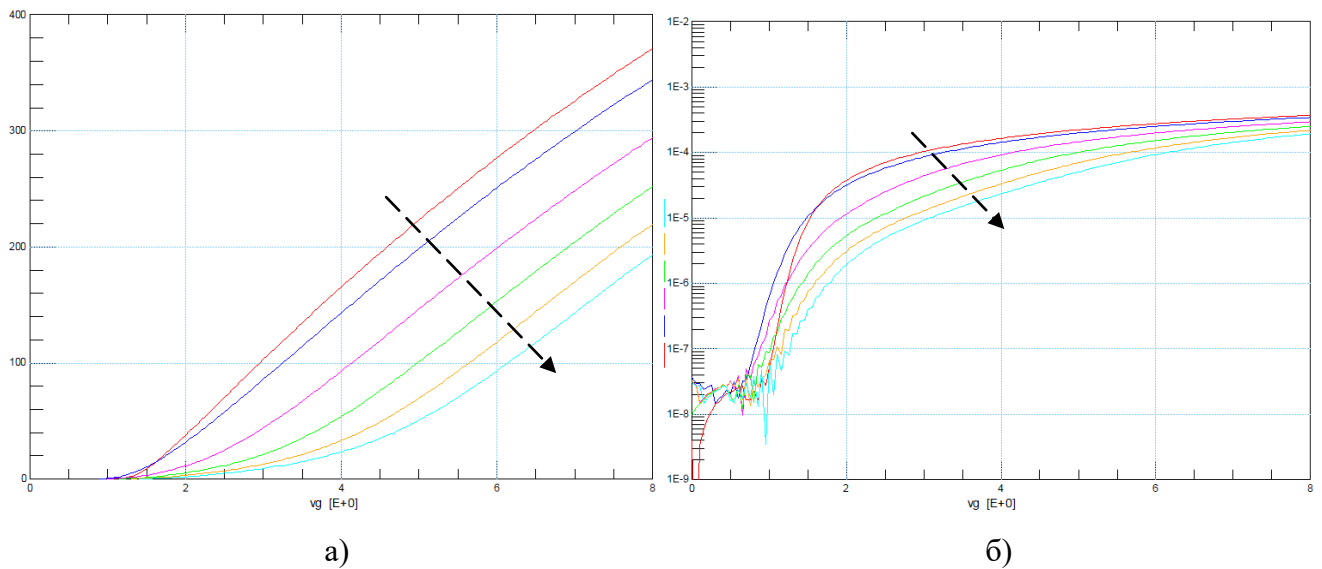


Рисунок 3.14 – Смещение ВАХ транзистора N1 при наборе накопленной дозы

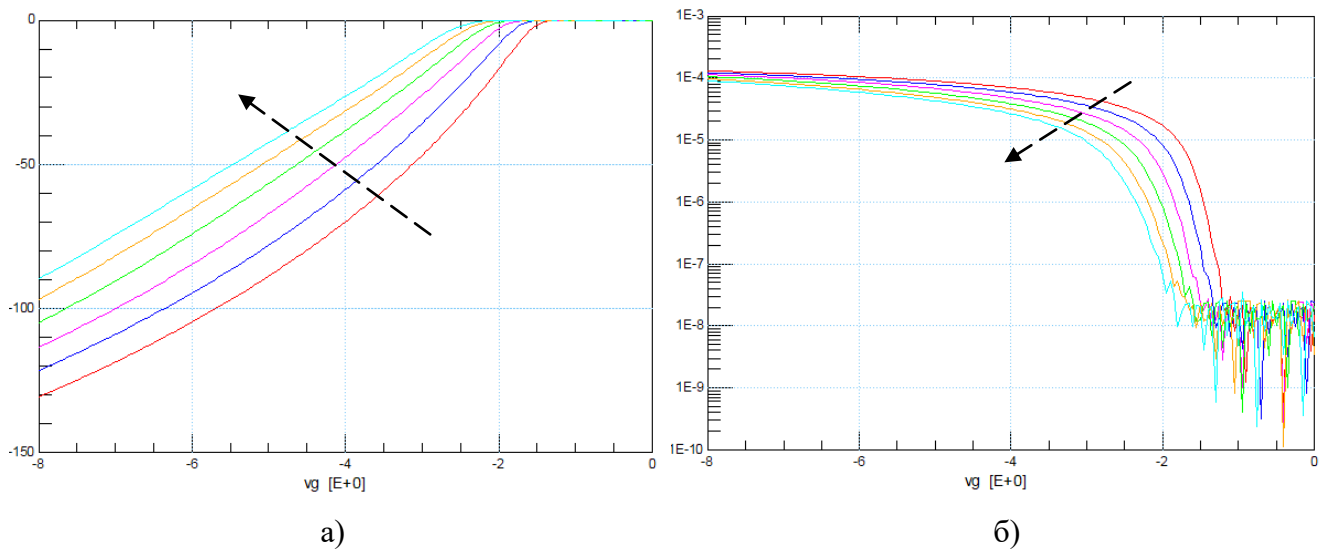
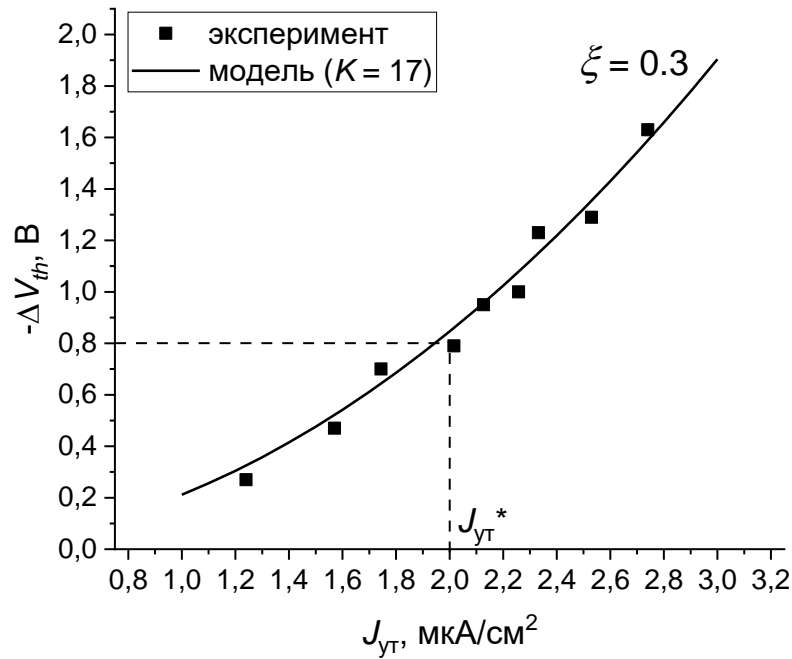
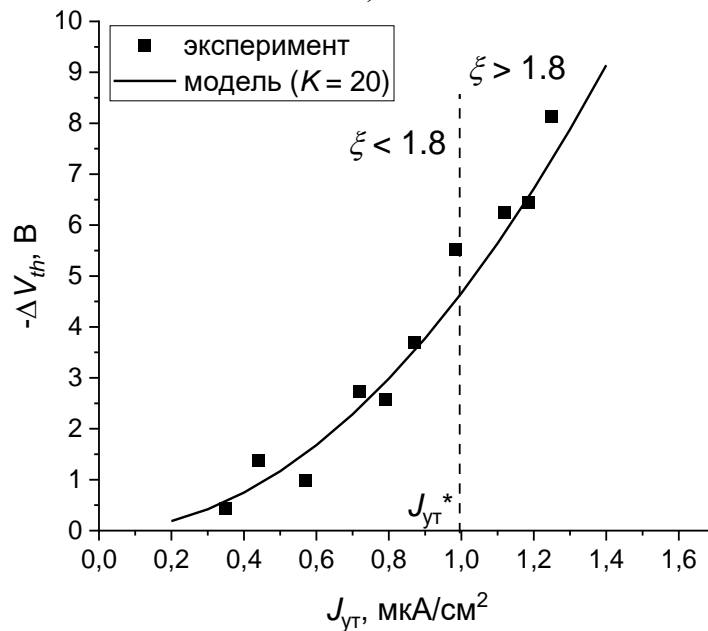


Рисунок 3.15 – Смещение ВАХ транзистора P1 при наборе накопленной дозы

На рисунках 3.16-а и -б представлены экспериментальные и моделируемые зависимости радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения  $\Delta V_{th}$  от  $J_{\gamma T}$  до облучения. Для случая рентгеновской имитации была обнаружена детерминированная зависимость в пределах пластины.



а)



б)

Рисунок 3.16 – а) Экспериментальная и моделируемая зависимость радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения МОП-транзистора на объемном кремнии от плотности тока утечки подзатворного оксида; б) экспериментальная и моделируемая зависимость радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения паразитного транзистора, образованного структурой КНИ, от плотности тока утечки захороненного оксида

Наилучшее совпадение экспериментальных и моделируемых зависимостей на рисунках 3.16-а и -б было достигнуто при  $K = 17$  и  $K = 20$  соответственно. Эти значения хорошо согласуются со значениями  $K$ , определяемыми как отношение концентрации ЭПР-активных центров, полученной методом ЭПР, к концентрации

донорных центров, полученной из анализа ВАХ (см. главу 2), что подтверждает справедливость разработанной модели.

Одно из практических применений разработанной модели состоит в определении критериев забракования пластин со сформированными слоями диоксида кремния по плотности тока утечки тестовых структур на пластине. На рисунках 3.16-а и -б проиллюстрировано определение данных критериев. Представлены значения при комнатной температуре. Для подзатворного ТДК критерий ( $2 \text{ мкА/см}^2$ ) соответствует переходу от структур с дефектностью, характерной для структур КНС ( $\xi > 0.3$ ), к структурам с дефектностью, характерной для структур на объемном кремнии ( $\xi < 0.3$ ), что позволяет отбраковывать потенциально ненадежные структуры на объемном кремнии. В качестве критерия для захороненного оксида была выбрана точка ( $1 \text{ мкА/см}^2$ ), соответствующая переходу от структур *SIMOX* ( $\xi > 1.8$ ) к структурам *SmartCut* ( $\xi < 1.8$ ), что позволяет отбраковывать потенциально ненадежные структуры *SmartCut*.

На значение плотности тока утечки влияет множество факторов, поэтому необходимо определить режимы измерений, позволяющие снизить влияние паразитных факторов и получить значение тока, непосредственно отражающее дефектность диэлектрического слоя. В таблице 3.2 представлен оптимальный режим, определенный экспериментально в настоящей главе. Также описаны факторы, определяющие выбор оптимальных значений параметров. Основным фактором, ограничивающим изменения параметров измерений, является возможность деградации структуры диэлектрика при увеличении длительности измерений вследствие инжекции заряда в диэлектрический слой [79].

На рисунке 3.17 представлены ВАХ слоя диоксида кремния на объемном кремнии при различных значениях времени интегрирования. Видно, что повышение времени интегрирования от 640 мкс до 320 мс сглаживает шумы в диапазоне малых токов (до 1 пА) и снижает влияние зарядки паразитных емкостей в диапазоне средних токов (снижение тока в диапазоне от 1 пА до 1 нА). Дальнейшее повышение времени интегрирования до 800 мс приводит к

деградации структуры диэлектрика, которое проявляется в снижении тока сильнополевой инжекции в области высоких токов (от 1 нА до 20 нА).

На рисунке 3.18 представлены ВАХ слоя диоксида кремния на структуре КНС при различных значениях времени задержки измерений. Видно, что повышение задержки от 0 с до 100 мс снижает влияние зарядки паразитных емкостей, причем снижение тока выходит в насыщение. Дальнейшее увеличение времени задержки до 1 с и 10 с приводит к резкому уменьшению тока, что говорит о проявлении другого эффекта – деградации структуры диэлектрика.

Таблица 3.2 – Оптимальный режим измерений плотности тока утечки

Параметр	Значение	Определяющие факторы	
Задержка измерений	100 мс	Значение достаточно для снижения влияния переходных процессов	При этом не успевают проявляться деградация структуры диэлектрика
Время интегрирования	320 мс	Значение достаточно для снижения влияния электромагнитных помех	
Величина шага	0.3 МВ/см	Количество шагов оказывается достаточным для визуализации участков ВАХ и определения точки контроля $J_{ут}$	

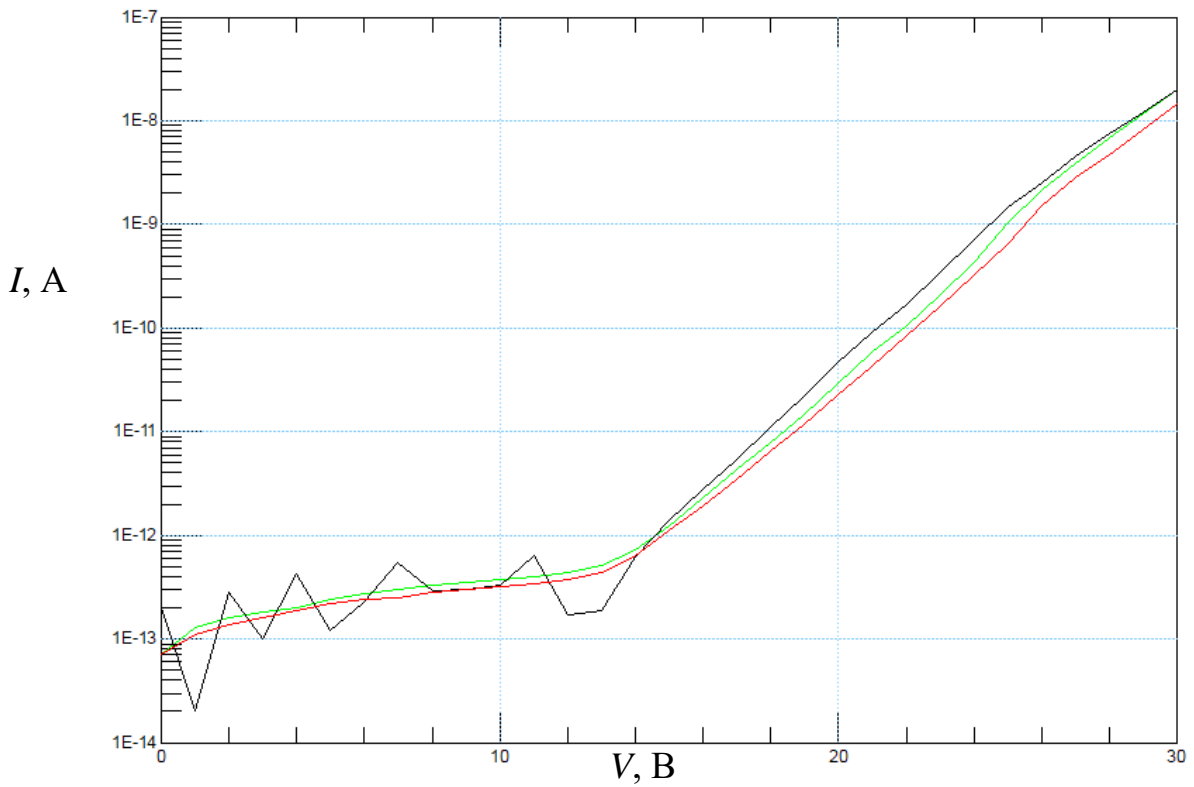


Рисунок 3.17 – ВАХ слоя диоксида кремния на объемном кремнии при различных значениях времени интегрирования: черная линия – 640 мкс; зеленая линия – 320 мс; красная линия – 800 мс

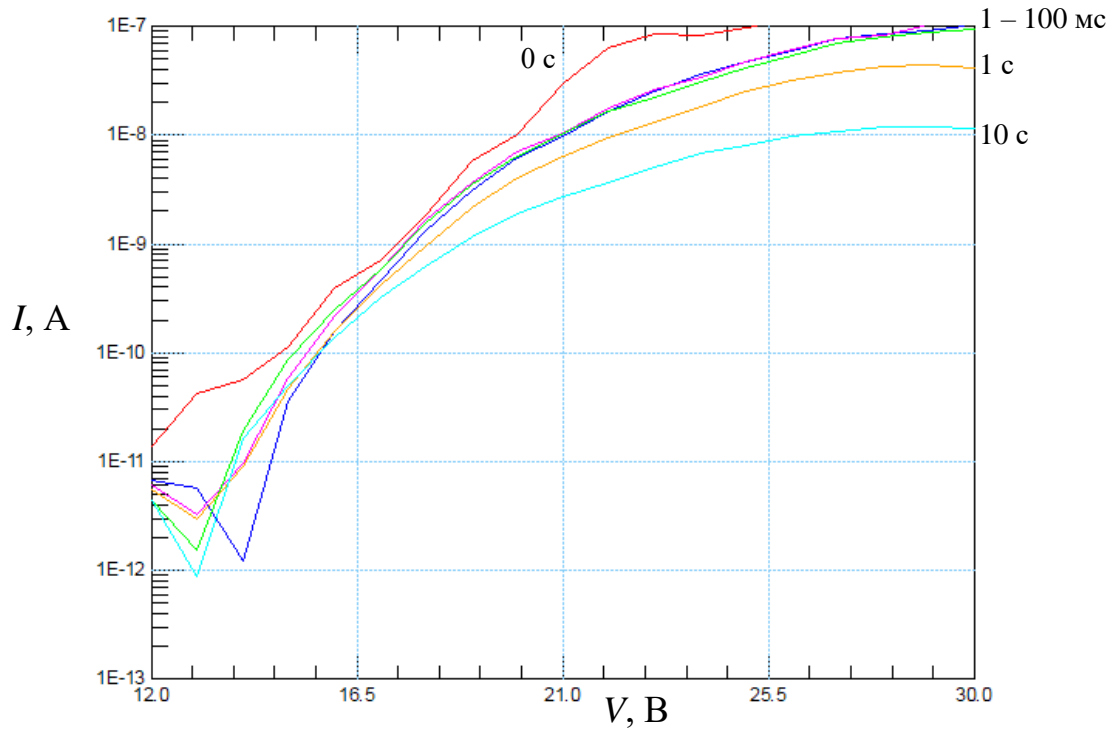


Рисунок 3.18 – ВАХ слоя диоксида кремния на КНС при различных значениях времени задержки измерений

### Выводы по главе 3

1) Разработана методика электрической и рентгеновской имитации радиационного воздействия на тестовые структуры.

2) Определены оптимальные режимы термополевых обработок тестовых конденсаторов, обеспечивающие достоверность имитации при ограничении времени испытаний.

3) Определены режимы смещения тестовых транзисторов при облучении.

4) 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.

5) Представлены результаты электрической и рентгеновской имитации, подтверждающие в совокупности с результатами ЭПР-анализа справедливость разработанной модели.

6) Наилучшее совпадение результатов моделирования и эксперимента было достигнуто при коэффициенте  $K$ , означающем отношение общего количества дефектных центров в слое  $\text{SiO}_2$  к количеству центров, участвующих в электропроводности, примерно равном 17. Это значение близко к коэффициенту, представленному в главе 2 как отношение концентрации ЭПР-активных центров к концентрации центров, определяемому из ВАХ. Известно, что большинство центров захвата заряда являются парамагнитными. Таким образом, результаты ЭПР-анализа подтверждают справедливость разработанной модели.

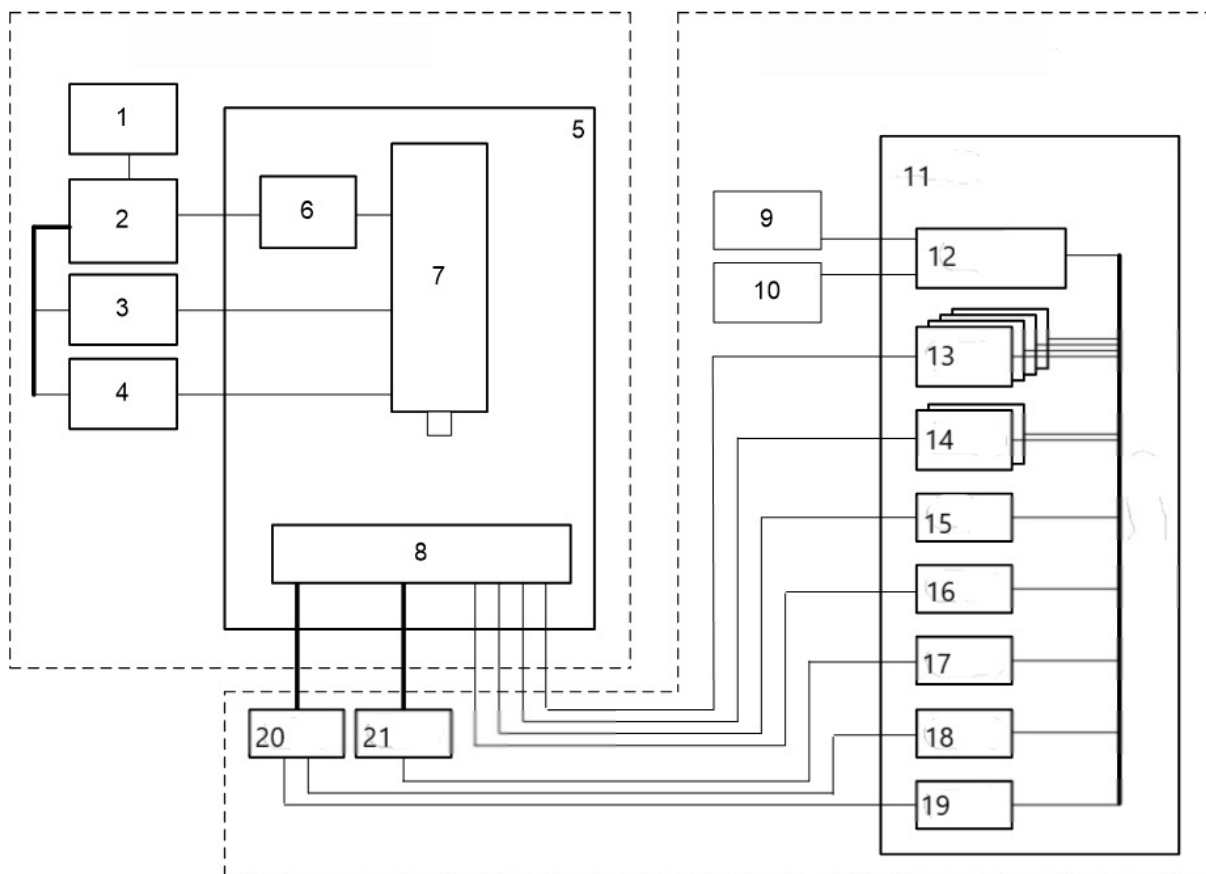
7) Определен оптимальный режим контроля плотности тока утечки слоя диоксида кремния: задержка измерений 100 мс, время интегрирования 320 мс, величина шага по напряженности поля при измерении ВАХ 0,3 МВ/см. Данный режим позволяет снизить влияние переходных процессов и помех на результат измерений при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

## **4. Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем с помощью разработанных метода и модели**

### **4.1 Методика оценки дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем**

В предыдущей главе были разработаны модели, позволяющие прогнозировать дозовую стойкость МОП-транзисторов. Далее следует распространить полученные результаты на прогнозирование дозовой стойкости микросхем. Рассмотрим методику оценки дозовой радиационной стойкости микросхем. Начнем с КМОП КНИ ИС. Исследуемая микросхема представляла собой постоянное запоминающее устройство на основе базового матричного кристалла. На рисунке 4.1 представлена блок-схема рентгеновского комплекса. Облучение образцов ИС при исследованиях проводилось при напряжении на аноде трубки рентгеновского источника 45 кВ, токе анода 160 мкА. Дозиметрический контроль при исследованиях проводился по показаниям калиброванного детектора рентгеновского излучения.

Задание электрического режима исследуемых образцов в процессе воздействия ИИ, измерение параметров и управление рентгеновским комплексом обеспечивалось автоматизированным измерительным комплексом, представляющим собой модульную РХИ-систему со встроенным контроллером и специализированными РХИ-модулями цифрового и аналогового ввода-вывода, трехканального источника питания, осциллографа, мультиплексора, мультиметра, управляемых посредством высокопроизводительного интерфейса РХИ. Назначение и характеристики модулей измерительного комплекса приведены в таблице 4.1.



1 - монитор; 2 - управляющий компьютер; 3 - блок управления рентгеновским источником; 4 - подсистема охлаждения анода рентгеновского источника; 5 - защитный бокс рентгеновского имитатора; 6 - устройство перемещения рентгеновского источника; 7 - рентгеновский источник; 8 - плата согласования исследуемого объекта; 9 - клавиатура; 10 - монитор

Рисунок 4.1 – Блок-схема комплекса для оценки дозовой стойкости КМОП КНИ ИС

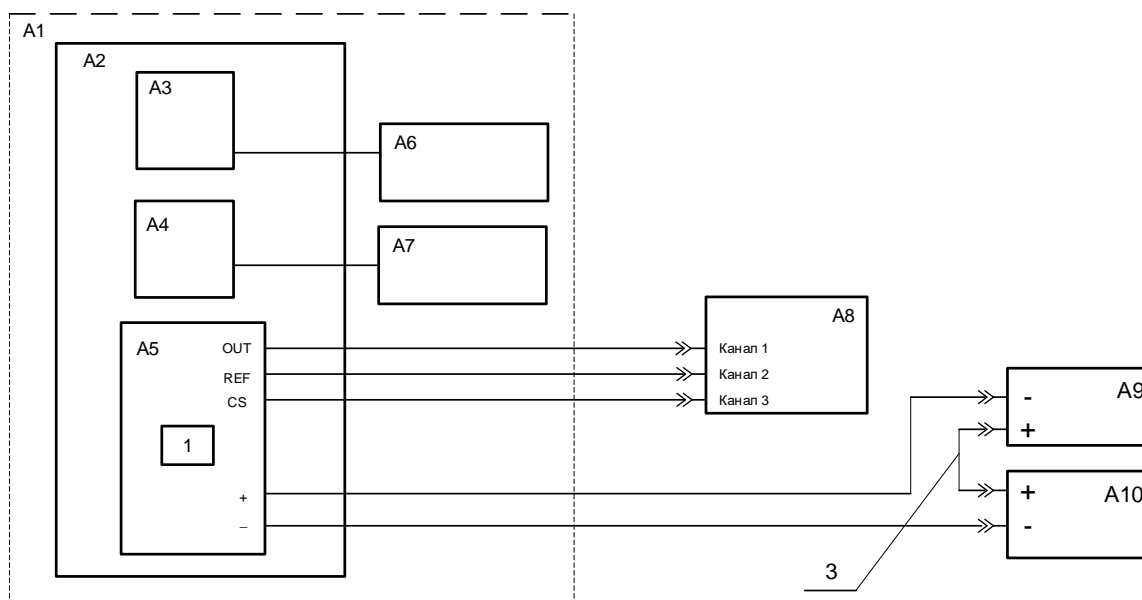
Таблица 4.1 – Состав и назначение модулей измерительного комплекса рентгеновского стенда

Обозначение	Наименование, назначение, основные характеристики
11	Шасси
12	Контроллер
13	Цифровой генератор/анализатор сигналов
14	Цифровой генератор/анализатор сигналов
17	Многофункциональный модуль ввода-вывода
15	Программируемый источник постоянного тока
18	Цифровой мультиметр и измеритель параметров LCR
16	Цифровой осциллограф
19	Мультиплексор
20	Терминальный блок
21	Терминальный блок



Исследования деградации параметров КМОП КНИ ИС проводились в наиболее критичном электрическом режиме (режим хранения при повышенном напряжении питания). В процессе воздействия осуществлялся периодический контроль тока потребления в режиме хранения  $I_{ccs}$  и напряжения смещения подложки  $U_{sub}$ . Критерием выхода из строя микросхемы считалось превышение тока потребления значения 30 мА, который измерялся при отключенном излучении.

Рассмотрим методику рентгеновских исследований КМОП ИС на объемном кремнии. Микросхема представляла собой устройство управления импульсными стабилизаторами напряжения. Блок-схема рентгеновского комплекса представлена на рисунке 4.2.



A1 - рентгеновский имитационный комплекс; A2 - защитный бокс; A3 - исполнительный механизм устройства перемещения; A4 - блок излучателя рентгеновского источника; A5 - плата сопряжения; A6 - блок управления устройством перемещения; A7 - блок питания рентгеновского излучения; A8 – осциллограф цифровой; A9 - мультиметр; A10- источник питания постоянного тока; 1 - испытываемая микросхема.

Рисунок 4.2 – Блок-схема комплекса для оценки дозовой стойкости КМОП ИС на объемном кремнии

В процессе воздействия осуществлялся периодический контроль тока потребления в режиме хранения  $I_{ccs}$ . Критерием выхода из строя микросхемы считалось превышение тока потребления значения 30 мА, который измерялся при отключенном излучении.

## 4.2 Контроль и снижение дефектности слоев диоксида кремния

В настоящей работе предложен алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП микросхем с помощью разработанных метода и модели (рисунок 4.3). На этапе отработки технологии проводится контроль коэффициентов дефектности  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\xi$ . 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. Также проводится контроль  $J_{ут}$  с максимально возможной выборкой (как на пластине, так и в партии пластин), по результатам которого рассчитывается среднеквадратическое отклонение  $J_{ут}$  на каждой пластине с целью определения целесообразности отбраковки на уровне пластин или на уровне кристаллов в рабочей партии. Затем, на этапе рабочих пластин с кристаллами микросхем, проводится отбраковка пластин или кристаллов микросхем по плотности тока утечки  $J_{ут}$  согласно модели, представленной в главе 3.

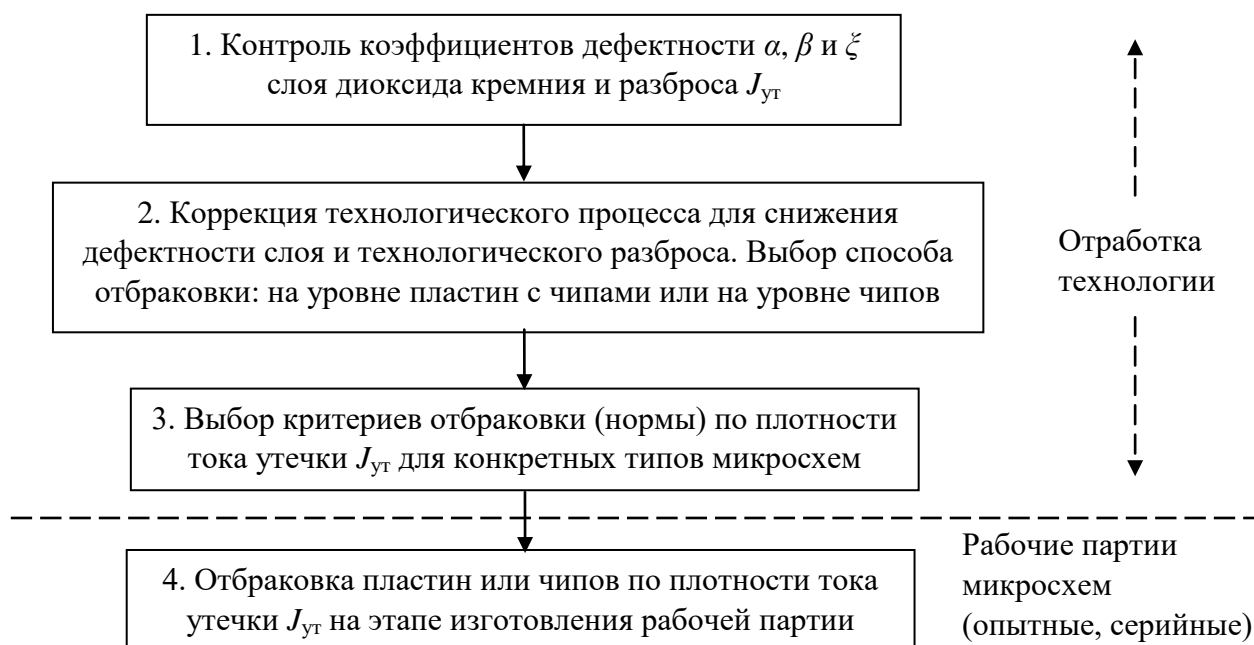


Рисунок 4.3 – Алгоритм прогнозирования дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем с помощью разработанных метода и модели

В результате применения данного алгоритма на практике были получены следующие результаты. На этапе отработки технологии с целью снижения дефектности подзатворного диоксида кремния был использован отжиг структуры

перед выращиванием подзатворного оксида. Режим отжига представлен в таблице 4.2. В главе 2 было показано влияние кристаллографического совершенства кремниевой подложки на дефектность оксида. Отжиг положительно влияет на качество поверхности кремния благодаря перегруппировке разупорядоченных атомов. На рисунке 4.4 представлены кривые дифракционного отражения для образца без отжига и с отжигом. Видно, что отжиг позволяет получить более совершенную кристаллическую структуру кремния после имплантации, что проявляется в меньшей ширине пика. На рисунке 4.5 представлены ВАХ подзатворного оксида без отжига и с отжигом. Отжиг позволил снизить коэффициент дефектности  $\zeta$  с 0.4 до 0.3.

Был проведен контроль плотности тока утечки тестовых конденсаторов, расположенных на дорожках реза между чипами на пластине со стопроцентной выборкой. На рисунке 4.6 представлено частотное распределение плотности тока утечки для трех пластин в партии.

Таблица 4.2 – Режим постимплантационного отжига

Атмосфера	N <sub>2</sub>
Температура	900 °С
Длительность	30 минут
Температура загрузки и выгрузки пластин	850 °С

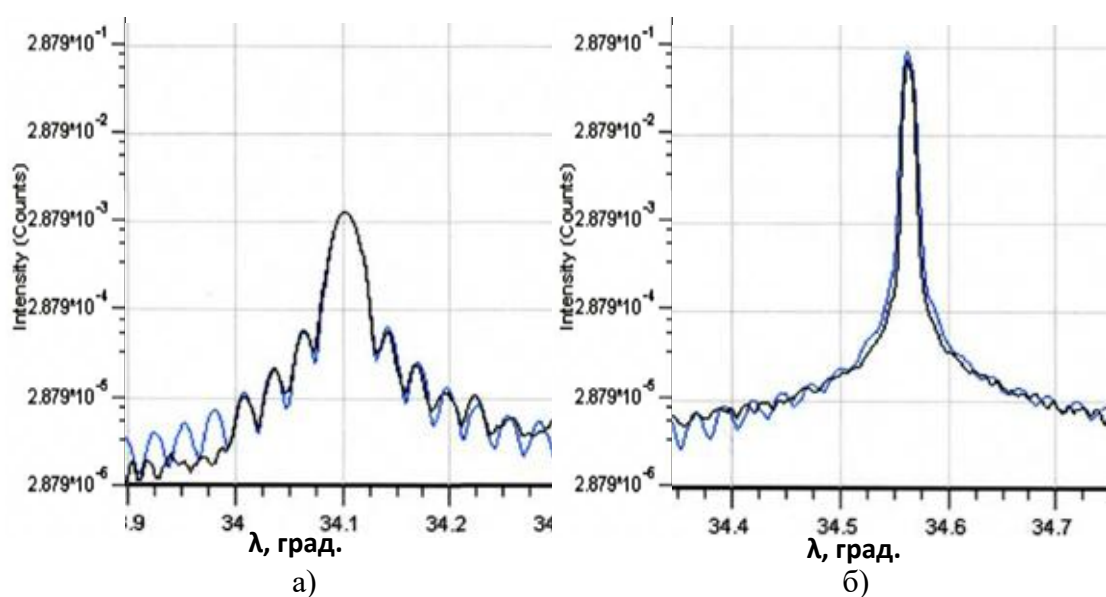


Рисунок 4.4 – Кривые дифракционного отражения для кремниевого слоя без отжига (а) и с отжигом (б)

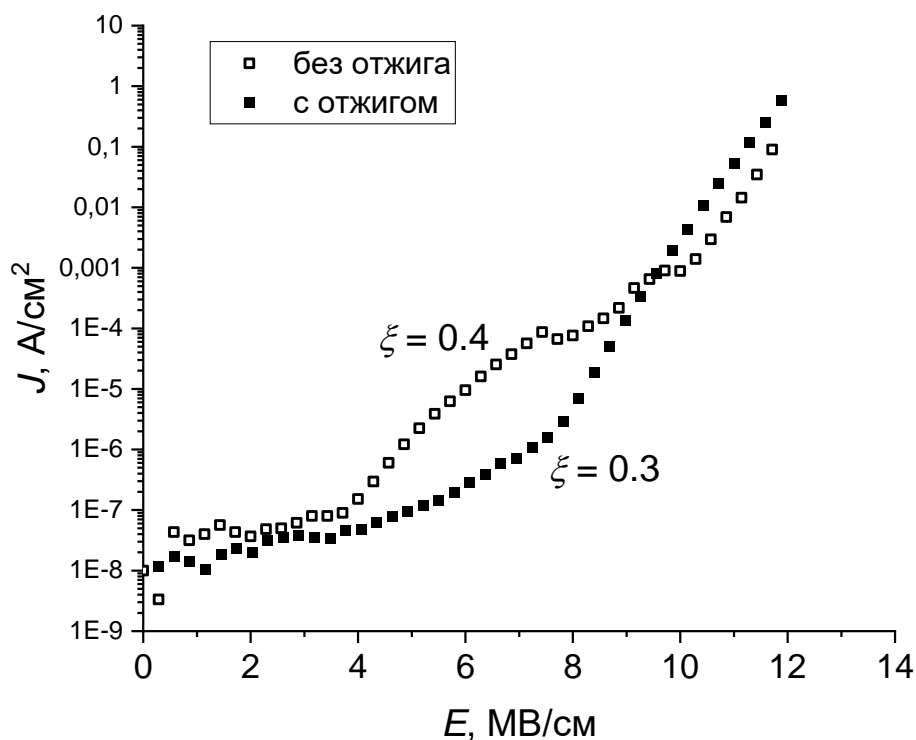


Рисунок 4.5 – ВАХ подзатворного оксида, полученного без предварительного отжига кремниевой подложки и с отжигом, с указанием коэффициента дефектности

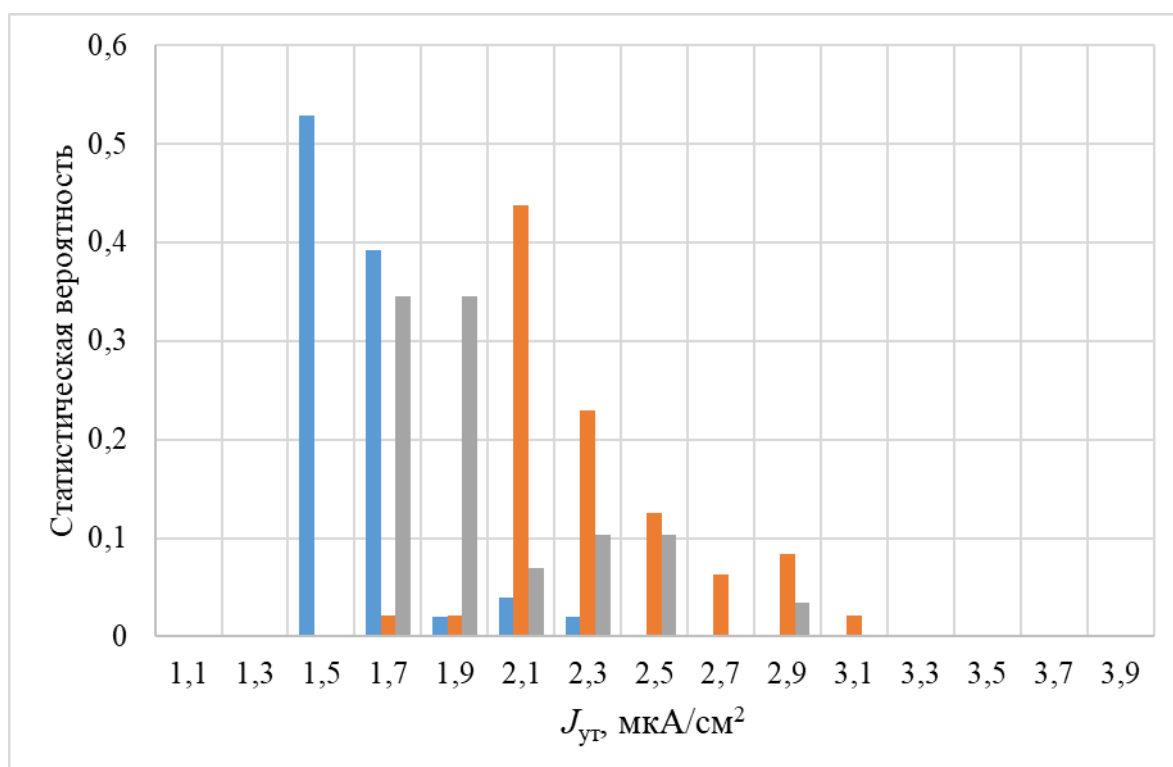


Рисунок 4.6 – Частотное распределение плотности тока утечки для трех пластин в партии

Видно, что разброс  $J_{ут}$  в пределах пластины превышает разброс между пластинами, поэтому было принято решение проводить отбраковку в рабочей партии на уровне кристаллов микросхем.

### 4.3 Отбраковка потенциально не стойких кристаллов микросхем

Были проведены рентгеновские имитационные исследования КМОП ИС на пластинах объемного кремния, на которых предварительно (до облучения) был проведен контроль плотности тока утечки для тестовых конденсаторов на дорожках реза между кристаллами микросхем. На рисунке 4.7 представлена диаграмма рассеяния для плотности тока утечки до облучения и относительного изменения тока потребления микросхем в результате облучения. Была обнаружена линейная корреляция данных величин с коэффициентом корреляции Пирсона  $r \approx 0.84$ .

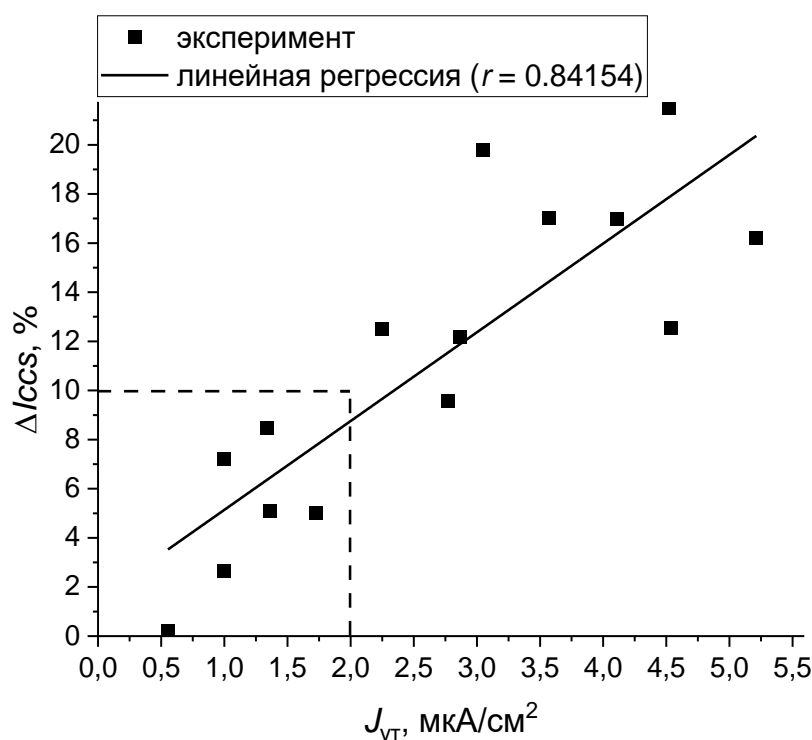


Рисунок 4.7 – Диаграмма рассеяния для изменения статического тока потребления  $\Delta I_{сс}$  КМОП ИС на объемном кремнии в результате облучения и плотности тока утечки подзатворного оксида  $J_{ут}$  до облучения с указанием критериев отбраковки по  $J_{ут}$  и  $\Delta I_{сс}$

На рисунке 4.7 видно, что несмотря на корреляционный характер зависимостей, применение отбраковочного критерия по плотности тока утечки 2 мкА/см<sup>2</sup>, определенного с помощью модели, представленной в главе 3,

позволило примерно в 2 раза увеличить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии с нормой  $\Delta I_{ccs} \leq 10\%$  путем отсека большого числа микросхем с низкой стойкостью. Без введения отбраковки по плотности тока утечки процент стойких чипов в партии составил бы 47%. Введение операции отбраковки привело к тому, что все оставшиеся после отбраковки микросхемы в партии оказались стойкими. В результате затраты на испытания микросхем могут быть значительно снижены.

На рисунке 4.8 представлена карта распределения тока Пула-Френкеля и накопленной дозы выхода из строя КМОП КНИ ИС для пластины КНИ, изготовленной по методу *SIMOX*, а на рисунке 4.9 – соответствующее распределение для пластины, изготовленной по методу *SmartCut*.  $D_{max}$  – максимальный уровень воздействия.

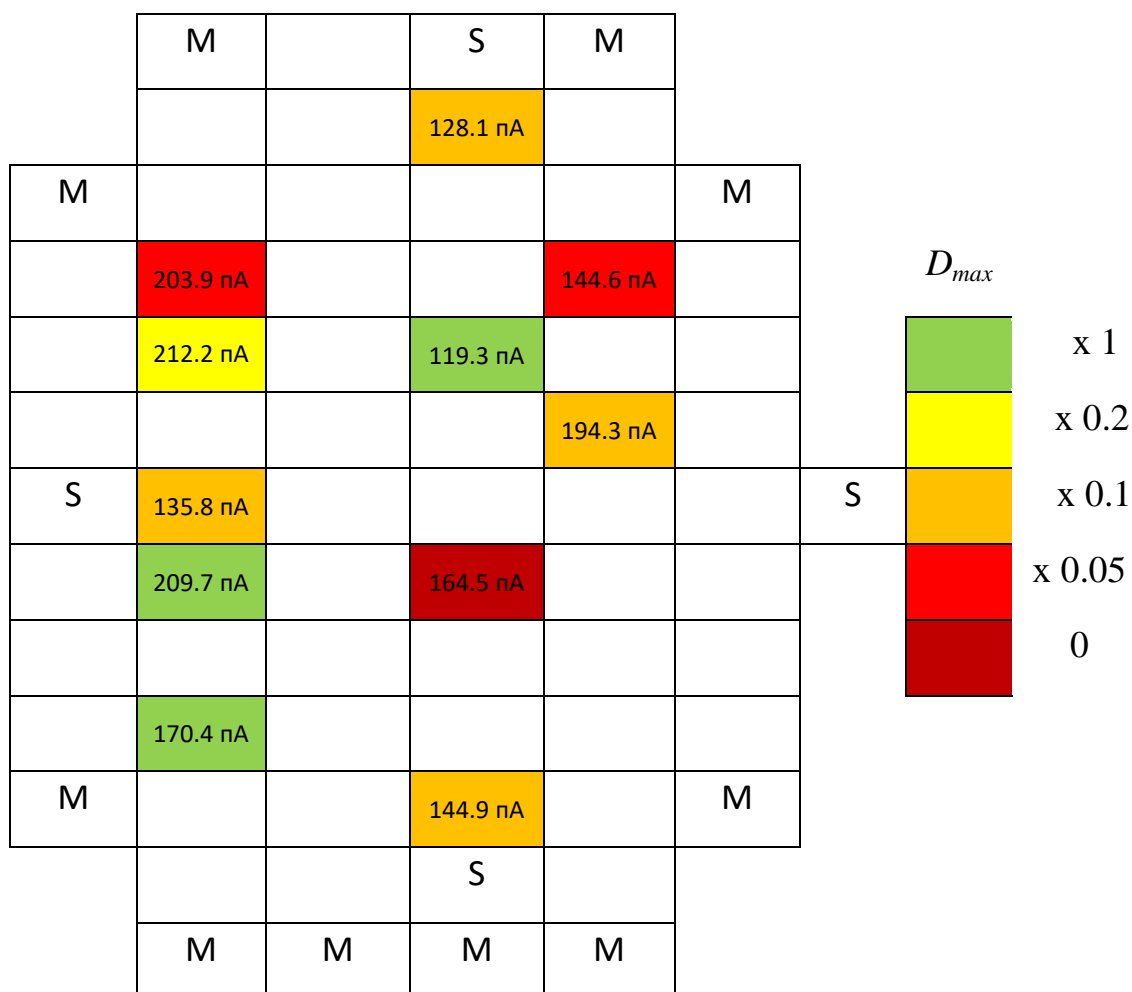


Рисунок 4.8 – Карта распределения радиационной стойкости микросхем и тока Пула-Френкеля тестовых структур для пластины КНИ, изготовленной методом *SIMOX*. Среднее значение плотности тока Пула-Френкеля составило  $1.67 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (при  $E = 3$  МВ/см). Среднеквадратичное отклонение тока 20%

Корреляция тока Пула-Френкеля и дозовой стойкости микросхем в пределах пластины отсутствует (коэффициенты корреляции  $< 0.2$ ). Однако очевидно, что в случае метода *SIMOX* стойкость сильно варьируется по пластине (среднеквадратичное отклонение составило 120 %), а в случае метода *SmartCut* стойкость в пределах пластины характеризуется значительно более равномерным распределением (среднеквадратичное отклонение составило 18 %) [80]. Ток Пула-Френкеля также сильно варьируется по пластине *SIMOX* (среднеквадратичное отклонение равно 20 %), а в случае пластины *SmartCut* варьируется слабо (7 %). При этом большее среднее значение тока для пластины *SIMOX* проявляется в меньшем среднем значении дозы выхода из строя. Коэффициент  $\zeta$  для пластины *SIMOX* составил 2.2 при  $\zeta = 1.5$  для пластины *SmartCut*.

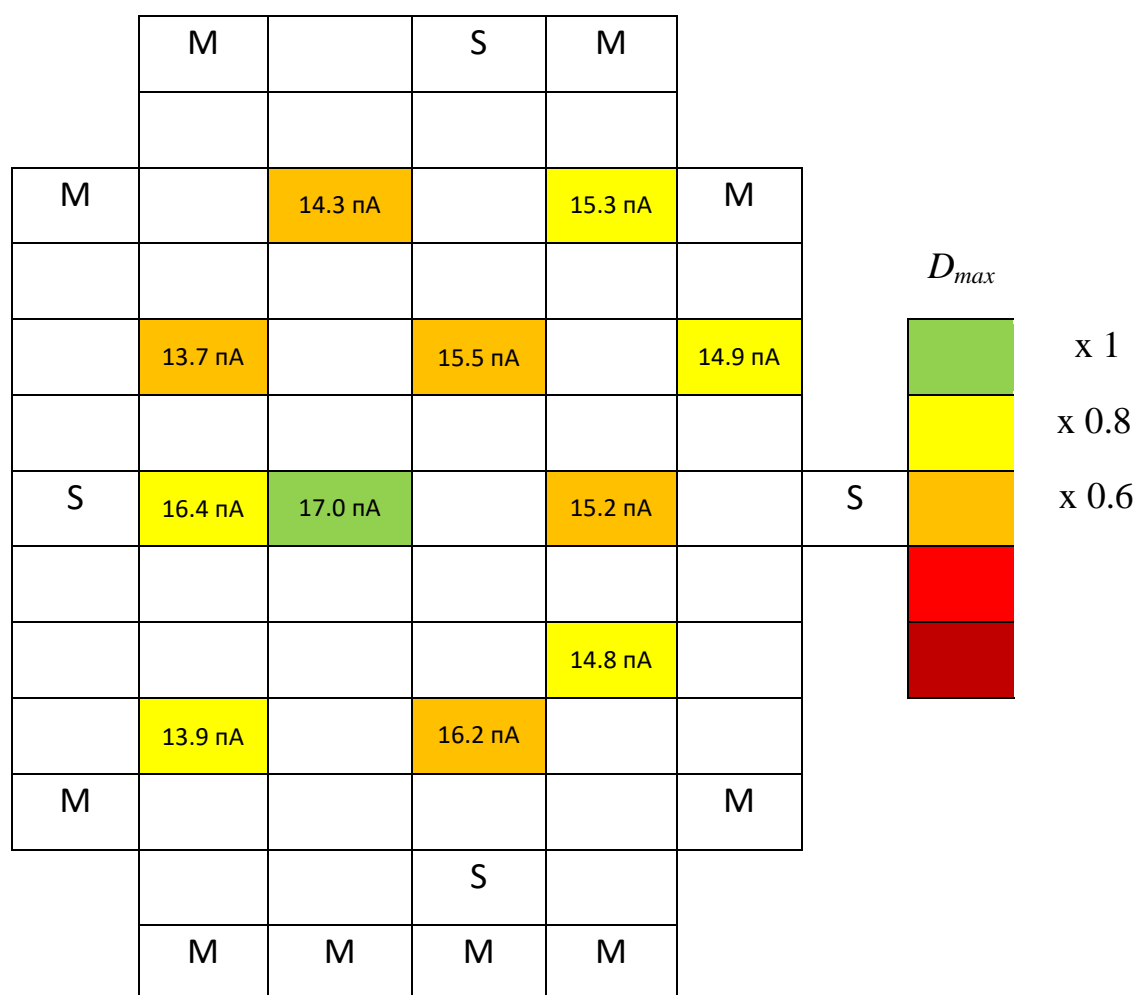


Рисунок 4.9 – Карта распределения радиационной стойкости микросхем и тока Пула-Френкеля тестовых структур для пластины КНИ, изготовленной методом *SmartCut*. Среднее значение плотности тока Пула-Френкеля составило  $0.152 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (при  $E = 3 \text{ МВ/см}$ ). Среднеквадратичное отклонение тока 7 %

Известно, что при ионной имплантации в рамках метода *SIMOX* вследствие загрязнений на поверхности пластины в захороненном оксиде могут присутствовать области с дефицитом кислорода, а значит, с повышенной вероятностью образования кислородных вакансий. Неконтролируемое распределение таких областей приводит к соответствующему разбросу тока Пула-Френкеля и стойкости КМОП КНИ ИС. В случае метода *SmartCut* захороненный оксид получают комбинацией сухого и влажного окисления. В этом случае концентрация кислородных вакансий будет выше, чем при использовании только влажного окисления (поскольку водород и ОН-группы гидролизуют кислородные вакансии), но все же значительно меньше, чем в методе *SIMOX*. Кроме того, равномерность их распределения по площади пластины в случае термического окисления будет значительно выше, чем в результате ионной имплантации, поскольку в последнем случае определяющую роль будет играть неравномерное распределение загрязнений на поверхности пластины.

На рисунке 4.10 представлена диаграмма рассеяния для дозы выхода из строя  $D_{\max}$  КМОП ИС на КНИ и плотности тока утечки  $J_{\text{ут}}$  захороненного оксида с указанием доверительного интервала прогноза. Применение отбраковочной нормы  $J_{\text{ут}}^* = 1 \text{ мкА/см}^2$ , предложенной в главе 3, приведет к забракованию пластин 2 и 3, что позволит обеспечить требуемую стойкость микросхем в партии. Альтернативой забракованию пластин может служить проведение радиационной отбраковки микросхем с целью определения годных кристаллов микросхем с данных пластин, в то время как радиационная отбраковка микросхем с пластины 1 для обеспечения стойкости не требуется. На рисунке 4.11 представлена соответствующая диаграмма рассеяния для КМОП ИС на объемном кремнии, где рассматривается плотность тока утечки подзатворного оксида.



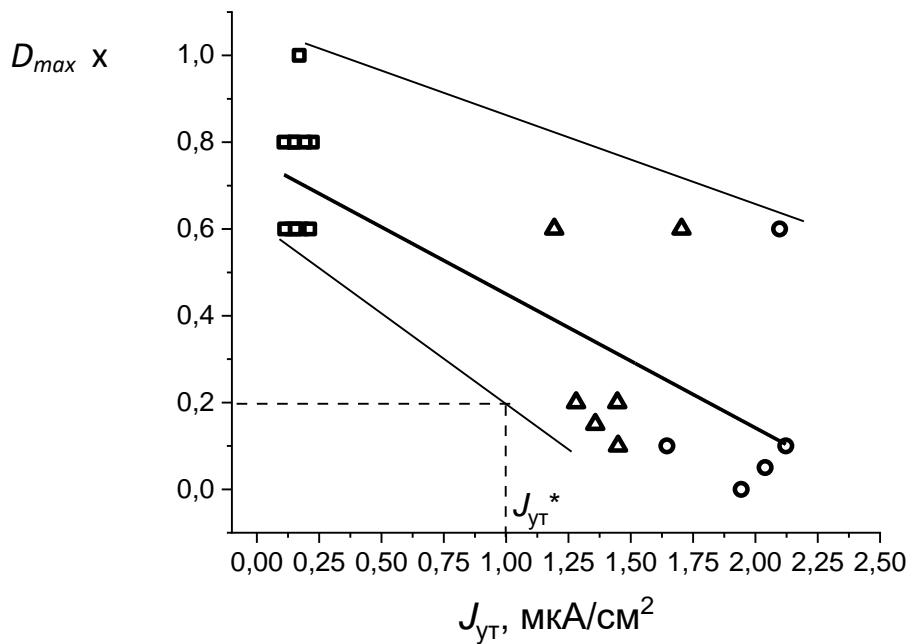


Рисунок 4.10 – Диаграмма рассеяния для дозы выхода из строя КМОП КНИ ИС и плотности тока утечки захороненного оксида до облучения. Значения толщины подзатворного оксида, захороненного оксида составляли 7 и 200 нм соответственно. Пороговое напряжение обратных транзисторов составляло 10 В. Квадратные точки – пластина 1; треугольные точки – пластина 2; круглые точки – пластина 3

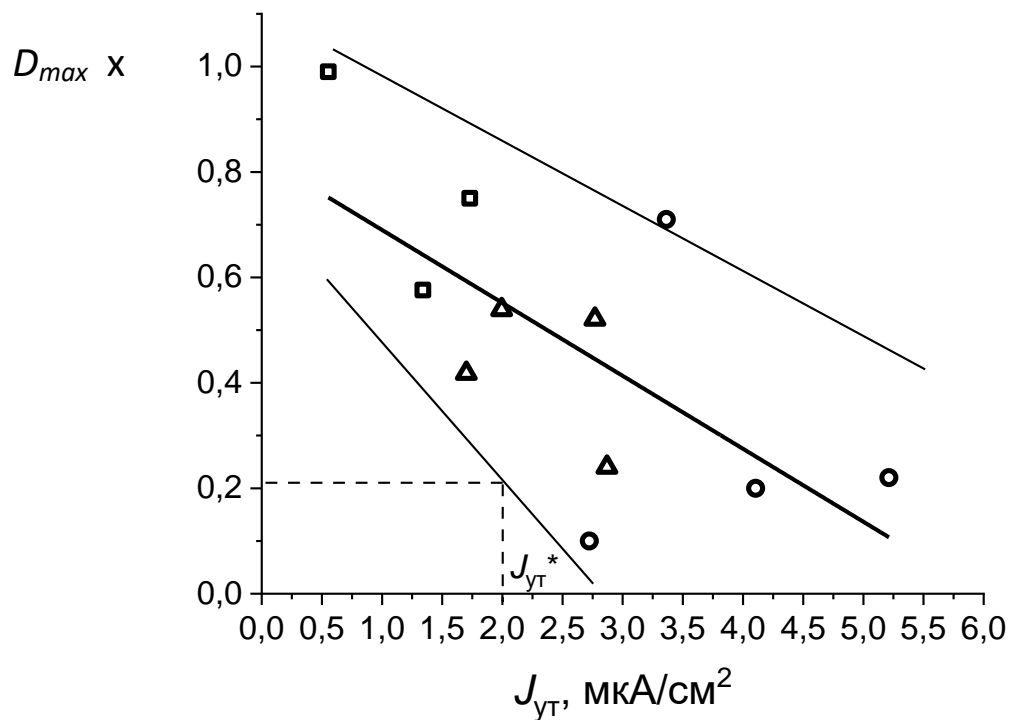


Рисунок 4.11 – Диаграмма рассеяния для дозы выхода из строя КМОП ИС на объемном кремнии и плотности тока утечки подзатворного оксида до облучения. Толщина подзатворного оксида составляла 35 нм

Исчезновение функциональных зависимостей при переходе от рассмотрения МОП-транзисторов (глава 3) к рассмотрению микросхем связано с тем, что на пластинах с кристаллами микросхем наблюдается локальный разброс дефектности слоев диоксида кремния как между кристаллами, так и в пределах

кристалла. На рисунке 4.12 представлена карта распределения плотности тока утечки захороненного оксида исходной структуры КНИ (без тестовых структур и кристаллов микросхем), полученная сканированием с использованием ртутного зонда. Средний градиент плотности тока утечки по пластине составил  $0.13 \text{ мкА/см}^3$ .

Поскольку на пластинах с кристаллами микросхем контролю плотности тока утечки подвергаются тестовые конденсаторы, находящиеся между кристаллами микросхем, локальный разброс неизбежно влияет на результаты прогнозирования. При построении моделей для МОП-транзисторов влияние локального разброса снижалось благодаря тому, что тестовые конденсаторы для контроля дефектности располагались максимально близко к тестовым транзисторам, подвергавшимся исследованию на рентгеновском имитаторе.

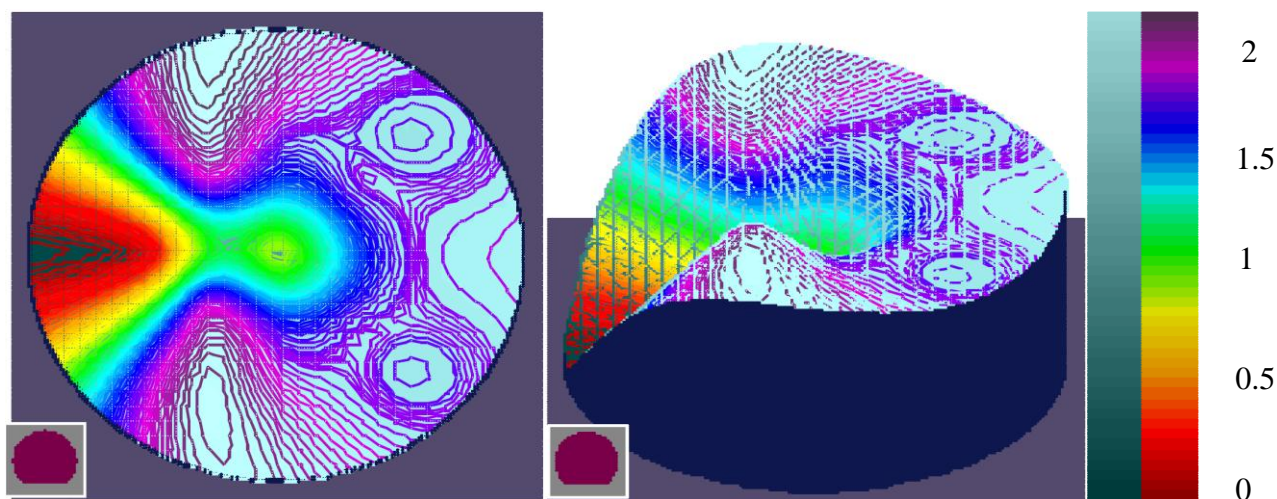


Рисунок 4.12 – Карта плотности тока утечки ( $\text{мкА/см}^2$ ) захороненного оксида структуры КНИ, полученная сканированием с использованием ртутного зонда

Одним из подходов к повышению дозовой радиационной стойкости КМОП КНИ ИС является дополнительное легирование дна р-кармана n-канального транзистора, что позволяет повысить допустимый радиационно-индуцированный сдвиг порогового напряжения обратного паразитного транзистора, образованного структурой КНИ. На рисунке 4.13 показан радиационно-индуцированный сдвиг зависимости статического тока потребления КМОП КНИ ИС от напряжения на подложке.

Используя зависимости на рисунках 3.16-б и 4.10, можно определить минимально необходимое пороговое напряжение паразитного транзистора для обеспечения требуемого уровня стойкости при определенном уровне дефектности захороненного оксида. На рисунке 4.14 представлены профили распределения бора в р-кармане, полученные методом ВИМС, для двух партий КМОП ИС на КНИ с захороненным оксидом разного уровня дефектности, но удовлетворяющих уровню стойкости.

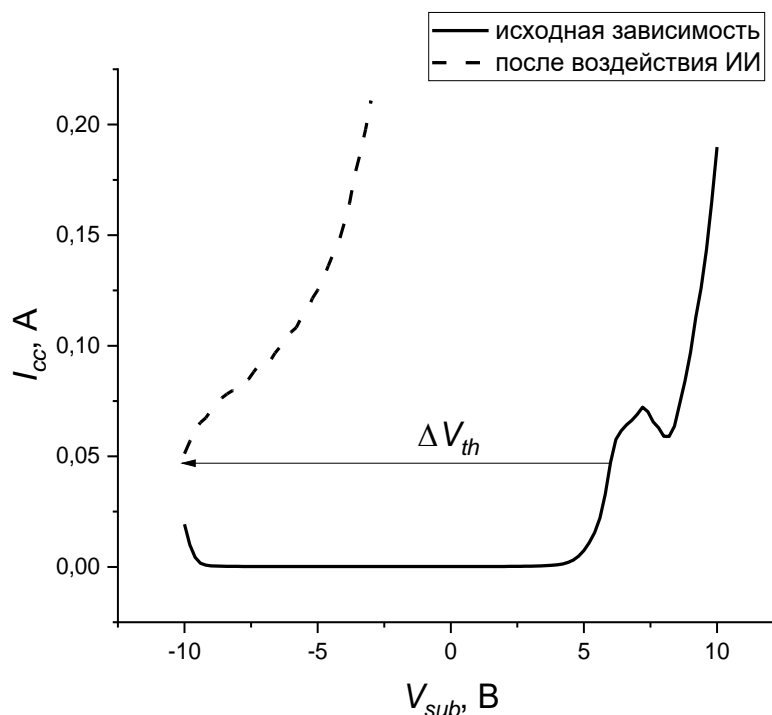


Рисунок 4.13 – Зависимости тока потребления КМОП КНИС ИС от напряжения на подложке для наименее стойкого из исследованных образцов до и после облучения

Таким образом, совокупность значений  $J_{ут}$  и  $V_{thобр}$  будет являться критерием, который отражает дозовую стойкость партии КМОП КНИ ИС и может использоваться для определения необходимости проведения радиационной отбраковки микросхем в партии. В рамках настоящей работы была разработана и внедрена в производство технологическая инструкция, применяемая для прогнозирования дозовой радиационной стойкости ИС с проектными нормами 0.35 мкм, изготовленных в режиме «фаундри», с целью определения необходимости проведения радиационной отбраковки в рамках партии микросхем.

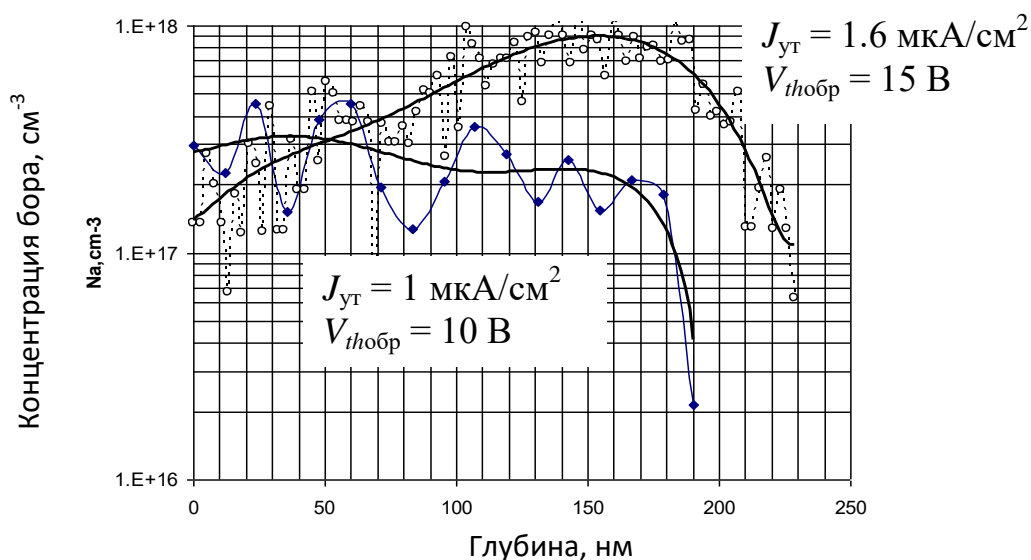


Рисунок 4.14 – Профили распределения бора по глубине р-канальных транзисторов, полученные методом ВИМС, для двух партий КМОП ИС на КНИ с захороненным оксидом разного уровня дефектности, но удовлетворяющих уровню стойкости

#### Выводы по главе 4

- 1) Описана методика оценки дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на рентгеновском имитаторе.
- 2) Предложен 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.
- 3) Представлены результаты применения разработанного алгоритма на практике.
- 4) Внедрение отжига кремниевой подложки перед выращиванием подзатворного оксида позволило снизить коэффициент дефектности слоя  $\text{SiO}_2$  с 0.4 до 0.3, что нашло косвенное подтверждение в результатах рентгеновской дифрактометрии.
- 5) Исследование разброса плотности тока утечки в партии показало, что разброс в пределах пластины превышает разброс между пластинами и изменение плотности тока утечки по пластине является достаточно плавным. Это дало возможность внедрить операцию контроля плотности тока утечки для отбраковки

потенциально не стойких микросхем на тестовых структурах, расположенных на дорожках реза между чипами.

6) 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.

7) 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.

8) Применение отбраковочного критерия по плотности тока утечки  $2 \text{ мкА/см}^2$  позволило примерно в 2 раза увеличить выход годных радиационно-стойких микросхем в партии с нормой  $\Delta I_{\text{ссс}} \leq 10 \%$  за счет отбраковки чипов с потенциально низкой стойкостью. Без введения отбраковки по плотности тока утечки процент стойких чипов 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.

## Заключение

В результате выполнения диссертационной работы были сформулированы следующие основные 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. – 2003. – P. 4955-4978.
2. Schwank, J. R. Radiation effects in MOS oxides / J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, D. M. Fleetwood, J. A. Felix, P. E. Dodd, Ph. Paillet, V. Ferlet-Cavrois // *IEEE Transactions On Nuclear Science*. – 2008. – V. 55, N. 4.
3. Никифоров А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 1994. – 164 с.
4. Colinge J.-P. Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI, 2-nd edition / Springer science + Business media, 1997.
5. Барабан А.П., Булавинов В.В., Конов П.П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии / Л.: Издательство Ленинградского университета. 1988. 304 с.
6. Перевощиков В.А., Скупов В.Д. Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках. Монография. Часть I. Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. – 2002. – 220 с.
7. Sah, C.T. Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation / C.T. Sah // *IEEE Transactions on nuclear science*. – 1976. – V. NS-23, N. 6. – P.1563-1568.
8. Revesz, A.G. Chemical and structural aspects of the irradiation behavior of SiO<sub>2</sub> films on silicon / A.G. Revesz // *IEEE Transactions on nuclear science*. – 1977. – V. NS-24, N. 6. – P. 2102-2107.
9. Таперо К.И. и др. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. Москва. 2009.
10. Devine, R.A.V. The structure of SiO<sub>2</sub>, its defects and radiation hardness / R.A.V. Devine // *IEEE Transactions on nuclear science*. – 1994. – V. 41, No. 3. – P. 452-459.
11. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
12. Lenahan, P.M. A model of hole trapping in SiO<sub>2</sub> films on silicon / P.M. Lenahan, J.F. Conley, B.D. Wallace // *J. Appl. Phys.* – 1997. – 81(10). – P. 6822-6824.



13. Pantelides, S.T. The E'-center and oxygen vacancies in SiO<sub>2</sub> / 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.
14. Tsong, I.S.T. Hydrogen and chlorine detection at the SiO<sub>2</sub>/Si interface / I.S.T., et al. // Nuclear instruments and methods in physics research. – 1981. – V. 191, I. 1-3. – P. 91-95.
15. Пирс К. и др. Технология СБИС: в 2-х книгах под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
16. Dong Han. Impurity doping in SiO<sub>2</sub>: formation energies and defect levels from first-principles calculations / Dong Han, et al. // Physical review B. – 2010. – 82, 155132.
17. Орлов А.М., Костишко Б.М., Скворцов А.А. Физические основы технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – Ульяновск: УлГУ, 2014. – 423 с.
18. Lenahan, P.M. What can electron paramagnetic resonance tell us about the Si/SiO<sub>2</sub> system? / P.M. Lenahan, J. F. Conley // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1998. - 16.4. – P. 2134-2153.
19. Гуськова, О.П. Расчеты электронной структуры диоксида кремния, модифицированного фтором / О.П. Гуськова, В.М. Воротынцев, М.А. Фаддеев, Е.Л. Шоболов, Н.Д. Абросимова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 1(1). – С. 43-47.
20. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 254 с.
21. Schroder D.K. Semiconductor material and device characterization / John Wiley & Sons // 2006.
22. Stahlbush, R.E. Electron and hole trapping in the buried oxide of Unibond wafers / R.E. Stahlbush // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. - 44(6). – P. 2106-2114.
23. Гуськова, О.П. 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(60). – С. 28-32.
24. Николаев, Д.В. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границе структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и  $\gamma$ -квантами / Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова // ФТП. – 2003. – 37(4). – С. 443-449.
25. Liu, S.T. Total dose radiation hard 0.35  $\mu\text{m}$  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.
26. Блюменфельд, Л.А. Электронный парамагнитный резонанс / Л.А. Блюменфельд, А.Н. Тихонов // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 9. – С. 91-99.
27. Herve, D. Comparative study of radiation induced electrical and spin active defects in buried  $\text{SiO}_2$  layers / D. Herve, J.L. Leray, R.A.V. Devine // J. Appl. Phys. – 1992. – N. 72. – P. 3634.
28. 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.
29. Милнс, А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / Издательство Мир, Москва, 1977.
30. Fleetwood, D.M. Thermally stimulated current in  $\text{SiO}_2$  / D.M. Fleetwood, et al. // Microelectronics reliability. – 1999. – V. 39, I. 9. – P. 1323-1336.
31. Tadjer, M.J. Spatial Localization of Carrier Traps in 4H-SiC MOSFET Devices Using Thermally Stimulated Current / M.J. Tadjer, et al. // Journal of ELECTRONIC MATERIALS. – 2010. – V. 39, N. 5.
32. Christen, T. The effect of injection properties of contacts on the dynamics of unipolar space-charge limited currents / T. Christen // IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation. – 2016. – V. 23, I. 6. – P. 3712-3724.
33. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. – М.: Мир, 1984.

34. Ламперт, М. Инжекционные токи в твердых телах / М. Ламперт, П. Марк. – М.: Мир, 1973. – 416 с.
35. Mrstik, B.J. Relationship between oxide density and charge trapping in SiO<sub>2</sub> films / B.J. Mrstik, et al. // Journal of Applied Physics. – 1999. – N. 85. – P. 6577.
36. Conley, J. F. Molecular Hydrogen, E'-Center Hole Traps, and Radiation Induced Interface Traps in MOS Devices / J.F. Conley, P. M. Lenahan // IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. – V. 40, N. 6.
37. Jargis, A.J. The electrical conduction process and trapping studies in SiO<sub>2</sub> films / A.J. Jargis, et al. // Tikrit Journal of pure science. – 2012. – N. 17(2).
38. Muhsien, M.A. Current transport in SiO<sub>2</sub> films grown by thermal oxidation for metal-oxide semiconductor / M.A. Muhsien, et al. // International research journal of engineering science. – 2012. – V. 1(2). – P. 25-32.
39. Lenzlinger, M. Fowler-Nordheim Tunneling into Thermally Grown SiO<sub>2</sub> / M. Lenzlinger, E. H. Snow // J. Appl. Phys. – 1969. – N. 40, P. 278.
40. Knoll, M. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures / M. knoll, D. Braunig, W. R. Fahrner // Journal of Applied Physics. – 1982. – N. 53. – P. 6946.
41. Park, J. Numerical analysis on effective mass and traps density dependence of electrical characteristics of a-IGZO thin-film transistors / J. Park, et al. // Electronics. – 2020. – N. 9(1). – P. 119.
42. Engel-Herbert, R. Comparison of methods to quantify interface trap densities at dielectric/III-V semiconductor interfaces / R. Engel-Herbert, et al. // JAP. – 2010. – N. 108. – P. 124101.
43. Епифанов, Г.И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Советское радио, 1971. – 376 с.
44. Трофимова, Т.И. Курс физики / Москва. Высшая школа, 2001.
45. Aitken, J.M. Avalanche injection of holes into SiO<sub>2</sub> / J.M. Aitken, D. R. Young // IEEE Transactions on nuclear science. – 1977. – V. NS-24, N.6, P. 2128-2134.
46. Nagai, K. Carrier Injection into SiO<sub>2</sub> from Si Surface Driven to Avalanche Breakdown by a Linear Ramp Pulse, and Trapping, Distribution and Thermal Annealing

- of Injected Holes in SiO<sub>2</sub> / K. Nagai, et al. // Japanese journal of applied physics. – 1975. – V. 14, N. 10. – P. 1539-1545.
47. Ghetti, A. Gate oxide reliability: physical and computational models / DOI: 10.1007/978-3-662-09432-7\_6.
48. Chiu, F.-C. A review on conduction mechanisms in dielectric films / F.-C. Chiu // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 2014. – P. 578168.
49. Schroder, D.K. Semiconductor material and device characterization / John Wiley & Sons // 2006.
50. Chou, N.J. DC conduction in SiO<sub>2</sub> films at elevated temperatures / N.J. Chou // Journal of electronic materials. – 1972. – V. 1, I. 2. – P. 344-349.
51. Srivastava, J.K. Electrical conductivity of silicon dioxide thermally grown on silicon / J.K. Srivastava, et al. // J. Electrochem. Soc.: Solid-state science and technology. – 1985. – V. 132, N. 4. – P. 955-963.
52. Snow, E.H. Ion Transport Phenomena in Insulating Films / E.H. Snow, A. S. Grove, B. E. Deal, C. T. Sah // Journal of Applied Physics. – 1965. – N. 36. – P. 1664.
53. Kuhn, M. Ionic Contamination and Transport of Mobile Ions in MOS Structures / M. Kuhn, D. J. Silversmith // J. Electrochem. Soc.: SOLID STATE SCIENCE. – 1971. – V. 118, N.6. – P. 966-970.
54. Fujii, M. Hopping conduction in SiO<sub>2</sub> films containing C, Si and Ge clusters / M. Fujii, et al. / Appl. Phys. Lett. – 1996. – N. 68. – P. 3749.
55. Harrell, W.R. Observation of Poole-Frenkel effect saturation in SiO<sub>2</sub> and other insulating films / W.R. Harrell, J. Frey // Thin Solid Films. – 1999. – N. 352. – P. 195-204.
56. Gupta S.K. Experimental analysis of current conduction through thermally grown SiO<sub>2</sub> on thick epitaxial 4H-SiC employing Poole-Frenkel mechanism / S.K Gupta, A. Azam, J. Akhtar // Pramana - J Phys. – 2010. – V. **74**(2). – P. 325-330.
57. Scarpa, A. On the correlation between SILC and hole fluence through the oxide / A. Scarpa, et al. // Microelectron. Reliab. – 1999. – N. 39. – P. 197-202.

58. Cheng, X.R. Nitridationenhanced conductivity behavior and current transport mechanism in thin thermally nitrated  $\text{SiO}_2$  / X.R. Cheng, Y. C. Cheng, B. Y. Liu // *Journal of Applied Physics*. – 1988. – N. 63. – P. 797.
59. Nishino, H. Analysis of Leakage Current in  $\text{Cu/SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$  Capacitors under Bias-Temperature Stress / H. Nishino, et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2003. – V. 42. – P. 6384-6389.
60. 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.
61. Ширяев, А.А. Механизмы электропроводности захороненного оксида структур кремний-на-изоляторе / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов, С.И. Суродин // *XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) : материалы докладов. Том I. – Княгинино: НГИЭУ, 2018. – С. 113-114.*
62. 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.
63. Ширяев, А.А. Исследование и разработка методов контроля параметров гетероструктур КНИ, влияющих на стойкость СБИС к внешним воздействиям / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, О.П. Гуськова, В.А. Герасимов // *Молодежь в науке: сборник докладов 13-й научно-технической конференции*. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – С. 523-526.
64. Ширяев, А.А. Исследование дырочных ловушек в захороненном оксиде структур кремний-на-изоляторе методами на основе эффекта Пула-Френкеля и инжекции носителей заряда / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов, С.И. Суродин // *«Молодежь в науке». Сборник докладов 17-й научно-технической конференции*. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – С. 433-436.

65. Ширяев, А.А. Исследование и разработка методов контроля параметров гетероструктур КНИ, влияющих на стойкость СБИС к внешним воздействиям / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, О.П. Гуськова и др. // Будущее технической науки: тез. докл. XIII Междунар. Молодеж. Научно-техн. конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – С. 19.
66. Ширяев, А.А. Методы экспериментального исследования дырочных ловушек в захороненном оксиде структур «кремний на изоляторе» / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов // XXI Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки : материалы докладов. – Княгинино: НГИЭУ, 2016. – С. 105.
67. 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.
68. Гриценко, В.А. Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния / В.А. Гриценко // УФН. – 2008. – Т. 178, № 7. – С. 727-737.
69. Ширяев, А.А. Оценка дефектности слоев термического диоксида кремния при изготовлении интегральных микросхем на основании анализа вольт-амперных характеристик тестовых структур / А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов // Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе: сборник материалов XV научно-технической конференции молодых специалистов Росатома [Электронный ресурс]. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2021 – С. 102 – 107.
70. Senzaki, J. Correlation between reliability of thermal oxides and dislocations in n-type 4H-SiC epitaxial wafers / J. Senzaki, et al. // Appl. Phys. Lett. – 2006. – N. 89, 022909.
71. Tanimoto, S. Impact of dislocations on gate oxide in SiC MOS devices and high reliability ONO dielectrics / S. Tanimoto // Materials science forum. – 2006. – 527-529: 955-960.

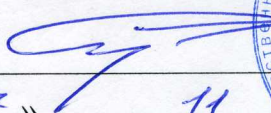
72. Satoh, Y. Degradation of dielectric breakdown field of thermal SiO<sub>2</sub> films due to structural defects in Czochralski silicon substrates / Y. Satoh, et al. // JAP. – 1996. N. 79. – P. 7944.
73. Jaeger, R.C. Thermal oxidation of silicon / R.C. Jaeger // Introduction to microelectronic fabrication. – 2001. – ISBN 978-0-201-44494-0.
74. 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.
75. Ширяев, А.А. Применение эффекта Пула-Френкеля и инъекции носителей заряда для исследования дефектности захороненного оксида структур кремний-на-изоляторе / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов, С.И. Суродин // ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Сборник докладов X семинара «Современные методы исследования и моделирования материалов». – Москва, 2018 г. – С. 50-55.
76. Ширяев, А.А. Исследование инъекции носителей заряда в подзатворный диоксид кремния при термополевой обработке МОП-транзисторов / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов, С.И. Суродин // 24 Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные математические науки): материалы докладов. – Нижний Новгород: НРЛ, 2019. – С. 194.
77. Verweij, J.F. Dielectric breakdown I: A review of oxide breakdown / J.F. Verweij, J.H. Klootwijk // Microelectronics Journal. – 1996. – N. 27. – P. 611-622.
78. Ширяев, А.А. Моделирование дозовой радиационной стойкости МОП-транзисторов на основе результатов контроля тока утечки подзатворного оксида / А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов // Датчики и системы. – 2023. – № 5. – С. 49-52.
79. 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.


80. Ширяев, А.А. Исследование распределения по площади пластины параметров структур «кремний на изоляторе», влияющих на стойкость СБИС к внешним воздействующим факторам / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, О.П. Гуськова, В.А. Герасимов // Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: Материалы докладов. – Н. Новгород, 2015. – С. 150.



## УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ –  
директор филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ  
«НИИИС им. Ю.Е. Седакова», д.т.н., профессор

  
« 07 » 11 2022 г.  
А.Ю. Седаков



## АКТ

внедрения в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» результатов диссертации Ширяева А.А. «Прогнозирование дозовой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе анализа вольт-амперных характеристик слоев диоксида кремния», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Комиссия, созданная приказом первого заместителя директора РФЯЦ-ВНИИЭФ – директора филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им.Ю.Е. Седакова» от 26.10.2022 № 195-95/1282-П в составе:

председатель

комиссии:

заместитель начальника МВЦ – начальник

научно-производственного отделения, к.т.н. Агарков И.М.;

члены комиссии:

начальник научно-исследовательского технологического

отдела, к.ф.-м.н. Шоболов Е.Л.,

начальник производственно-технологического отдела,

к.х.н. Сазонов А.А.,

начальник научно-исследовательской технологической

группы, к.т.н. Герасимов В.А.,

рассмотрев диссертацию Ширяева А.А. констатирует, что ее основные результаты использованы в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им.Ю.Е.Седакова» в НИР при разработке методов прогнозирования радиационной стойкости КМОП-микросхем, в ОКР при разработке технологических процессов изготовления микросхем с повышенной надежностью и радиационной стойкостью, а также при анализе причин брака микросхем. А именно, использованы следующие результаты:

1. Установленные автором в главах 3 и 4 зависимости параметров, характеризующих дозовую радиационную стойкость КМОП-микросхем на структурах кремний-на-изоляторе, от параметров дефектности слоя захороненного диоксида кремния реализованы в технологической инструкции ТИп-699 «Контроль порогового напряжения обратных транзисторов «металл-оксид-полупроводник» на основе гетероструктур «кремний на изоляторе», предназначенной для прогнозирования дозовой радиационной стойкости микросхем, изготавливаемых в режиме фаундри, посредством контроля порогового напряжения паразитных транзисторов.

2. Метод диагностики слоев диоксида кремния, разработанный в главе 2, применяется при определении причин повышенных токов утечки подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов в рамках анализа причин брака микросхем и разработки технологических решений, направленных на повышение надежности и радиационной стойкости микросхем.

Экономический эффект от внедрения результатов кандидатской диссертации Ширяева А.А. заключается в уменьшении трудоемкости работ по исследованию надежности и стойкости к ВВФ элементов ИС в рамках ОКР на 15 % (Приложение 1).

Председатель комиссии:



И.М. Агарков

Члены комиссии:



Е.Л. Шоболов



А.А. Сазонов



В.А. Герасимов

Уменьшение трудоемкости исследовательских работ  
в результате внедрения результатов диссертации

Тема	Работа	План на 2022 г., н/час *	Фактическая трудоемкость, н/час
ОКР по разработке технологических процессов изготовления микросхем с повышенной надежностью и радиационной стойкостью	Измерение электропараметров тестовых элементов и исследование пластин с тестовыми кристаллами на надежность и стойкость к ВВФ	1000	900
	Экстракция SPICE- параметров элементов с учетом ВВФ	740	600
Итого		1740	1500

\* Приведена плановая трудоемкость из типовой сетевой модели

Уменьшение трудоемкости составило:

$(1740 - 1500) \text{ н/час} = 240 \text{ н/час}$  (240 тыс. руб.)

$(1740 - 1500) / 1740 * 100 (\%) \approx 15 \%$ .

Председатель комиссии:



И.М. Агарков

Члены комиссии:



Е.Л. Шоболов



А.А. Сазонов



В.А. Герасимов