

**Протопопов Григорий Александрович**

**Устойчивость атомарной структуры оксида  
кремния после радиационно-термической  
обработки МОП приборов**

05.27.01. – твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых  
эффектах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:

Москва - 2011

# 1. Общая характеристика работы

## 1.1 Состояние проблемы

Одним из методов отбраковки интегральных микросхем (ИМС) с аномально пониженной надежностью и стойкостью к воздействию ионизирующего излучения является метод радиационно-термической обработки (РТО), суть которого заключается в облучении ИМС ионизирующим излучением и последующей термообработке. При облучении выявляются образцы с низкой радиационной стойкостью. При последующей термообработке выявляются ненадежные образцы, которые либо не восстановили свои параметры, либо отказали при повышенной температуре.

Такая технология является ресурсосберегающей, легко контролируема, воспроизводима, полностью совместима со стандартной технологией изготовления ИМС и при корректном выборе режимов не вносит в материалы дефекты или загрязнения, негативно влияющие на рабочие характеристики изделий.

Исследования, проведенные ранее Ладыгиным Е.А. (НИТУ «МИСиС») и Поповым В.Д. (НИЯУ «МИФИ»), показывают, что метод позволяет не только отбраковывать на пластинах потенциально ненадежные кристаллы ИМС, но и может обеспечить повышение надежности кристаллов, выдержавших эту процедуру, а также оказывает положительное корректирующее воздействие на существенные параметры изделий, в частности – на время выборки БИС ОЗУ. Кроме того, РТО может повысить крутизну сток-затворных характеристик при сохранении напряжений смыкания сток-исток, увеличить запас по радиационной стойкости для элементов БИС. Радиационная обработка быстрыми электронами и последующий термический отжиг тиристорных структур позволяет увеличить быстродействие структур, снизить потери электроэнергии при выключении тиристорных ключей, увеличить область их безопасной работы. Проведение РТО транзисторных структур позволяет повысить стойкость транзисторных структур к статическому и импульсному излучению, улучшить электропрочность транзисторных структур, повысить пробивные напряжения эмиттерного и коллекторного переходов. РТО составных силовых транзисторов позволяет обеспечить производство транзисторов с наилучшим сочетанием динамических и статических параметров и повышенной радиационной стойкостью.

В основе эффекта повышения стойкости к воздействию ИИ и улучшения характеристик ИМС после РТО лежат процессы образования дефектов, их эволюции и устранения в системе  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ . Но вопрос о причинах возникновения подобного эффекта остается открытым.

Пленка оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) является неотъемлемым компонентом всех планарных полупроводниковых приборов и ИМС на их основе. Качество оксидной пленки в значительной степени определяет надежность и стойкость планарных приборов и ИМС к воздействию ИИ. Особенно сильно дефектность пленки  $\text{SiO}_2$  проявляется в МОП-приборах и в МОП ИМС, так

как атомарная структура пленки  $\text{SiO}_2$  наиболее чувствительна к воздействию излучения. В настоящее время в работах Гриценко В.А (Институт физики полупроводников СО РАН) и Репниковой Е.А. (ПГУ) изучена структура пленок оксида кремния и влияние ионизирующего излучения (ИИ) и термообработки на атомарную структуру пленок оксида кремния. При облучении МОП структуры образуются дефекты в объеме оксида кремния (в виде разорванных валентных связей Si-O) и на границе раздела, причем концентрации дефектов в объеме и на границе раздела коррелируют между собой. Также, как показали исследования Линника Л.Н. (ФГУП НПП «Пульсар») и других, при облучении имеет место релаксация механических напряжений, возникающих при изготовлении МОП структуры вследствие различия коэффициентов линейного расширения материалов кремния и оксида кремния. При термообработке часть разорванных валентных связей восстанавливается.

Хорошо известно, что чувствительность твердого тела к радиационным воздействиям определяется особенностями его дефектной структуры, причем, чем стабильнее структура, тем больше ее стойкость к воздействию внешних факторов. Стабильность любой системы определяется ее термодинамическими характеристиками. При воздействии ионизирующего излучения образуются дефекты, что создает условия для перехода атомарной структуры в новое состояние, последующая термообработка переводит ее в новое равновесное состояние. Однако физико-математического описания происходящих с атомарной структурой оксида кремния в МОП приборах процессов при РТО с термодинамической точки зрения и доказательства того, что атомарная структура оксида кремния переходит в более стабильное состояние, ранее проведено не было.

## 1.2 Актуальность работы

С ростом степени интеграции в МОП транзисторе дефекты в объеме подзатворного оксида кремния утрачивают свою первостепенную роль, так как толщина подзатворного диэлектрика уменьшается, следовательно накапливаемый в нем заряд при облучении мал. Кроме того, заряд, накапливаемый в подзатворном диэлектрике, располагается на расстоянии нескольких нанометров от границы раздела. При уменьшении толщины диэлектрика эффект накопления заряда практически исчезает. Однако при толщине диэлектрика более 0,1 мкм эффект повышения стойкости к воздействию ИИ и улучшения характеристик МОП ИМС после РТО проявляется. Следует также учитывать, что микросхемы с передовым уровнем технологии изготовления используются в гораздо меньшей степени, чем ИМС предыдущих уровней технологии изготовления. Эффект накопления заряда проявляется также в КМОП ИМС с «плавающим» затвором (используемое в флеш-памяти), где толстый подзатворный диэлектрик необходим для записи информации.

Заряд, определяющий утечки в паразитных МОП структурах, накапливается в пассивирующем окисле, который имеет большую толщину.

Утечки являются одной из основных причин выхода из строя ИМС с высокой степенью интеграции.

Таким образом, метод РТО может быть эффективным как для ИМС старых технологий, при этом процесс образования радиационных дефектов и их эволюции при РТО происходит главным образом в подзатворном диэлектрике, так и для ИМС современных технологий, в которых определяющую роль в радиационных процессах играет толстый диэлектрик паразитных изолирующих структур.

### 1.3 Цель диссертации и задачи исследования

Целью данной работы является повышение стойкости МОП транзисторов и МОП микросхем к воздействию ИИ путем применения радиационно-термической обработки в процессе их изготовления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение экспериментальных исследований тестовых МОП структур на воздействие ИИ и термообработки.
2. Разработка физико-математической модели процессов РТО с использованием термодинамических характеристик.
3. Определение связи между структурными и термодинамическими характеристиками атомарной структуры оксида кремния.
4. Определение выражений и численных значений параметров физико-математической модели процессов РТО.
5. Разработка методики проведения РТО МОП ИМС с оптимизированными параметрами режима.

### 1.4 Научная новизна диссертации

1. Разработана оригинальная физико-математическая модель процессов, происходящих с атомарной структурой оксида кремния в МОП приборах при РТО, построенная с позиций термодинамики, дающая новый критерий выбора рациональных режимов РТО – минимум свободной энергии атомарной структуры оксида кремния.

2. Установлены аналитические соотношения между структурными и термодинамическими характеристиками атомарной структуры оксида кремния, позволяющие определить количественное значение изменения свободной энергии атомарной структуры оксида кремния.

3. Установлено, что атомарная структура оксида кремния переходит в более устойчивое термодинамическое состояние после РТО.

4. Разработана методика проведения РТО МОП ИМС с оптимизированными параметрами режима.

### 1.5 Практическая ценность

1. Разработанная физико-математическая модель и полученные аналитические соотношения дают критерий для выбора рациональных режимов РТО – минимум свободной энергии атомарной структуры оксида кремния, позволяют объяснить эффект повышения стойкости МОП ИМС к

ИИ после РТО и повысить эффективность применения метода РТО в зависимости от параметров облучения и термообработки.

2. Разработанная методика проведения РТО МОП ИМС позволяет улучшать параметры стойкости МОП ИМС к воздействию ИИ в 1,5-2 раза.

### 1.5 Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований тестовых МОП структур на воздействие ИИ и термообработки, подтверждающие, что при облучении происходит разупорядочивание МОП структуры, а при термообработке – ее упорядочивание.

2. Физико-математическая модель процессов, происходящих с атомарной структурой оксида кремния в МОП приборах при РТО, построенная с позиций термодинамики.

3. Результаты анализа атомарной структуры оксида кремния, показывающие, что она переходит в более устойчивое состояние после РТО.

4. Методика проведения РТО МОП ИМС с оптимизированными параметрами режима.

### 1.6 Апробация диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на кафедральном научном семинаре 2005 г., научном семинаре на кафедре физики твердого тела ПГУ 2006 г., научном семинаре на кафедре общей физики и молекулярной электроники МГУ 2006 г, на конференции «Радиационная стойкость электронных систем» 2006 г. и 2010 г., на Научной сессии МИФИ 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г.

### 1.8 Публикации

По материалам диссертации в различных изданиях опубликовано 11 работ (4 статьи и 7 тезисов докладов), в том числе 4 – в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

### 1.9 Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из трех разделов, заключения и двух приложений с общим объемом 106 страниц, включая 26 рисунков, 16 таблиц и список используемой литературы из 66 наименований.

## **2 Содержание диссертации**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования и основные задачи, решаемые в диссертационной работе.

В первой главе проведен обзор данных по эффекту улучшения характеристик ИМС и повышения стойкости к ИИ после РТО. Также в этой главе рассмотрены атомарное строение оксида кремния в МОП-структуре, радиационные дефекты в оксиде кремния и их отжиг.

Именно в структуре пленки оксида кремния происходят самые заметные изменения при РТО. Подробные исследования пленки термического SiO<sub>2</sub> показали, что в нем сохраняется ближний порядок, но его отличает от кристаллического кварца отсутствие дальнего порядка. Полиморфный оксид кремния может содержать в себе два типа структурного беспорядка: точечный дефект, определяемый как химический беспорядок в совершенном стекле SiO<sub>2</sub> и физический беспорядок, который получается из-за широкого распределения углов связей.

Общую модель аморфного оксида кремния можно представить в виде непрерывной случайной сетки, где кристаллическая связность сохраняется и геометрические параметры распределяются в определенных областях. В оксиде сохраняется корреляция в расположении атомов в пределах нескольких координационных сфер. Поэтому можно охарактеризовать оксид кремния в МОП-структуре как полиморфный.

МОП структура характеризуется наличием в ней механических напряжений вне зависимости от технологии ее изготовления, что приводит к тому, что атомарная структура вещества находится в неравновесном состоянии, зафиксированном охлаждением структуры SiO<sub>2</sub>-Si после ее изготовления. Механические напряжения создают уровни напряженных валентных связей Si-O, находящиеся в глубине валентной зоны.

При воздействии ионизирующего излучения на МОП структуру на уровни напряженных валентных связей Si-O могут захватываться свободные дырки, в результате чего происходит разрыв напряженной валентной связи Si-O и образуются дефекты, что создает условия для перехода атомарной структуры оксида кремния в более равновесное состояние. Процесс подобного перехода проявляется в уменьшении механических напряжений в структуре SiO<sub>2</sub>-Si.

Смещение атомов оксида кремния при его облучении приводит к изменению углов связи. При термообработке оксида кремния после облучения наблюдается восстановление разорванных связей Si-O и происходит изменение распределения углов связи. Эффект повышения стойкости МОП ИМС после РТО связан с релаксацией механических напряжений при облучении в результате разрыва валентных связей Si-O и с последующим восстановлением разорванных связей при термообработке.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния РТО на атомарную структуру оксида кремния и на стойкость МОП приборов к воздействию ИИ.

В работе исследовалось изменение концентрации ловушечных центров в оксиде кремния *p*-канальных МОП транзисторов и КМОП инверторов при РТО. Транзисторы и инверторы были изготовлены в технологической лаборатории кафедры Микроэлектроники МИФИ, толщина подзатворного диэлектрика составляла 0.17 мкм.

Облучение транзисторов и инверторов проводилось в РУЦ МИФИ быстрыми электронами (БЭ) с энергией 8 МэВ и потоком 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>, что соответствует дозе 2.9·10<sup>6</sup> рад (Si). Плотность потока БЭ составляла

$10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что обеспечивало нормальную температуру при облучении. Далее проводилась термообработка в течение 40 минут при  $350^{\circ}\text{C}$ . Затем проводилось повторное облучение БЭ ( $10^{13}$ - $10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). После каждого воздействия (облучение или термообработка) проводилось измерение сток-затворных характеристик и по методике подпороговых сток-затворных характеристик определялось изменение плотности ловушечных центров в объеме оксида. Результаты эксперимента представлены на рис. 1 и 2. На рисунках указываются изменения плотности оксидных ловушек после каждого воздействия по сравнению с начальным значением: облучение, термообработка, повторное облучение.

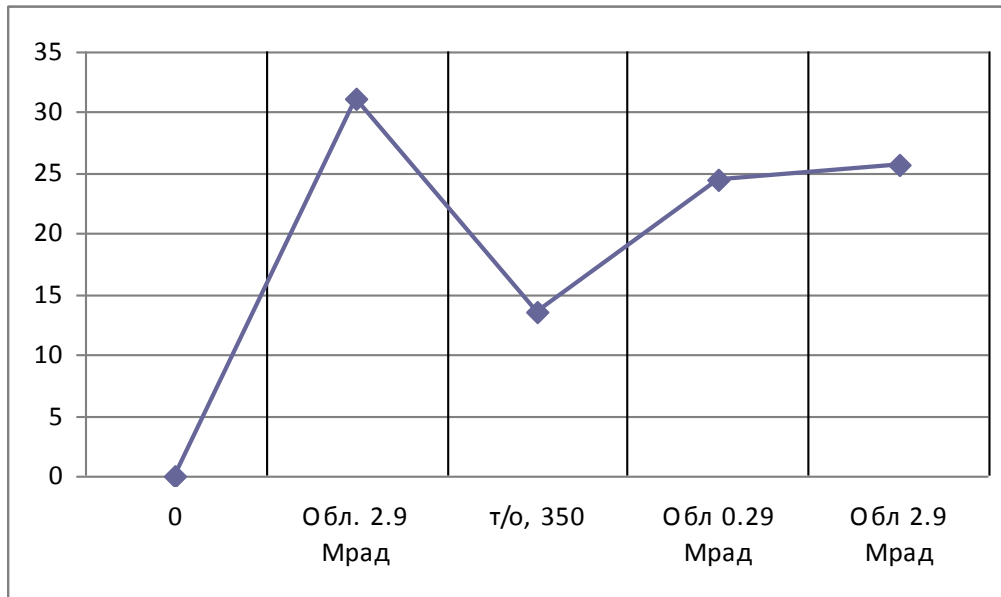


Рис. 1. Результаты определения изменения плотности оксидных ловушек  $\Delta N_{от}$  в  $p$ -канальных МОП транзисторах,  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Анализ результатов показывает, что, как для облученных  $p$ -канальных МОП транзисторов, так и для КМОП инверторов, оксид кремния имеет более дефектную структуру по сравнению с исходной, термообработка снижает дефектность структуры оксида кремния. После повторного облучения заряженных центров в оксиде  $p$ -канальных МОП транзисторов образуется в сумме на 18% меньше, чем при облучении без РТО, а для КМОП инверторов – в среднем на 16% меньше. В партии инверторов №2 заряженных центров образуется больше, чем при первом облучении, что можно объяснить тем, что большое количество связей осталось напряженными после первого облучения, и повторное облучение способствует разрыву этих связей. Но темп роста (приращение числа) ловушек во всех случаях уменьшается: для  $p$ -канальных МОП транзисторов – на 61%, для КМОП инверторов – в среднем на 68%.

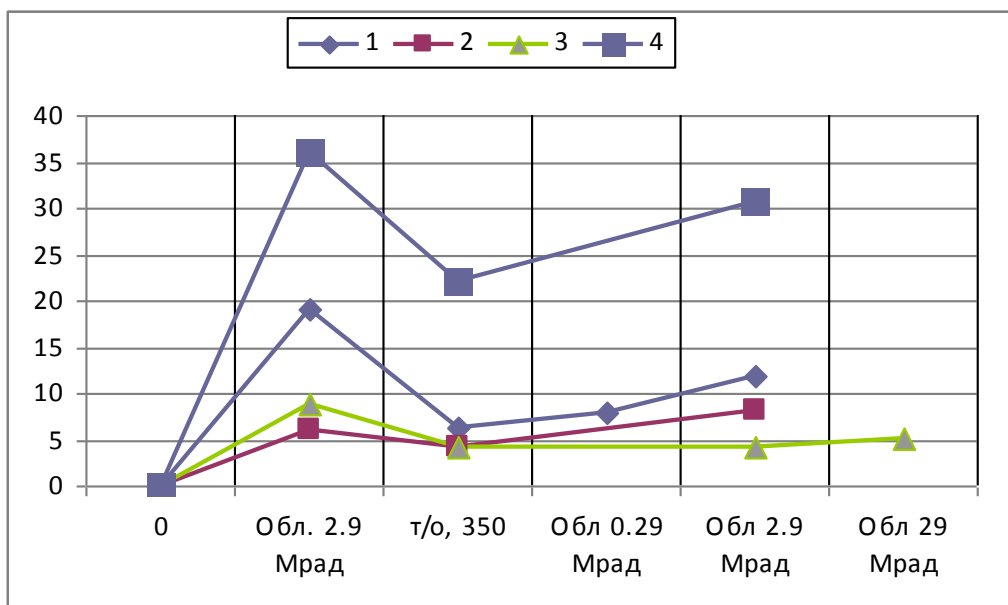


Рис. 2. Результаты определения изменения плотности оксидных ловушек  $\Delta N_{ot}$  в *n*- и *p*-канальных транзисторах в составе КМОП инверторов,  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ . (1-4 – разные партии инверторов).

В работе проводилось исследование тестовых МОП структур после РТО методом вольт-фарадных характеристик. В технологической лаборатории кафедры Микроэлектроники МИФИ были изготовлены тестовые МОП структуры с толщиной подзатворного диэлектрика 100 нм на пластине кремния *n*-типа с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см и толщиной 630 нм. Подзатворный диэлектрик был получен окислением при температуре  $T_{ox}=1050^{\circ}\text{C}$  в атмосфере кислорода в течение 30 минут. Облучение тестовых МОП структур проводилось гамма-лучами источником  $\text{Co}^{60}$  с мощностью 30 рад/с до дозы  $10^6$  рад (группа тестовых МОП структур №2) и гамма-лучами в шахте-хранилище ИРТ МИФИ с мощностью дозы 0.1 рад/с до дозы  $10^4$  рад (группа №5). Термообработка проводилась в технологической лаборатории кафедры Микроэлектроники МИФИ при температурах  $450^{\circ}\text{C}$  в течение 30 минут (группа №3), при  $200^{\circ}\text{C}$  в течение 30 минут (группа №4) и при температуре  $140^{\circ}\text{C}$  в течение 96 часов (группа №6). По измеренным ВФХ, сравнивая с ВФХ контрольной группой №1, определялись значения изменения плотности ловушек в диэлектрике.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

**Таблица 2. Результаты определения плотности ловушек в диэлектрике по ВФХ тестовых МОП структур.**

№ группы	2	3	4	5	6
$\Delta N_{ot}, \text{ см}^{-2}$	$2.21 \cdot 10^{+12}$	$1.70 \cdot 10^{+12}$	$1.11 \cdot 10^{+12}$	$1.70 \cdot 10^{+12}$	$1.59 \cdot 10^{+12}$



Исследования показали, что облученные гамма-лучами с относительно высокой (30 рад/с) и низкой (0.1 рад/с) интенсивностью тестовые МОП структуры оказываются более дефектными по сравнению с исходными тестовыми МОП структурами, причем, как и ожидалось, ловушек образуется больше при облучении с интенсивностью 30 рад/с и дозой  $10^6$  рад. Термообработка снижает дефектность тестовых МОП структур: облученных дозой  $10^6$  рад с интенсивностью 30 рад/с – на 23% при температуре отжига  $450^{\circ}\text{C}$ , при температуре отжига  $200^{\circ}\text{C}$  – на 50% и облученных с интенсивностью 0.1 рад/с дозой  $10^4$  рад на 7% при температуре отжига  $96^{\circ}\text{C}$ .

Проводилось исследование влияния облучения и термообработки на структурные характеристики термического оксида кремния. Пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной 1.2 мкм получены термическим окислением с добавкой паров  $\text{HCl}$  в технологической лаборатории кафедры Микроэлектроники МИФИ. Доза облучения гамма-лучами составила  $10^7$  рад. Термообработка проводилась в атмосфере аргона при  $400^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа.

Для получения характеристик ближнего порядка оксида кремния использовался метод рентгенографии. Каждый образец до и после травли пленки рентгенографировался 5-10 раз. Рентгенографирование образцов осуществлялось в лаборатории кафедры Физики твердого тела ПГУ на установке ДРОН-3.0.

Расчет характеристик ближнего порядка осуществлялся методом Финбака (методом парных функций). Метод предполагает построение кривых распределения суммы функций парного взаимодействия атомов из экспериментальной угловой зависимости интенсивности рассеяния.

Кривая распределения электронной плотности, рассчитанная из экспериментальных значений интенсивности рассеяния образцами термического оксида до облучения, после облучения и после термообработки дана на рис. 3. Кривая  $D(r)$  осциллирует около средней электронной плотности.

Характеристики распределения углов связи  $J(\alpha_{2j})$  (O-Si-O) до облучения, после облучения и после термообработки, даны в таблице 3.

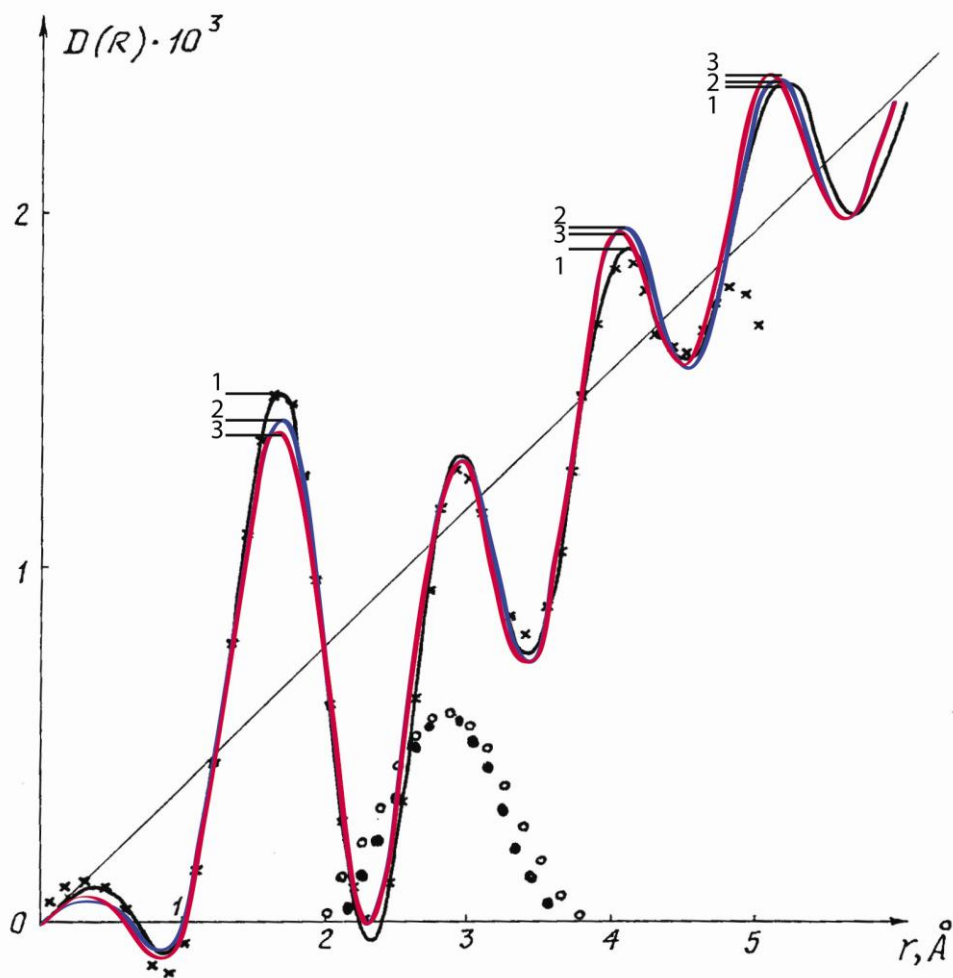


Рис. 3. Распределение функций парного взаимодействия атомов для исходного термического оксида (1), оксида после облучения (2) и оксида после облучения и отжига (3).

-x- —  $D(r)_{\text{МНК}}$ , рассчитанная для значений  $N_{ij}$ ,  $r_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  для 7 координационных сфер;

-●- — вклад от пар атомов O-O<sub>1</sub> в исходном SiO<sub>2</sub>;

-o- — вклад от пар атомов O-O<sub>1</sub> после облучения.

**Таблица 3. Характеристики распределения углов связи O-Si-O (тетраэдрических углов) в исходном SiO<sub>2</sub> (1), облученном (2) и отожженном после облучения (3).**

№	$\Delta$ , град	$\delta$ , град	$a$ , град
1	49.12	40.70	108.9
2	60.35	54.74	107.2
3	54.04	47.02	104.4

В таблице 3:  $2 \cdot \Delta$  - диапазонов флуктуации углов,  $\delta$  - ширина пика на полувысоте,  $a$  - среднее значение угла.

Полуширина кривой распределения углов связи  $J(\alpha_{2j})$  для облученного образца на 34% больше, чем для исходного. Такое поведение функции распределения длин и углов связи свидетельствует о большем разупорядочении в расположении атомов в облученной пленке. Полуширина кривой распределения углов связи O-Si-O для отожженного образца на 14% меньше, чем для облученного. Таким образом, облученные гамма-лучами  $10^7$  рад слои термического окисла  $\text{SiO}_2$  оказываются более дефектными по сравнению с исходными. Отжиг облученных окислов приводит к уменьшению разброса в значениях угла связей O-Si-O по сравнению с облученным.

В работе проводилось исследование влияния РТО на современные ИМС иностранного производства. В качестве образцов для исследований были взяты ИМС флеш-памяти типа 28F020, изготовленные фирмой CATALYST. Облучение микросхем проводилось гамма-лучами в шахте-хранилище ИРТ МИФИ с мощностью дозы 0.1 рад/с до дозы 10 крад. Термообработка проводилась в технологической лаборатории кафедры Микроэлектроники МИФИ при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 500 часов. В исследованиях проводился прогноз значения предельной накопленной дозы (ПНД) для микросхем с использованием аппроксимации дозовой зависимости минимального значения напряжения питания вида

$$U(D) = U(0) + A \cdot D^n,$$

где  $U(0)$ ,  $U(D)$  – минимальное напряжение питания при функционировании до и после облучения соответственно,  $D$  – доза,  $A$  и  $n$  – параметры модели. Проведенные радиационные испытания, результаты которых приведены в таблице 4, показали, что доза отказа прогнозируется корректно. Результаты прогноза ПНД до и после РТО, определения минимального напряжения питания и радиационных испытаний после РТО представлены в таблице 5.

**Таблица 4. Результаты прогноза ПНД образцов флеш-памяти и экспериментальной проверки прогноза.**

№№	$(U_{\text{пит}})_{\text{мин}}, \text{В}$				Прогноз ПНД	Эксперимент	
	D=0	D=4 крад	D=8 крад	D=10 крад		40 крад	50 крад
1	1.29	1.91	2.37	2.39	38 крад	отказ	-
2	1.27	1.89	2.37	2.50	45 крад	функц.	отказ
3	1.32	2.05	2.55	2.60	43 крад	функц.	отказ
4	1.25	1.97	2.44	2.58	50 крад	функц.	отказ
5	1.27	1.92	2.37	2.45	54 крад	функц.	отказ
6	1.32	1.89	2.22	2.29	63 крад	функц.	функц.

**Таблица 5. Результаты исследования влияния РТО на ИМС типа 28F020.**

№№ образцов	ПНД до РТО, крад	Облучение после РТО			ПРОГНОЗ после РТО	НАКОПЛЕННАЯ ДОЗА при облучении после РТО для проверки прогноза ПНД		
		$(U_{\text{пит}})_{\text{мин}}$ , В				D, крад	D=50 крад	D=65 крад
		0	5крад	10крад				
1	80	1.74	1.87	2	95	функц	функц	функц
2	47	1.78	2.2	2.27	42	функц	функц	отказ
3	40	1.78	1.92	2.15	45	отказ	отказ	отказ
4	49	1.9	1.99	2.08	60	функц	отказ	отказ
5	60	1.95	2.01	2.18	73	функц	функц	отказ

Наблюдается повышение ПНД у образцов №1, №4 и № 5. Остальные образцы, несмотря на пониженное значение ПНД при прогнозе, после РТО показали при облучении дозу отказа не хуже первоначального значения. Таким образом, РТО микросхем как минимум не ухудшила стойкость ИМС к воздействию ионизирующего излучения, а в большинстве случаев позволила повысить стойкость микросхем на ~15%.

В третьей главе проводился анализ процесса перестройки атомарной структуры оксида кремния на разных этапах РТО.

Устойчивость атомарной структуры  $\text{SiO}_2$  определяется ее термодинамическими характеристиками. Глобальными характеристиками любой системы являются энтропия и свободная энергия. Энтропия служит средством определения вероятности состояний и, как и энергия, является однозначной функцией состояния системы. Она характеризует состояние системы и может приниматься в качестве одного из параметров состояния.

Одним из основных отличий полиморфного оксида кремния, который является составной частью МОП-структуры, от кристалла является наличие разброса в распределении углов связи.

Кривые распределения углов можно аппроксимировать гауссовой зависимостью

$$f = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $A$  – нормировочный коэффициент,  $x$  – случайная величина (в данном случае – угол связи),  $a$  – среднее значение случайной величины (угла связи),  $\sigma$  - дисперсия случайной величины (разброс в значениях угла связи).

Для экспериментальной кривой распределения углов связи можно определить значения диапазона флуктуации углов  $2 \cdot \Delta$ , ширины пика на его полувысоте  $\delta$  и среднее значение угла  $a$ . Величина дисперсии  $\sigma$  можно вычислить по следующей формуле

$$\sigma = \delta \cdot \frac{1}{\sqrt{8 \cdot \ln(2)}}. \quad (2)$$

Коэффициент  $A$  можно вычислить из нормировки функции распределения углов  $f$

$$\int_{a-x}^{a+x} f(y)dy = A \cdot \int_{a-x}^{a+x} \exp\left(-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right) dy = 1, \quad (3)$$

$$A = \left[ 2\sigma \cdot \int_0^{\Delta/\sigma} \exp -y^2/2 dy \right]^{-1}. \quad (4)$$

Выражение для энтропии системы имеет следующий вид

$$S = -k \cdot \sum w_n \cdot \text{Ln}(w_n), \quad (5)$$

где  $w_n$  - распределение вероятности реализации  $n$ -состояния, суммирование производится по всем состояниям системы. Вследствие того, что распределение углов связи  $f$  является непрерывной функцией, суммирование заменяется интегрированием. Учитывая выражения (3) и (4), можно получить выражение для энтропии атомарной структуры оксида кремния, связанное с разбросом углов связи

$$S = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{\int_0^{\Delta/\sigma} y^2 \exp -y^2/2 dy}{\int_0^{\Delta/\sigma} \exp -y^2/2 dy} + k \cdot \text{Ln} \left( 2 \cdot \sigma \cdot \int_0^{\Delta/\sigma} \exp -y^2/2 dy \right). \quad (6)$$

При воздействии излучения ионизируются атомы и образуются специфические дефекты в виде микротрещины, которые обычно называют  $E'$ -центрами. В результате смещения атомов может происходить изменение углов связи.

Если принять, что до облучения не было оборванных связей, а после облучения получили  $n$  разорванных связей при общем числе  $N$  атомов, то увеличение энтропии при облучении вследствие разрыва  $n$  связей равно

$$\begin{aligned} \Delta S_{CB}^O &= k \cdot \ln(\Omega) = k \cdot \ln \left( \frac{N!}{(N-n)! n!} \right) \cong \\ &\cong k \cdot N \cdot \ln(N) - (N-n) \cdot \ln(N-n) - n \cdot \ln(n) \end{aligned}, \quad (7)$$

где  $\Omega$  – статистический вес данного макросостояния с  $n$  разорванными связями, то есть то количество микросостояний, которыми может реализоваться данное макросостояние. Число атомов (в единице объема) можно оценить как

$$N = \frac{N_A \cdot \rho_D}{\mu_D} = 2.66 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}, \quad (8)$$

где  $N_A=6.02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро,  $\rho_D=2.65$  г/см<sup>3</sup> – плотность диэлектрика,  $\mu_D=60$  г/моль – молярная масса диэлектрика.

Учитывая, что  $n/N \ll 1$ , и отбрасывая члены порядка малости  $n/N$ , можно получить

$$\Delta S_{CB}^O = k \cdot n \cdot [\ln(N/n) + 1]. \quad (9)$$

При облучении оксида кремния гамма-лучами наблюдается увеличение полуширины кривой распределения тетраэдрических углов связи O–Si–O. Взяв разность значений энтропии до и после облучения, вычисленные с помощью экспериментальных кривых распределения углов связи по формуле (6), можно получить изменение энтропии при облучении, связанное с изменением разброса тетраэдрического угла, в расчете на одну связь Si–O и в расчете на одну разорванную связь. Сравнивая полученные значения со значением, полученным из формулы (9), можно найти отношение  $N/n$  и численное значение изменения энтропии при облучении.

При термообработке оксида кремния после облучения наблюдается восстановление разорванных связей Si–O. Пусть при термообработке восстанавливается  $x$  связей, то есть разорванных связей останется  $(n-x)$ . Тогда изменение энтропии по сравнению с идеальной решеткой после термообработки можно выразить следующим образом

$$\Delta S_1 = k \cdot N \cdot \ln(N) - (N - n + x) \cdot \ln(N - n + x) - (n - x) \cdot \ln(n - x) . \quad (10)$$

Изменение энтропии при термообработке после облучения равно разности выражений (10) и (7). Если отношение восстановленных  $x$  и разорванных  $n$  связей обозначить как  $\delta$  ( $\delta = x/n$ ,  $0 < \delta < 1$ ), то с учетом соотношения  $n/N \ll 1$  и  $x/N \ll 1$  выражение для изменения энтропии при термообработке принимает следующий вид

$$\Delta S_{CB}^{TEPM} = -k \cdot n \cdot \delta \cdot \ln(N/n) + 1 + (1 - \delta) \cdot \ln(1 - \delta) . \quad (11)$$

Пренебрегая последним слагаемым (максимальное значение равно  $-0.37$  и достигается при  $\delta = 0.65$ ), получаем изменение энтропии при термообработке после облучения

$$\Delta S_{CB}^{TEPM} = -k \cdot x \cdot \ln(N/n) + 1 . \quad (12)$$

Знак «минус» в формуле (12) означает, что энтропия системы атомов оксида кремния уменьшается при термообработке.

Взяв разность значений энтропии после термообработки и после облучения, вычисленные с помощью экспериментальной кривой распределения углов связи по формуле (6), можно получить изменение энтропии при термообработке после облучения, связанное с изменением разброса тетраэдрического угла, в расчете на одну связь Si–O и в расчете на одну восстановленную связь. Сравнивая полученные значения со значением, полученным из формулы (12), можно найти отношения  $N/x$ ,  $\delta = x/n$  и численное значение изменения энтропии при термообработке после облучения.

Микроизменение свободной энергии описывается выражением

$$dF = dU_{упр} - S \cdot dT , \quad (13)$$

где  $T$  – температура,  $S$  – энтропия,  $dU_{упр}$  – микроизменение упругой энергии системы.

При облучении с низкими значениями мощности дозы не происходит изменения температуры, поэтому, зная изменение механических напряжений в структуре, можно вычислить уменьшение свободной энергии при

облучении. Данное уменьшение будет равно произведению изменения упругой энергии  $\Delta U_{ед.об}$  на единицу объема на объем системы, в которой происходит релаксация механических напряжений  $V_{рел}$ . При облучении оксида кремния на кремнии происходит разрыв напряженных валентных связей и релаксация термических механических напряжений, поэтому  $\Delta U_{ед.об}$  можно выразить как

$$\Delta U_{ед.об} = -\alpha \cdot \theta \cdot \Delta T, \quad (14)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения оксида кремния ( $\alpha=5.5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ),  $\theta$  – механические напряжения,  $\Delta T$  – разница температур при изготовлении оксида и комнатной. Объем, в котором происходит релаксация механических напряжений при разрыве одной связи Si–O, можно вычислить по следующему выражению

$$V_{рел} = K_{рел} \cdot V_{мол} / N_A, \quad (15)$$

где  $K_{рел}$  – столько валентных связей релаксирует при разрыве одной напряженной связи Si–O,  $V_{мол}$  – молярный объем оксида кремния,  $N_A$  – число Авогадро. Таким образом, изменение упругой и свободной энергии системы атомов оксида кремния при облучении можно выразить следующим образом

$$\Delta F^{ОБЛ} = \Delta U_{упр}^{ОБЛ} = -\alpha \cdot \theta \cdot (T_{изг} - T_0) \cdot V_{мол} \cdot K_{рел} / N_A, \quad (16)$$

где  $T_{изг}$  – температура, при которой получают оксид кремния,  $T_0$  – комнатная температура.

Охлаждение структуры SiO<sub>2</sub>–Si после термообработки приводит к возникновению механических напряжений. Вследствие этого происходит увеличение свободной энергии системы на величину

$$\Delta F_{упр}^{ТЕРМ} = \alpha \cdot \theta \cdot (T_{отж} - T_0) \cdot V_{мол} \cdot K_{рел} / N_A, \quad (17)$$

где  $T_{отж}$  – температура отжига.

При термообработке энтропия системы уменьшается (выражение (12)), поэтому второе слагаемое в выражении (13) дает вклад в изменение свободной энергии. Этот вклад равен

$$\Delta F_{энтр}^{ТЕРМ} = 1/2 \cdot \Delta S^{ТЕРМ} \cdot (T_{отж} - T_0), \quad (18)$$

где  $\Delta S^{ТЕРМ}$  – изменение энтропии при термообработке, которое находится по выражению (12).

Суммарное изменение свободной энергии в расчете на одну восстановленную связь после термообработки равно

$$\Delta F^{ТЕРМ} = 1/2 \cdot \Delta S^{ТЕРМ} \cdot (T_{отж} - T_0) + \alpha \cdot \theta \cdot (T_{отж} - T_0) \cdot V_{мол} \cdot K_{рел} / N_A. \quad (19)$$

Таким образом, после термообработки система переходит в новое состояние, характеризующееся новым значением свободной энергии.

Суммарное изменение свободной энергии при РТО пленки оксида кремния равно сумме выражений (16) и (19). В расчете на одну разорванную связь получим

$$\Delta F^{РТО} = -\alpha \cdot \theta \cdot (T_{изг} - T_0) \cdot V_{мол} \cdot K_{рел} / N_A + \\ + \delta \cdot \left[ 1/2 \cdot \Delta S^{ТЕРМ} \cdot (T_{отж} - T_0) + \alpha \cdot \theta \cdot (T_{отж} - T_0) \cdot V_{мол} \cdot K_{рел} / N_A \right]. \quad (20)$$

Для получения суммарного изменения свободной энергии в расчете на одну связь Si-O следует умножить выражение (20) на отношение  $n/N$ .

Наибольшее изменение свободной энергии соответствует наиболее стабильному состоянию атомарной структуры оксида кремния. Анализ выражения для суммарного изменения свободной энергии показывает, что максимальное изменение соответствует значениям  $n/N$  и  $\delta$ , стремящимся к единице. Физически это означает, что для получения наиболее стабильной атомарной структуры оксида кремния следует разорвать максимальное количество напряженных валентных связей, то есть максимально релаксировать механические напряжения, и затем восстановить как можно больше число разорванных связей. Данные критерии можно использовать для выбора рациональных режимов РТО.

Результаты расчета диапазонов флуктуации углов  $2\cdot\Delta$ , ширины пика на полувысоте  $\delta$ , среднее значение угла  $a$ , дисперсии  $\sigma$  и энтропии  $S$  (приведенной к константе Больцмана  $k$ ), по литературным данным распределения диэдрических и тетраэдрических углов связи в пленках оксида кремния, полученных разными способами, с использованием выражений (2), (4) и (6) представлены в таблице 6 и таблице 7.

Можно отметить, что в целом энтропия, связанная с разбросом диэдрических углов, больше энтропии, связанной с разбросом тетраэдрических углов. Но первая мало меняется в зависимости от метода получения пленки  $\text{SiO}_2$ , в отличие от последней.

**Таблица 6. Расчетные значения статистических параметров и энтропии для распределения тетраэдрических углов O-Si-O в  $\text{SiO}_2$ , полученном разными методами. 1-сухое термическое окисление; 2-влажное термическое окисление; 3-плавленый кварц; 4-гидротермальный окисел.**

№	$\Delta$ , град	$\delta$ , град	$a$ , град	$\sigma$ , град	$S/k$
1	48.97	44.45	106	18.88	4.31
2	27.5	20.34	104	8.64	3.57
3	34.66	21.85	107	9.28	3.65
4	40.31	28.63	115	12.16	3.91

**Таблица 7. Расчетные значения статистических параметров и энтропии для распределения диэдрических углов Si-O-Si в  $\text{SiO}_2$ , полученном различными методами. 1-сухое термическое окисление; 2-влажное термическое окисление; 3-плавленый кварц; 4-гидротермальный окисел.**

№	$\Delta$ , град	$\delta$ , град	$a$ , град	$\sigma$ , град	$S/k$
1	40.0	31.94	134	13.56	4.01
2	40.28	32.66	136	13.87	4.03
3	41.73	33.39	134	14.18	4.05
4	38.47	32.66	138	13.87	4.02



В таблице 8 приведены результаты расчета диапазонов флуктуации углов  $2\cdot\Delta$ , ширины пика на полувысоте  $\delta$ , среднее значение угла  $a$ , дисперсии  $\sigma$  и энтропии  $S$  (приведенной к константе Больцмана  $k$ ), по данным из таблицы 4 с использованием выражений (2), (4) и (6).

**Таблица 8. Расчетные значения статистических параметров и энтропии для распределения тетраэдрических углов O–Si–O в исходном SiO<sub>2</sub> (1), облученном (2) и отожженном после облучения (3).**

№	$\Delta$ , град	$\delta$ , град	$a$ , град	$\sigma$ , град	$S/k$
1	49.12	40.70	108.9	12.53	3.946
2	60.35	54.74	107.2	16.85	4.241
3	54.04	47.02	104.4	14.48	4.090

Среднее значение диэдрического угла связи Si–O–Si как в облученном, так и в исходном образце составляет  $140.4^{\circ}$ . Гамма-облучение оксида кремния не приводит к увеличению разброса диэдрического угла. Вероятно, это связано с тем, что кремниевая упаковка находится в более фиксированном положении, а также с тем, что атомы кислорода могут вращаться вокруг оси связи Si–O–Si. Поэтому увеличение энтропии, связанное с изменением разброса диэдрического угла, при облучении не происходит.

К такому же выводу можно прийти, анализируя энтропию разброса диэдрических углов и тетраэдрических углов у пленок оксида кремния, полученных разными способами: термическим окислением в сухом и влажном кислороде (таблицы 6 и 7). Из этих таблиц видно, что значения энтропии, обусловленные разбросом диэдрических и тетраэдрических углов, отличаются на доли процента и на 20% соответственно. Можно сделать вывод, что разброс диэдрического угла и связанная с ним энтропия имеет относительно большее значение, но оно фиксировано и слабо меняется в результате различных воздействий. Разброс тетраэдрического угла и связанное с ним значение энтропии имеют меньшее значение, но заметно изменяется в результате различных обработок, в частности, при облучении и термообработке.

Уменьшение энтропии при термообработке пленки SiO<sub>2</sub> связано с упорядочиванием структурной сетки атомов и, следовательно, более стабильному состоянию структуры.

В таблицах 9 и 10 сведены расчетные данные термодинамических характеристик атомарной структуры оксида кремния после РТО в разных режимах (выражения (6)-(20)):

- режим №1 – облучение пленок термического окисла SiO<sub>2</sub> гамма-лучами дозой  $10^7$  рад и их последующий отжиг при  $T_{отж}=400^{\circ}\text{C}$ ;

- режим №2 – облучение тестовых МОП структур гамма-лучами дозой  $10^6$  рад и их последующий отжиг при  $T_{отж}=450^{\circ}\text{C}$ ;

- режим №3 – облучение тестовых МОП структур гамма-лучами дозой  $10^6$  рад и их последующий отжиг при  $T_{отж}=200^{\circ}\text{C}$ ;

- режим №4 – облучение тестовых МОП структур в шахтохранилище ИРТ МИФИ дозой  $10^4$  рад и их последующий отжиг при  $T_{отж}=140^{\circ}\text{C}$ ;

- режим №5 – облучение  $p$ -канальных МОП транзисторов и КМОП инверторов быстрыми электронами с энергией 8 МэВ и потоком  $10^{14}$  см $^{-2}$ , что соответствует дозе  $2.9 \cdot 10^6$  рад (Si), и их последующий отжиг при  $T_{отж}=350^{\circ}\text{C}$ .

В таблицах 9 и 10:

$N/n$  – отношение общего числа атомов к числу разорванных связей;

$N/x$  – отношение общего числа атомов к числу восстановленных связей;

$\delta = x/n$  – отношение числа восстановленных и разорванных связей;

$\Delta S^{обл}/(k \cdot n)$  – увеличение энтропии системы атомов оксида кремния вследствие облучения в расчете на одну разорванную связь (выражение (9));

$\Delta S^{терм}/(k \cdot x)$  – увеличение энтропии системы вследствие термообработки в расчете на одну восстановленную связь (выражение (12));

$\Delta F_{упр}^{обл}$  – уменьшение свободной энергии системы после облучения в расчете на одну разорванную связь (выражение (16));

$\Delta F_{энтр}^{терм}$  – энтропийный вклад в уменьшение свободной энергии системы в расчете на одну восстановленную связь (выражение (18));

$\Delta F_{упр}^{терм}$  – увеличение свободной энергии системы вследствие термообработки в расчете на одну восстановленную связь (выражение (17));

$\delta \cdot \Delta F_{упр}^{терм}$  – увеличение свободной энергии системы вследствие термообработки в расчете на одну разорванную связь;

$\Delta F^{РТО}$  – общее изменение свободной энергии системы после РТО (выражение (20));

$n/N \cdot \Delta F^{РТО}$  – общее изменение свободной энергии системы после РТО в расчете на одну связь Si-O.

**Таблица 9. Термодинамические характеристики атомарной структуры оксида кремния на различных этапах РТО в разных режимах.**

№ Режима	1	2	3	4
$N/n$	12	$1.20 \cdot 10^5$	$1.20 \cdot 10^5$	$1.56 \cdot 10^5$
$N/x$	23	$5.21 \cdot 10^5$	$2.40 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^6$
$\delta = x/n$	0.52	0.23	0.50	0.065
$\Delta S^{обл}/(k \cdot n)$	3.54	12.70	12.70	12.96
$\Delta S^{терм}/(k \cdot x)$	-3.54	-12.70	-12.70	-12.96
$\Delta F_{упр}^{обл}$ , эВ	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$
$\Delta F_{энтр}^{терм}$ , эВ	-0.058	-0.235	-0.098	-0.067
$\Delta F_{упр}^{терм}$ , эВ	$3.14 \cdot 10^{-5}$	$3.55 \cdot 10^{-5}$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	$0.985 \cdot 10^{-5}$
$\delta \cdot \Delta F_{упр}^{терм}$ , эВ	$1.63 \cdot 10^{-5}$	$0.82 \cdot 10^{-5}$	$0.74 \cdot 10^{-5}$	$0.064 \cdot 10^{-5}$
$\Delta F^{РТО}$ , эВ	-0.030	-0.054	-0.049	-0.0044
$n/N \cdot \Delta F^{РТО}$ , эВ	$-2.5 \cdot 10^{-3}$	$-4.5 \cdot 10^{-7}$	$-4.1 \cdot 10^{-7}$	$-2.8 \cdot 10^{-8}$

**Таблица 10. Термодинамические характеристики атомарной структуры оксида кремния на различных этапах РТО в режиме №5 для *p*-канальных МОП транзисторов (№1) и КМОП инверторов (№№2-5).**

№ партии	1	2	3	4	5
$N/n$	$1.45 \cdot 10^5$	$2.38 \cdot 10^5$	$7.39 \cdot 10^5$	$5.10 \cdot 10^5$	$1.25 \cdot 10^5$
$N/x$	$2.55 \cdot 10^5$	$3.55 \cdot 10^5$	$2.20 \cdot 10^6$	$9.55 \cdot 10^5$	$3.26 \cdot 10^5$
$\delta = x/n$	0.57	0.67	0.34	0.53	0.38
$\Delta S^{обл}/(k \cdot n)$	12.9	13.4	14.5	14.1	12.7
$\Delta S^{терм}/(k \cdot x)$	-12.9	-13.4	-14.5	-14.1	-12.7
$\Delta F_{упр}^{обл}$ , эВ	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$	$-8.51 \cdot 10^{-5}$
$\Delta F_{энтр}^{терм}$ , эВ	-0.1828	-0.1899	-0.2059	-0.2007	-0.1807
$\Delta F_{упр}^{терм}$ , эВ	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$
$\delta \cdot \Delta F_{упр}^{терм}$ , эВ	$1.55 \cdot 10^{-5}$	$1.83 \cdot 10^{-5}$	$9.13 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	$1.05 \cdot 10^{-5}$
$\Delta F^{РТО}$ , эВ	-0.104	-0.128	-0.069	-0.107	-0.069
$n/N \cdot \Delta F^{РТО}$ , эВ	$-7.2 \cdot 10^{-7}$	$-5.4 \cdot 10^{-7}$	$-9.3 \cdot 10^{-8}$	$-2.1 \cdot 10^{-7}$	$-5.5 \cdot 10^{-7}$

В итоге во всех случаях свободная энергия атомарной структуры оксида кремния уменьшается после РТО, причем основной вклад в изменение свободной энергии дает энтропийная составляющая (выражение (18)). Вклад упругой составляющей энергии мал по сравнению с энтропийной, но алгебраическая сумма  $\Delta F_{упр}^{обл} + \delta \cdot \Delta F_{упр}^{терм} < 0$  вследствие того, что температура отжига значительно меньше температуры получения оксида кремния (выражения (16) и (17)).

Существует множество систем, свободная энергия которых имеет более, чем два минимума при постоянных, например, температуре  $T$  и объеме  $V$ . При таких условиях наиболее устойчивым является состояние, соответствующее наименьшему значению свободной энергии. Наоборот, состояние, соответствующее самому мелкому минимуму, является метастабильным равновесным состоянием. В рассматриваемом случае первоначальное состояние системы является метастабильным из-за наличия в ней механических напряжений и напряженных валентных связей Si–O. При облучении пленки оксида кремния система переходит в другое метастабильное состояние, характеризующееся большим количеством разорванных связей Si–O. Поскольку со временем дефекты отжигаются, то состояние после облучения является метастабильным. При термообработке происходит восстановление валентных связей, и система переходит в более стабильное состояние, характеризующееся меньшим значением свободной энергии.

В итоге атомарная структура оксида кремния находится в более устойчивом состоянии после РТО с меньшим количеством дефектов и напряженных валентных связей, что отражается в повышении ее устойчивости к воздействию ИИ и в конечном итоге – к повышению

стойкости МОП транзисторов к воздействию облучения. Таким образом, РТО можно использовать в технологическом процессе изготовления МОП ИМС для повышения их стойкости к воздействию ИИ. Следует отметить, что РТО может применяться не только для МОП микросхем, но и для биполярных ИМС. Например, РТО биполярных ИМС проводится в НПО "Интеграл" (Беларусь), которая позволяет отбраковывать дефектные ИМС с пониженной стойкостью к воздействию ионизирующего излучения при не ухудшении характеристик надежности.

Произведение выражения для суммарного изменения свободной энергии атомарной структуры оксида кремния после РТО в расчете на одну разорванную связь (3.20) на число разорванных связей  $n$  дает общее изменение свободной энергии атомарной структуры оксида кремния после РТО. Анализ этого выражения позволяет сделать вывод, что максимальное уменьшение общей свободной энергии достигается при максимальном количестве разорванных связей, т.е. все напряженные связи должны быть разорваны, и при полном восстановлении разорванных связей после термообработки. Однако, существуют ограничивающие факторы для реализации максимального уменьшения свободной энергии атомарной структуры оксида кремния.

При воздействии ионизирующего излучения на МОП структуру происходит разрыв напряженных связей и зарядка имеющихся технологических дефектов в пленке оксида кремния. При воздействии повышенной температуры в оксиде кремния наблюдается восстановление разорванных связей (отжиг дефектов) и образование новых дефектов, которое возникает при чрезмерном увеличении температуры и времени термообработки. Образование новых дефектов (разрыв связей) может происходить и при комнатной температуре, что обуславливает старение МОП ИМС. Данный термостимулированный процесс дефектообразования по своей физической сути аналогичен процессу дефектообразования при облучении и заключается в "разогреве" электрона, который покидает напряженную валентную связь, что приводит к ее разрыву. Это обстоятельство является ограничивающим фактором при установлении температуры и времени термообработки в процессе РТО. Также при РТО МОП ИМС в корпусах температура отжига ограничивается максимальным допустимым значением температуры эксплуатации для данного типа микросхемы. Поэтому оптимизацию РТО целесообразно начинать с установления оптимального режима термообработки. Ограничение температуры приводит к тому, что часть активизированных на этапе облучения дефектов в МОП структуре на отжигается, причем их количество возрастает с увеличением дозы облучения.

Результат анализа данных об оптимизации процессов РТО МОП ИМС, проведенных в более ранних работах, позволяет получить аппроксимационную зависимость вида (21), которую можно использовать для определения оптимальных режимов РТО.

$$y = A \cdot x^B, \quad (21)$$

где  $y$  – доза облучения (рад),  $x = T \cdot t$  – произведение температуры и времени термообработки ( $^{\circ}\text{K} \cdot \text{час}$ ),  $A=13,895$  и  $B=0,2889$  – коэффициенты.

Анализ предыдущих работ показал, что используемые параметры режимов РТО близки к оптимальным.

Анализ режимов РТО, используемых в данной работе, показал следующее: режимы 2, 3 и 5 близки к оптимальным, что соответствует наибольшему уменьшению свободной энергии атомарной структуры оксида кремния МОП структуры по сравнению с режимом 4 ( $\Delta F = -4,5 \cdot 10^{-7}$  эВ – режим 2,  $\Delta F = -4,1 \cdot 10^{-7}$  эВ – режим 3,  $\Delta F = -4,2 \cdot 10^{-7}$  эВ – режим 5 и  $\Delta F = -0,28 \cdot 10^{-7}$  эВ – режим 4).

Таким образом, можно предложить следующую методику проведения РТО МОП ИМС с оптимизированными параметрами режима:

- проводится обработка пластин или корпусов ионизирующим излучением, которая характеризуется дозой облучения;
- проводится термообработка пластин или корпусов, которая характеризуется температурой и временем термообработки.

Рекомендуемая температура: от  $200^{\circ}\text{C}$  до  $400^{\circ}\text{C}$ ; если термообработка проводится для ИМС в корпусе, температура отжига берется максимально возможной для данного типа ИМС.

Время термообработки выбирается исходя из выбранного значения температуры так, чтобы произведение  $T (^{\circ}\text{K}) \cdot t$  (часы) лежало в диапазоне значений от 100 до 1500.

Доза облучения вычисляется по следующей формуле

$$D = \sqrt[B]{T \cdot t} \cdot A, \quad (22)$$

где  $D$  – доза облучения (рад),  $T$  – температура отжига ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $t$  – время отжига (час),  $A=13,895$  и  $B=0,2889$  – коэффициенты.

### 3 Заключение

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана физико-математическая модель процессов, происходящих с атомарной структурой оксида кремния в МОП приборах при РТО, построенная с позиций термодинамики. Получены выражения для параметров модели – энтропии и свободной энергии атомарной структуры оксида кремния - и их численные значения из экспериментальных данных. Показано, что свободная энергия уменьшается после РТО, а это свидетельствует о том, что атомарная структура оксида кремния переходит в более устойчивое состояние. Переход атомарной структуры оксида кремния в более стабильное состояние после РТО приводит к повышению ее устойчивости к воздействию ИИ, а значит и к повышению стойкости МОП транзисторов и МОП ИМС к воздействию облучения.

2. Разработанная модель дает критерий для выбора рациональных режимов РТО – минимум свободной энергии атомарной структуры оксида

кремния. Физически это означает, что для получения наиболее стабильной атомарной структуры оксида кремния РТО следует проводить в таком режиме, чтобы обеспечить разрыв максимального числа напряженных валентных связей; термообработку проводить в таком режиме, чтобы обеспечить восстановление наибольшего числа разорванных связей.

3. Разработанная модель объясняет наблюдаемые явления улучшения характеристик и повышения стойкости МОП приборов к воздействию ИИ после РТО, и может служить обоснованием применения РТО в технологическом процессе изготовления МОП транзисторов и МОП ИМС для повышения их стойкости к воздействию ИИ.

Основные практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Получены экспериментальные значения изменения количества дефектов в оксиде кремния и распределения углов связей атомарной структуры оксида кремния. Показано, что для всех режимов РТО после облучения растет количество разорванных валентных связей Si-O и увеличивается разброс в распределении углов связи O-Si-O, а при термообработке часть разорванных связей восстанавливается и разброс углов связи уменьшается.

2. Получены экспериментальные значения стойкости МОП ИМС иностранного производства к воздействию ИИ. Анализ экспериментальных данных показывает, что РТО во всех случаях не ухудшает, а в большинстве случаев увеличивает стойкость МОП ИМС к воздействию ИИ в среднем на 15%.

3. Разработана методика проведения РТО МОП ИМС с оптимизированными параметрами режима.

Материалы диссертации опубликованы в работах, на которые даны авторские ссылки:

1. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Анализ изменения энтропии при радиационной обработке МОП-структуры. Сб. тезисов 10-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: Т. 1 – Екатеринбург – Красноярск: издательство АСФ России, 2004. – с. 246.

2. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Изменение структуры и термодинамических параметров оксида кремния при температурной обработке после облучения. Научная сессия МИФИ-2005. Сб. научных трудов, М.: МИФИ, 2005.

3. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Повышение стабильности структур МОП ИМС при радиационно-термической обработке. Научная сессия МИФИ-2006. Сб. научных трудов, М.: МИФИ, 2006.

4. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Изменение концентрации разорванных связей в пленке оксида кремния МОП структуры при воздействии ионизирующего излучения. Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов, М.: МИФИ, 2007.

5. Н.А. Авдеев, Ю.А. Воронов, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Изменение концентрации ловушечных центров в оксиде кремния МОП структуры при разных режимах радиационно-термической обработки. Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов, М.: МИФИ, 2008.

6. М.А. Булушева, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов, А.В. Скородумова. Изменение концентрации поверхностных состояний в структуре кремний-оксид кремния при длительном хранении. Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов, М.: МИФИ, 2008.

7. Попов В.Д., Протопопов Г.А. Оптимизация параметров режима радиационно-термической обработки МОП ИМС. // Радиационная стойкость электронных систем - «Стойкость-2010». Научно-техн. сб. Вып.13. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 133-134.

8. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Изменение энтропии атомарной структуры пленки оксида кремния при радиационно-термической обработке. // Микроэлектроника, 35 (5), 304 (2006); а также: V.D. Popov and G.A. Protopopov. Effect of Ionizing Irradiation and Thermal Annealing on the Entropy of the Atomic System of a SiO<sub>2</sub> Film // Russian Microelectronics, 35 (5), (2006), p. 304.

9. Г.М. Воронкова, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Уменьшение плотности ловушечных центров в оксиде кремния при радиационно-термической обработке. // Физика и техника полупроводников, 41 (8), (2007), с.977-980; а также: G.M. Voronkova, V.D. Popov and G.A. Protopopov. A Decrease in the Density of Trapping Centers in Silicon Oxide as a Result of Radiation-Thermal Treatment // Semiconductors, 41 (8), (2007), p. 958.

10. Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры. // Физика и техника полупроводников, том 44, вып. 4, 2010. С. 527-532; а также: M.A. Bulusheva, V.D. Popov, G.A. Protopopov, and A.V. Skorodumova. Physical Model of MOS Structure Aging // Semiconductors, 44 (4), (2010), p. 508.

11. В.Д. Попов, Г.А. Протопопов. Оптимизация параметров режима радиационно-термической обработки МОП ИМС. // Вопросы атомной науки и техники, в печати.