



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

14-99-286

На правах рукописи

УДК 538.971

538.975

---

К-28

**КАСЧИЕВА**  
Соня Бойчева

**ГЕНЕРИРОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ  
В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ-ОКИСЬ-ПОЛУПРОВОДНИК**

Специальность: 01.04.07 — физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 1999

Работа выполнена в Институте физики твердого тела Болгарской Академии наук, в Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор  
доктор технических наук,  
профессор  
доктор химических наук,  
профессор

Реутов В.Ф.

Рыжиков И.В.

Мчедлишвили Б.В.

Ведущая организация:

Институт физики металлов УОРАН, г.Екатеринбург

Защита состоится в часов

На заседании диссертационного совета Д047.01.05

при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна Московской  
области


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан

1999 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

 А.Г.Полеко

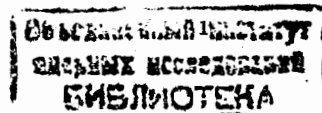
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы:** Разработка приборов современной микроэлектроники, характеризующихся высокой плотностью упаковки элементов, базируется на глубоком познании процессов, протекающих на поверхности и в тонких приповерхностных областях полупроводников и таким образом непосредственно связана с развитием физики поверхности полупроводников. Основным элементом дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем современной микроэлектроники является многослойная структура типа Металл-Диэлектрик-Полупроводник (МДП). Поскольку поверхностные эффекты в полупроводниках непосредственно влияют на надежность и стабильность работы приборов, изучение физики поверхности полупроводников с помощью МДП структур чрезвычайно важно для современной полупроводниковой технологии.

Широкое применение МДП структур в аппаратуре космической и специальной техники привело к необходимости повышения радиационной стойкости приборов, созданных на их основе. Исследование процессов генерации и отжига радиационных дефектов, тестирование на радиационную стойкость и увеличение стойкости МДП структур становятся необходимым этапом производства современных полупроводниковых приборов и являются новым, важным направлением радиационной физики конденсированных сред.

Хотя сегодня известны МДП структуры, изготовленные на различных полупроводниковых материалах, таких как Ge, GaAs, InP, Si, с использованием различных диэлектрических слоев, из всех МДП структур наиболее важными являются структуры Металл-Окись-Полупроводник (МОП) на основе кремния - (металл - SiO<sub>2</sub> - Si), которые получили наибольшее распространение и которые являются предметом исследований настоящей работы.

Открытие пассивирующих свойств окиси кремния привело к разработке планарной технологии, которая стала наиболее распространенной в современном полупроводниковом приборостроении. В настоящее время большинство приборов микроэлектроники выполнены на основе структур типа МОП.



Наряду с окислом, граница раздела Si-SiO<sub>2</sub>, возникающая при термическом окислении кремния, является важнейшей частью МОП структур. От качества этой границы зависят электрофизические характеристики МОП транзисторов и интегральных схем, их стабильность и радиационная стойкость.

Многослойный характер МОП структур, наличие границ раздела между отдельными материалами (Металл-Окись и Окись-Полупроводник), с различными механическими, оптическими и электрофизическими свойствами, создает специфическую чувствительность к радиации и приводит к следующим основным результатам: а) генерирование положительного встроенного заряда в окисле; б) генерирование поверхностных электронных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и с) образование точечных радиационных дефектов в полупроводниковой подложке.

В рамках планарной технологии ионная имплантация является отдельным технологическим этапом производства полупроводниковых приборов. Метод ионной имплантации имеет ряд преимуществ в процессе легирования полупроводников по сравнению с термической диффузией. Основные достоинства ионной имплантации заключаются в том, что она протекает при низкой температуре и позволяет строго контролировать дозу, глубину и однородность имплантированных примесей. С помощью имплантации можно изменить уровень легирования полупроводника, создавать слои на определенной глубине с концентрацией носителей зарядов обоих типов, которые необходимы при изготовлении полевых транзисторов и интегральных микросхем различного применения. Несмотря на эти достоинства, сама имплантация создает радиационные дефекты, которые желательно устранять, прогревая имплантированный образец не выше 300-400° С. Изучение процессов ионной имплантации, природы радиационных дефектов, отжига этих дефектов и других вопросов, связанных с имплантацией полупроводников, являются сравнительно новым и перспективным направлением физики полупроводников, обеспечивающим дальнейшее применение этого метода в современной микроэлектронике.

Несмотря на большое количество накопленных экспериментальных и теоретических данных, физика процессов, происходящих в окисле и на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> при облучении или имплантации структур Si-SiO<sub>2</sub>, в настоящее время еще не полностью изучена. Это связано с тем, что накопление радиационно-индуцированного заряда в МОП структурах сильно зависит от многих факторов, таких как свойства исходного материала, технология получения окисла, материала диэлектрика, накопления примесей в подложке и окисле, обработки структур после окислительного процесса, условий облучения и имплантации, пост-радиационной обработки структур и др. Предложенные теоретические модели обычно объясняют в той или иной степени лишь часть наблюдаемых экспериментальных результатов.

Представленные выше положения раскрывают актуальность и значимость предложенной работы. Актуальность настоящей работы определяется и тем, что создание новых типов приборов и интегральных схем на основе МОП структур, субмикронная и другие новые технологии производства постоянно увеличивают требования к электрофизическим характеристикам тонких приповерхностных слоев полупроводника, а также к стабильности диэлектрических покрытий.

Проведенные в диссертационной работе исследования направлены на изучение процессов генерации и отжига радиационных дефектов в МОП структурах, на улучшение электрофизических характеристик и увеличение радиационной стойкости приборов, работающих в ионизирующей среде. Они являются актуальными и важными для нового и перспективного направления - физики радиационных эффектов в многослойных структурах, - находящегося на грани физики поверхности полупроводников и радиационной физики конденсированных сред.

Основная цель настоящей работы заключается в комплексном исследовании природы физических процессов, протекающих при взаимодействии гамма лучей, высокоэнергетических электронов и ионов различных химических элементов со структурами МОП и, в частности, состоит: 1) в изучение процессов генерации дефектов на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, в приповерхностной области кремния и в окисле кремния при облучении и имплантации; 2) в исследование процессов эволюции дефектов ионной имплантации при их термическом,

плазменном и других нетрадиционных видах отжига и 3) в определение и увеличение радиационной стойкости МОП структур.

Для реализации поставленной цели решались следующие научные задачи:

1. Усовершенствование вольт/фарадных (квазистатического и ВЧ C/V) и ТОЗ методов, позволяющих исследовать основные свойства многослойных структур: энергетические спектры поверхностных электронных состояний и глубоких уровней в области пространственного заряда полупроводника и процессы накопления заряда в окисле облученных и имплантированных МОП структур.

2. Изучение процессов генерации радиационных дефектов, полученных при облучении гамма лучами, высокоэнергетическими электронами или при имплантации различных ионов, а также в результате двойной обработки - облучения имплантированных МОП структур.

3. Изучение особенностей процессов реконструкции, взаимодействия, пассивации и отжига дефектов имплантации В, О, Si, He, Ar и др. ионов, при термической, плазменной, UV и рентгеновской обработке Si-SiO<sub>2</sub> структур.

4. Разработка методов улучшения радиационной стойкости МОП структур с помощью уменьшения концентрации микропримесей, постокислительного охлаждения и циклической обработки структур.

Научная новизна настоящей работы заключается в следующем:

1. Впервые проведено комплексное исследование влияния электронного (высокоэнергетического 11-18 МэВ) облучения на МОП структуры. Определены энергии, плотности и сечения захвата дефектов облучения.

2. Впервые обнаружен и объяснен процесс радиационно-стимулированного окисления МОП структур (на основе n-Si) при облучении высокоэнергетическими электронами. Установлено, что наблюдаемый эффект блокируется предварительной имплантацией n-типа структур и не наблюдается при облучении p-типа МОП структур.

3. Впервые обнаружены и изучены эффекты отжига радиационных дефектов ионной имплантации в приповерхностном слое полупроводника при УФ обработке структур SiO<sub>2</sub>-Si. Показано, что в зависимости от дозы УФ облучения дефекты ионной имплантации в МОП структурах или отжигаются, или создаются

новые дефекты, причем, процесс генерации новых дефектов может начаться как до, так и после полного отжига дефектов имплантации.

4. Установлены закономерности термического и плазменного (r.f.) отжига имплантационных дефектов в приповерхностном слое кремния и на границе раздела SiO<sub>2</sub>-Si. Продемонстрирована определяющая роль водорода в этих процессах. Впервые предложены новые комбинированные обработки многослойных структур, сочетающие термический (в молекулярном водороде) и r.f. плазменный (в водородной плазме) отжиги дефектов имплантации.

5. В разработке, создании и использовании новых методов увеличения радиационной стойкости МОП структур на основе: а) уменьшения концентрации примесей, накапливающихся во время производства МОП структур с помощью радиационно-стимулированного геттерирования; б) циклической обработки МОП структур (цикл состоит из последовательных обработок МОП структур низкими дозами гамма лучей и низкотемпературным термическим отжигом и в) постокислительной обработки МОП структур в среде кислорода.

Диссертация имеет практическую ценность в области развития прикладных вопросов физики поверхности полупроводников и радиационной физики конденсированных сред, которая заключается в следующем:

1. В усовершенствовании вольт/фарадных и ТОЗ методов, позволяющих исследовать основные свойства облученных и имплантированных МОП структур.

2. В разработке новых технологических процессов отжига имплантированных SiO<sub>2</sub>-Si структур, таких как УФ отжиг и X-лучевая обработка структур.

3. В разработке новых методов увеличения радиационной стойкости МОП структур.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс усовершенствованных методов изучения радиационных дефектов в МОП структурах, полученных в результате различных видов облучений и имплантации.

2. Результаты по изучению процессов дефектообразования в МОП структурах, облученных высокоэнергетическими электронами с энергиями более 11 МэВ.

а) Радиационно стимулированное окисление п-типа Si-SiO<sub>2</sub> структур при облучении высокоэнергетическими электронами.

б) Результаты по взаимодействию дефектов ионной имплантации высокоэнергетическими электронами.

3. Результаты по изучению процессов отжига имплантационных дефектов в МОП структурах традиционными и нетрадиционными методами.

а) Эффекты отжига дефектов имплантации при УФ обработке Si-SiO<sub>2</sub> структур.

4. Комплекс методов увеличения радиационной стойкости МОП структур:

а) уменьшение концентрации нежелательных примесей в Si-SiO<sub>2</sub> структурах в результате геттерирования кремниевых пластин,

б) циклическая обработка МОП структур (облучение гамма лучами низкой дозы + низкотемпературный термический отжиг),

в) постокислительное охлаждение Si-SiO<sub>2</sub> структур в кислородной среде.

Можно считать, что результаты приведенного цикла работ определяют новое актуальное направление в физике полупроводников и диэлектриков, а так же в радиационной физике конденсированных сред – радиационные дефекты в МОП структурах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

Физика конденсированных сред - ISCMP (7-10) (Варна-1992, 1994, 1996, 1998) в Болгарии; VI Всесоюзном Совецании по Физике Поверхностных явлений в Полупроводников, (Киев 1987); International Workshop on Ion Implantation in Prague 1985.; Conference of Semiconductor Surfaces & Interfaces (Reinhardtbrunn-1983) и Energy Pulse Modification on Semiconductors & Related Materials (Dresden-1984) в Германии; Electronic Properties of Metal/Non-Metal Micro System (EPMS-1993) 4-th International Workshop - Sheffield, в Англии и 5-th International Workshop - Wroclaw-1995, Poland; 10-th International Conference on Ion Beam Modification of Materials - (IBMM-1996, Los Alamos) and 11-th (IBMM-1998, Amsterdam); 9-th Radiation Effect in Insulators (Knoxville -1997, USA) и др.

**Публикации.** По материалам, вошедшим в настоящую диссертацию, опубликовано более 80 работ. Основные результаты представлены в 36 научных статьях автора, опубликованных в болгарских и международных научных журналах, список которых приведен в конце автореферата. В него не входят доклады на конференциях.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В начале каждой главы формулируется постановка задачи и краткое изложение результатов, а в конце - выводы и список используемой литературы. Диссертация содержит 134 страниц текста, включающего 56 рисунков, 13 таблиц и библиографию из 192 ссылки.

### Основное содержание работы

**Во введение** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель и задачи работы, излагаются перспективы применения этих исследований, содержится краткая характеристика каждой главы и заключения. В конце приведен список международных научных конференций, на которых докладывалась и обсуждалась часть включенных в диссертацию работ и перечень научных журналов, в которых опубликованы основные результаты работы.

**В первой главе:** *Усовершенствование вольт/фарадных методов при исследовании облученных и имплантированных МОП структур:* приведены результаты по усовершенствованию одних из самых распространенных методов диагностики многослойных структур.

Предложен метод усовершенствования квазистатической C/V методики при изучении энергетического спектра поверхностных состояний, расширяя исследуемую часть запрещенной зоны полупроводника. Предлагается протекающий через структуру ток записывать при возрастании и при уменьшении приложенного напряжения, меняющегося по линейному закону. Среднее между их абсолютными значениями, является величиной тока, протекающего через структуру, свободную от утечек. В результате сканируемая с удовлетворительной точностью часть запрещенной зоны полупроводника увеличивается (в случае кремния от E<sub>c</sub>-0.15 до E<sub>c</sub>-0.95 eV, - Рис.1). Такую широкую часть запрещенной зоны полупроводника не удается обследовать другими емкостными методами.

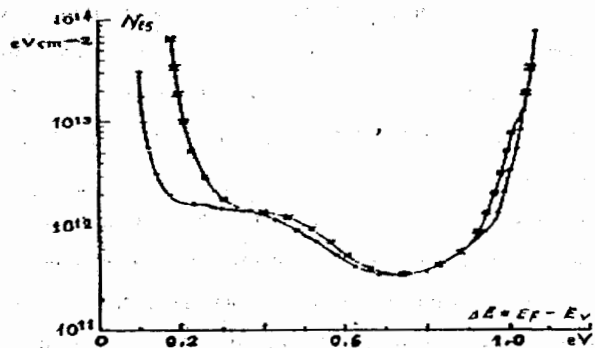


Рис.1. Увеличение исследуемой области запрещенной зоны кремния с помощью предложенного усовершенствования квазистатической C/V методики.

Проведен теоретический анализ высокочастотных C/V характеристик имплантированных МОП структур с учетом энергии и дозы внедряемых ионов и показано, что в зависимости от типа проводимости подложки и толщины окисла в тонком приповерхностном слое Si образуются p-n или n-p переходы. Их емкости объясняют уменьшение емкости окисла имплантированных структур. Предложенная модель дает возможность определить параметры нарушенной имплантацией приповерхностной области Si (глубину, концентрацию дефектов и толщину дефектного слоя). На основе изученного эффекта предложен метод оценки концентрации активных примесей в полупроводнике по известной энергии ионного пучка и по спаду величины максимальной емкости.

Для определения параметров ловушек, ответственных за наблюдаемые спектры ТОЗ, в настоящей работе предложен метод "полевой очистки", которой заключается в последовательном уменьшении величины напряжения, прикладываемого к металлическому электроду и различным образом обогащающего приповерхностный слой полупроводника основными носителями заряда. Уменьшение напряжения приводит к различному заполнению ловушек на границе раздела Д/П по глубине запрещенной зоны полупроводника. "Полевая очистка" эффективно использована в случае поверхностных центров захвата, поскольку она позволяет более точно (по сравнению с "термической очисткой") выявить пространственное распределение ловушек по отношению к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Очистка спектров ТОЗ позволяет определить глубину залегания каждой ловушки.

**Во второй главе:** Влияние облучения гамма лучами, высокоэнергетическими электронами и нейтронами на вольт/фарадные и ТОЗ характеристики МОП структур: рассматривается действие гамма, электронного и нейтронного излучений на электрофизические характеристики МОП структур.

Изучено влияние гамма лучей на плотность поверхностных состояний и заряд в окисле МОП структур с разной толщиной окисла. Показано, что при толщине <100 Å, заряд в окисле не образуется.

Установлено, что по сравнению с облучением при комнатной температуре, МОП структуры становятся менее чувствительными к гамма радиации проведенной при температуре жидкого азота. Полученные при облучении при температуре жидкого азота два типа дефектов с энергией E<sub>c</sub>-0,16 эВ и E<sub>c</sub>-0,40 эВ, связываются с А- и Е- центрами соответственно:

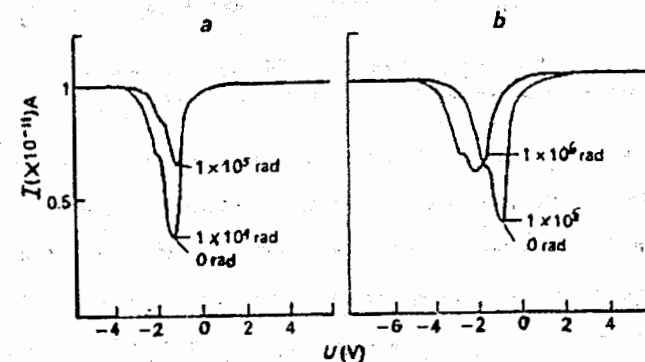


Рис.2. Квазистатические C/V характеристики МОП структур, облученных гамма лучами при комнатных температурах (а) и при температурах жидкого азота (б).

Повышение температуры облучения до 300 К позволяет регистрировать методом ТОЗ только один вид более устойчивых дефектов типа А-центров. Видно, что повышение температуры облучения ведет к дезинтеграции некоторых комплексных дефектов, к уменьшению эффективности введения Е-центров и к увеличению вероятности введения А-центров. Облучение при комнатной температуре, делает структуру более чувствительной к гамма радиации. Изменение характеристик МОП структур наступает при более низких дозах, а дозы больше 10<sup>6</sup> rad разрушает окисел (Рис.2).

Впервые проведено комплексное исследование влияния электронного (11-18 МэВ) облучения на МОП структуры. МОП структуры облучались в вакууме высокоэнергетическими электронами в диапазоне 15-60 с. Методом ТОЗ показано, что после облучения n-Si структур в запрещенной зоне кремния образуются четыре новых уровня захвата, плотность которых зависит от дозы

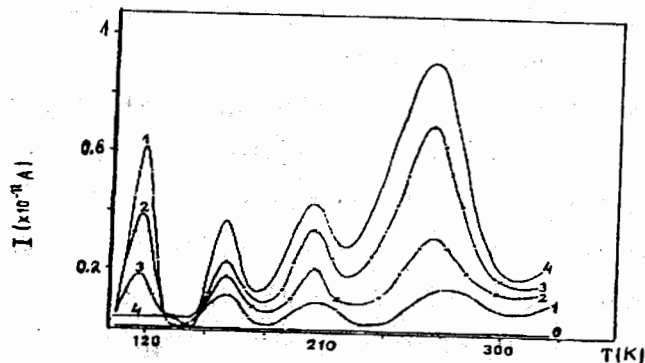


Рис.3. Спектры ТОЗ МОП структур облученных 11 Мэв электронами: кривая 0 - до облучения, кривые 1-4 после облучения в течении 15, 30, 45 и 60 сек. соответственно.

электронного облучения – Рис.3. Определены энергетические уровни, концентрации и сечения захвата соответствующих радиационных дефектов. Установлено, что с ростом дозы облучения плотность дефектов, соответствующих мелким уровням, падает. Одновременно с этим возрастает плотность дефектов, соответствующих более глубоким уровням. Методами C/V показано, что с увеличением дозы облучения электронов заряд в окисле возрастает, а емкость МОП структур падает. Медленное уменьшение емкости окисла можно объяснить либо с уменьшением диэлектрической постоянной  $\epsilon_{ок}$ , либо с увеличением толщины окисла. Выяснение этого вопроса привело к более детальным исследованиям другими более чувствительными методами. Толщина окисла каждого образца измерялась до и после каждой обработки эллипсомером с точностью 2А.

Методами X-лучевой эмиссионной спектроскопии и техникой ядерных реакции показано, что концентрация кислорода на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> увеличивается с возрастанием дозы облучения. Рис.4. показывает, что ХЭС спектры n-Si образцов до облучения и после 15 с облучения, могут быть

представлены суперпозицией спектров SiO<sub>2</sub> и c-Si в соотношении 0,46:0,54-рис. 4-а. После 30 с облучения это соотношение (SiO<sub>2</sub>:c-Si), меняется в пользу окисла и составляет уже 0,76:0,27.

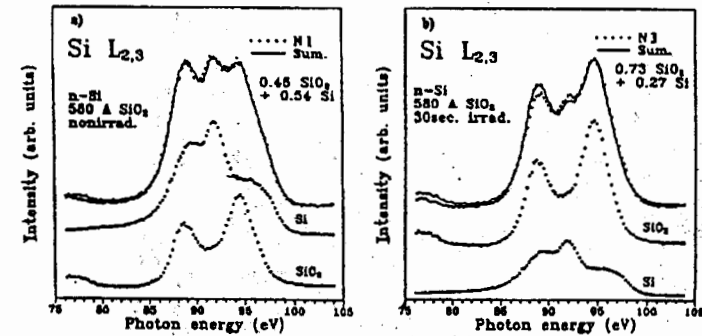


Рис.4. ХЭС спектры n-Si-SiO<sub>2</sub> структур представлены суперпозицией спектров SiO<sub>2</sub> и c-Si в соотношении: (а) до и после 15 с облучения 12 Мэв электронами - 0,46:0,54; (в) после 30 с облучения - 0,76:0,27.

Измерены плотности атомов кислорода с помощью метода ядерных реакции типа: <sup>16</sup>O(d, p)<sup>17</sup>O показали те же результаты. Методом эллипсометрии показано, что в результате увеличения концентрации кислорода на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> МОП структур, с возрастанием дозы облучения происходит увеличение толщины окисла, что связано с радиационно-индуцированным окислением n-Si-SiO<sub>2</sub> структур. Наблюдаемые эффекты блокируются предварительной имплантацией структур и не наблюдаются при облучении МОП структур р-типа высокоэнергетическими электронами.

Исследовано влияние нейтронного облучения на структуры n- и р-типа Si-SiO<sub>2</sub> с разными окислами. Установлено, что радиационные дефекты МОП структур, после облучения нейтронами, можно отжечь при температуре 400° С.

**В третьей главе: Радиационные дефекты в ионноимплантированных МОП структурах:** исследованы спектры радиационных дефектов на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, в тонкой приповерхностной области и глубоко в Si, полученные в результате имплантации разных ионных пучков (В, Si, Ag и др.). Использованы два подхода введения дефектов - воздействием ионов с различной энергией или воздействием одной энергии ионов на МОП структуры с разной толщиной

оксида. Определены энергии уровней, сечения захвата, плотность и природа основных дефектов.

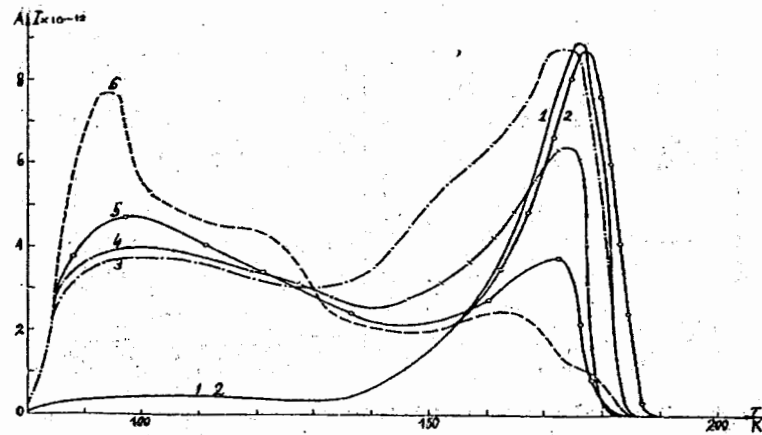


Рис.5. Спектры ТОЗ спектры МОП структур с разной толщиной оксида имплантированных ионами В<sup>+</sup> с энергией 50 КэВ: 1- 165А, 2- 330А, 3- 1060А, 4- 1740А, 5- 2050А и 6- 2820А.

Сопоставление полученной зависимости с рассчитанными профилями концентрации примеси позволяет сделать некоторые заключения о пространственной локализации наблюдаемых радиационных дефектов. Появление и рост плотности мелких центров происходит при энергиях ионного пучка и толщины оксида, при которых хвост распределения легирующей примеси достигает границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Максимальная плотность этих дефектов соответствует энергиям, при которых максимум концентрации легирующей примеси расположен на границе раздела. Когда имплантация ионов бора происходит в основном в кремний, плотность мелких центров уменьшается. Это свидетельствует о преимущественной генерации мелких центров на границе раздела или в непосредственной близости от нее.

Установлены и объясняются температурные и частотные зависимости модуля проводимости МОП структур, имплантированных ионами кремния, которые создают дефекты, действующие как глубокие ловушки для носителей тока. Продемонстрировано, что это позволяет оценить параметры дефектного приповерхностного слоя полупроводника.

Исследовано влияние двойной обработки МОП структур - эффекты облучения после предварительной ионной имплантации. Показано, что воздействие лазерным облучением на имплантированные МОП структуры приводит к формированию новых глубоких уровней.

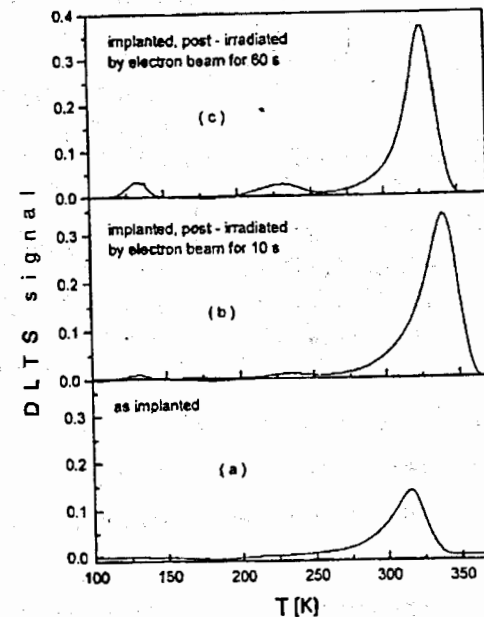


Рис.6. Типичные DLTS спектры структур Si-SiO<sub>2</sub>, имплантированных 50 КэВ ионами В<sup>+</sup> до (а) и после облучения 12 МэВ электронами в течении 10 с (в) и 60 с (с).

Облучение имплантированных структур высокоэнергетическими электронами приводит к формированию новых мелких уровней и к увеличению плотности тех дефектов, полученных в результате ионной имплантации. Рис.6 показывает типичные DLTS спектры имплантированных ионами бора МОП структур до (рис.6-а) и после облучения 12 мэВ электронами в диапазоне 10 сек. (рис.6-в) и 60 сек. (рис.6-с). DLTS характеристики показали, что имплантация 50 КэВ ионов бора создает в МОП структурах с оксидом толщиной 165А только дефекты одного типа, что дополнительное облучение МОП структур 12 МэВ электронами создает 3 вида дефектов с энергией, соответственно, E<sub>c</sub>-0,21, E<sub>c</sub>-0,32 и E<sub>c</sub>-0,40 эВ. С увеличением дозы облучения концентрация дефектов возрастает. Основные параметры дефектов: энергия, сечение захвата и



плотность, представлены в Таблице 1. Предполагается, что последний основной пик связан с дефектами типа P-V или E-центров. Эти дефекты локализованы в

Таблица 1.

$E_c - E$ (eV)	0.21	0.32	0.40	Total
As implanted				
$\sigma / \text{cm}^2$	---	---	$1.60 \times 10^{-17}$	$1.60 \times 10^{-17}$
$N_t / \text{cm}^2$	---	---	$1.80 \times 10^{12}$	$1.80 \times 10^{12}$
Implanted, post-irradiated by electron beam for 10 s				
$\sigma / \text{cm}^2$	$6.45 \times 10^{-15}$	$3.30 \times 10^{-16}$	$3.15 \times 10^{-15}$	$9.93 \times 10^{-15}$
$N_t / \text{cm}^2$	$3.11 \times 10^9$	$3.64 \times 10^9$	$2.52 \times 10^{12}$	$2.52 \times 10^{12}$
Implanted, post-irradiated by electron beam for 60 s				
$\sigma / \text{cm}^2$	$3.76 \times 10^{-13}$	$2.09 \times 10^{-14}$	$1.46 \times 10^{-16}$	$3.97 \times 10^{-13}$
$N_t / \text{cm}^2$	$2.51 \times 10^9$	$4.26 \times 10^{10}$	$3.15 \times 10^{12}$	$3.16 \times 10^{12}$

Si, в близости максимума ионного распределения, далеко от границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>. 12 МэВ электроны проникая через структуру, взаимодействуют с существующими дефектами, увеличивая их концентрацию, и создают два вида новых дефектов (мелких уровней), расположенных на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Плотность дефектов, полученных в результате электронного облучения, говорит в пользу того, что облучение высокоэнергетическими электронами создает электрически активные дефекты на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> более интенсивно, чем ионная имплантация.

**В четвертой главе:** Отжиг радиационных дефектов, полученных в результате ионной имплантации структур Si-SiO<sub>2</sub>: представлены результаты термического, плазменного и радиационно стимулированного отжига, которые являются перспективными обработками структур после ионной имплантации.

Показано, что термический отжиг дефектов ионной имплантации в МОП структурах существенно зависит от их пространственного расположения по отношению к разделительной поверхности диэлектрик-полупроводник. На "развал" центров существенно влияет близость границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> и взаимное пространственное расположение центров.

С целью выявить эффект плазмы, МОП структуры с радиационными дефектами, полученными в результате ионной имплантации бора или кислорода, обрабатывались в водородной плазме или термически отжигались в атмосфере молекулярного водорода. Эксперимент показал, что спектры имплантированных

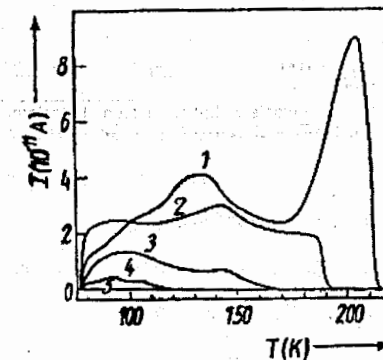
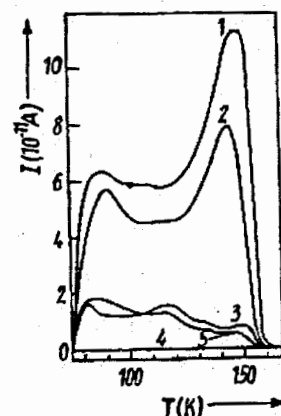


Рис.7. Спектры ТОЗ n-Si-SiO<sub>2</sub> структур, имплантированных ионами O<sup>+</sup>, после: 1- ионной имплантации с энергией 130 Кэв; 2- плазменного отжига при 100<sup>0</sup> С; 3- плазменного отжига при 200<sup>0</sup> С; 4- плазменного отжига при 250<sup>0</sup> С и 5- плазменного отжига при 300<sup>0</sup> С.

образцов зависят от типа подложки и от вида имплантированных ионов. На Рис.7 и 8 представлены спектры ТОЗ имплантированных кислородом n-Si и p-Si образцов до и после плазменной обработки. Параметры дефектов имплантации кислорода представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Параметры дефектов ионно имплантированных кислородом Si-SiO<sub>2</sub> структур

	n - silicon				p - silicon		
Energy (eV)	0.17	0.22	0.29	0.34	0.21	0.26	0.45
$\sigma / \text{cm}^2$	$6.5 \times 10^{18}$	$4.5 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{18}$	$5.0 \times 10^{17}$	$4.1 \times 10^{19}$	$7.5 \times 10^{18}$	$1.0 \times 10^{16}$
$N_t / \text{cm}^2$	$2.5 \times 10^{12}$	$2.5 \times 10^{12}$	$3.3 \times 10^{12}$	$1.2 \times 10^{12}$	$2.0 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^{12}$	$4.2 \times 10^{12}$
Identification	O-V	V-V	---	---	V-V	V-O-B	---

Плазменный отжиг n- и p-типа образцов уменьшает общую концентрацию имплантационных дефектов, и сужает спектров ТОЗ к более низким

температурам (Рис. 7 и 8, кривые 2-4). Видно, что глубокие уровни отжигаются в водородной плазме при более низких температурах, чем мелкие уровни. Эффект водородной плазмы становится более очевидным при сравнении с результатами термического отжига образцов в текущем молекулярном водороде, при тех же температурах и той же продолжительности обработки. Поскольку после плазменного отжига при  $300^{\circ}\text{C}$  ТОЗ спектр не наблюдается (кривая 4), а после термического отжига при  $400^{\circ}\text{C}$  спектр все еще регистрируется, можно заключить, что с точки зрения низкотемпературной обработки образцов, плазменный отжиг более эффективен.

В работе детально рассмотрено влияние температуры образцов во время плазменной обработки на отжиг дефектов ионной имплантации. Особое внимание уделено комбинированному воздействию плазменного и термического отжига дефектов (рис.9).

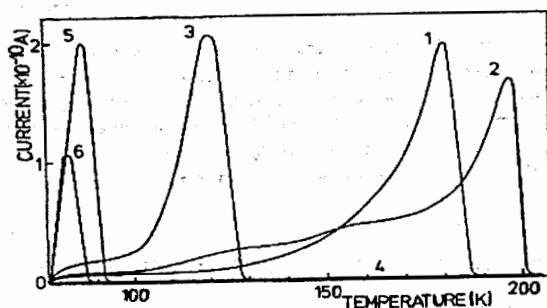


Рис.9. Спектры ТОЗ p-Si-SiO<sub>2</sub> структур, имплантированных ионами В<sup>+</sup> с энергией 50 Кэв - кривая 1; 2 - после плазменного отжига при  $100^{\circ}\text{C}$ ; при 3 -  $200^{\circ}\text{C}$ ; 4 - при  $300^{\circ}\text{C}$ ; 5 - термического отжига в молекулярном водороде при  $300^{\circ}\text{C}$ ; 6 - плазменного отжига при  $300^{\circ}\text{C}$  + термического отжига в вакууме при  $250^{\circ}\text{C}$ .

Результаты по обработке МОП структур в водородной плазме свидетельствуют о том, что процессы реконструкции, пассивации и отжига дефектов ионной имплантации протекают подобно термическому отжигу, но при более низких температурах.

На основе полученных результатов предположено, что взаимодействие плазмы с дефектами при температурах в диапазоне  $100^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$  порождает

прежде всего реконструкцию дефектов, а присутствие атомарного водорода делает возможной электрическую пассивацию этих дефектов. Прогревание в вакууме или в молекулярном водороде частично выделяет водород и таким образом увеличивает плотность электрически активных реконструированных дефектов. Показано, что если дефекты ионной имплантации реконструированы до обработки в плазме, то становится возможным уменьшение температуры пассивации дефектов.

Одной из первых работ по исследованию взаимодействия УФ облучения с дефектами имплантации в МОП структурах является работа [23]. На Рис.10. показано изменения в спектре ТОЗ имплантированных Ag и облученных после имплантации УФ МОП структур. Наблюдается перестройка спектров ТОЗ и

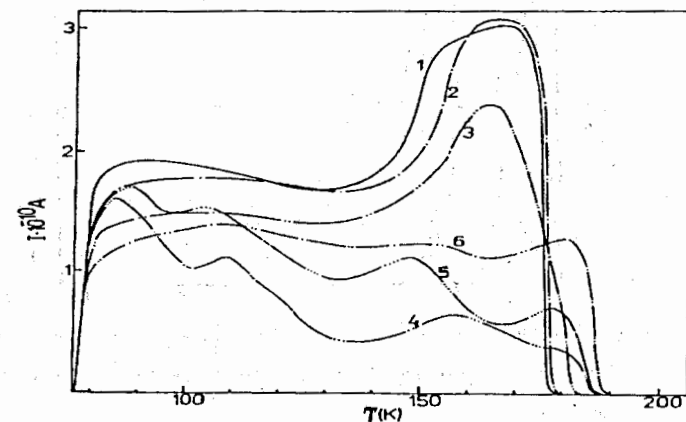


Рис.10. Спектры ТОЗ p-Si-МОП структур, имплантированных ионами Ag<sup>+</sup>, с энергией 130 Кэв, с толщиной окисла 1200А - кривая 1; после 30 мин. УФ облучения - 2; 60 мин. - 3; 90 мин. - 4; 160 мин. - 5 и 480 мин. - 6.

уменьшение плотности индуцированных имплантацией поверхностных состояний, которые являются результатом взаимодействия УФ с индуцированными на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> дефектами ионной имплантации. Из рис.10 видно, что после достаточно долгого УФ облучения (больше 90 минут), облучения амплитуда всех хорошо выявленных пиков в спектре ТОЗ начинает расти. Это говорит о том, что образование дефектов начинает преобладать над процессом отжига. Разница в поведении облучаемых УФ и термически

отожженных структур появляется после продолжительной обработки. Термическая обработка приводит к стабильному отжигу дефектов. При УФ облучении ситуация другая. В зависимости от дозы УФ облучения дефекты ионной имплантации либо отжигаются, либо создаются новые дефекты. В зависимости от вида ионной имплантации УФ может частично или полностью отжечь созданные ею дефекты. Оптимизация режимов UV облучения позволила полный отжиг дефектов имплантированных 10 КэВ He<sup>+</sup> ионами Si-SiO<sub>2</sub> структур (Рис.11). Процесс генерации дефектов начинает конкурировать с процессом отжига еще до ( в случае имплантации Ag) или после полного отжига дефектов имплантации (в случае имплантации He).

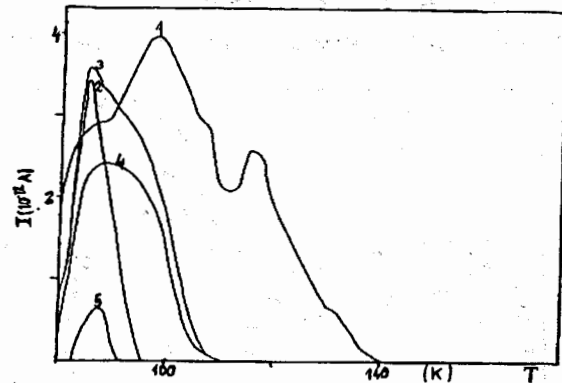


Рис.11. Спектры ТОЗ МОП структур, имплантированных ионами He<sup>+</sup>, с энергией 10 КэВ - кривая 1; после 15 мин УФ облучения -2; 150 мин. УФ облучения -3; 15 мин. термического отжига -4 и 30 мин. термического отжига -5.

В работе показано, что рентгеновское облучение ионно имплантированных МОП структур уменьшает температуру термического отжига дефектов имплантации.

**В пятой главе: Методы повышения радиационной стойкости МОП структур:** представлены и применены разработанные недавно методы, которые приводят к увеличению радиационной стойкости МОП приборов.

Первый метод состоит в уменьшении атомной концентрацией нежеланных примесей в МОП структурах с помощью радиационно стимулированного геттерирования. Концентрации быстро диффундирующих неконтролируемых металлических примесей, таких как натрий, медь, серебро и

магний в Si-SiO<sub>2</sub> структурах уменьшались с помощью геттерирования дефектами ионной имплантации. Обратную неполированную сторону p-Si пластины имплантировали Ag или В ионами с энергиями соответственно 46 или 20 кэВ и дозами 10<sup>14</sup> ион/см<sup>2</sup>. Пластины окислялись в атмосфере сухого кислорода + 6% HCl до толщины 34–50 нм. Окисление при 1050 °С после имплантации способствовало не только отжигу радиационных дефектов, накопленных в структурах при имплантации, но и их геттерированию. Образовавшийся окисел снимался с неполированных поверхностей всех образцов. С помощью НАА определялась концентрация неконтролируемых примесей, проникающих в структуры во время окисления кремниевых пластин.

Таблица 3

Impurities	Concentration (atoms / cm <sup>3</sup> ) in samples		
	non-implanted	B <sup>+</sup>	Ag <sup>+</sup>
Na	1.3 x 10 <sup>17</sup>	5.4 x 10 <sup>16</sup>	3.7 x 10 <sup>16</sup>
Cu	1.4 x 10 <sup>15</sup>	7.8 x 10 <sup>14</sup>	6.4 x 10 <sup>14</sup>
Ag	2.4 x 10 <sup>14</sup>	9.8 x 10 <sup>13</sup>	8.8 x 10 <sup>14</sup>
Mg	1.1 x 10 <sup>14</sup>	8.9 x 10 <sup>13</sup>	8.2 x 10 <sup>13</sup>

Из Таблицы 3 следует, что концентрация нежеланных примесей в предварительно имплантированных кремниевых структурах ниже, чем в неимплантированных. Эксперимент показал, что ни вид имплантированных ионов, ни их химическая или электрическая активность не являются существенными, для захвата примесей с высокой подвижностью. Только дефекты, созданные ионной имплантацией, являются существенными в этом процессе.

В работе показано, что геттерирующий эффект не зависит от вида ионов, а только от локализации дефектов.

Метод циклической обработки состоит из последовательных обработок МОП структур гамма лучами дозой в 4,6x10<sup>3</sup> rad и термического отжига в среде аргона при 200<sup>0</sup> С в течении 10 минут. Циклическая обработка повторялась до

тех пор, пока радиационная стойкость структуры не достигала насыщения.

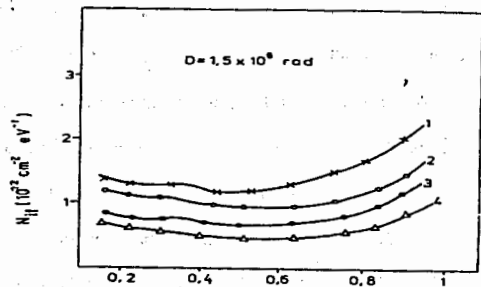


Рис.12. Распределение поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния без предварительной обработки (кривая 1), после первого цикла (кривая 2), (кривая 3) после второго, третьего и более циклов (кривая 4).

Приведена информация об поведении поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> после циклической обработки. Сравнивая распределение поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния облученных МОП структур, видно, что образцы без циклической обработки имеют самую высокую плотность состояний (кривая 1 на Рис.12). С увеличением числа циклов плотность поверхностных состояний постоянно уменьшается (кривые 2-4). После четвертого цикла обработки изменения в плотности состояний не наблюдается, что говорит о насыщении уровня радиационной стойкости структур.

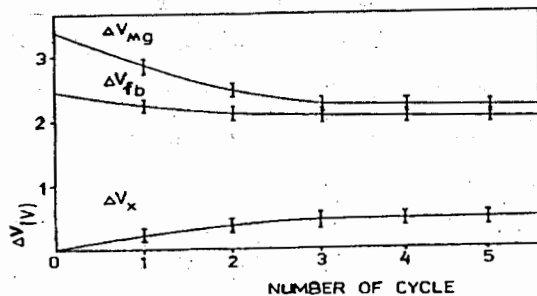


Рис.13. Изменения  $\Delta V_{fb}$ ,  $\Delta V_{mg}$  и  $\Delta V_x$  после гамма облучения дозой  $4,48 \times 10^6$  rad с возрастанием числа циклических обработок.

Исследовано влияние циклической обработки на количество накопленного заряда в окисле после облучения гамма лучами. Об индуцированном во время

облучения заряде в окисле можно судить по смещению C/V характеристик к отрицательным значениям напряжения. Рис.13 показывает изменения  $\Delta V_{mg}$ ,  $\Delta V_{fb}$  (смещения C/V характеристик в точках mg и fb) и  $\Delta V_x$  после облучения образца дозой  $5 \times 10^6$  rad гамма лучей при возрастании числа циклических обработок.  $\Delta V_x$  - величина гистерезисной петли, полученной при возрастании и уменьшении напряжения. Видно, что в течении первых трех циклов радиационная стойкость возрастает, а после четвертого цикла она подходит к насыщению.

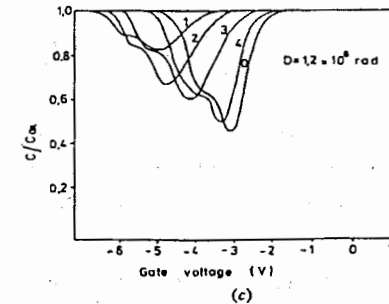
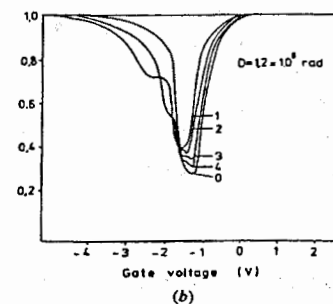
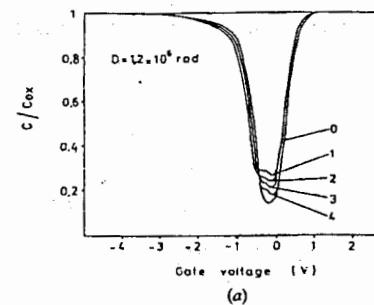


Рис.14. Квазистатические C/V характеристики МОП структур с толщиной окисла 160А - (а), 320А - (в) и 960А - (с), облученных гамма лучами с дозой  $1,2 \times 10^6$  rad до и после различного числа циклических обработок. Кривые 0 - без циклической обработки до облучения, кривые 1 - после первого цикла, кривые 2 после второго цикла и кривые 3 и 4 - после третьего и более циклов.

Методами C/V и ТОЗ показано, что влияние циклической обработки Si-SiO<sub>2</sub> структур более эффективно при более толстых окислах. Рис. 14-а свидетельствует о том, что при гамма облучении МОП структур с толщиной окисла 160 А, незначительно увеличивается количество ловушек на границе

раздела - (значения соотношения  $C/C_{ox}$  несколько возрастают), а заряд в окисле не накапливается - смещения кривых не наблюдается. Видно, что циклическая обработка уменьшает количество ловушек, созданных радиацией на границе раздела. При толщине 320 Å - (рис.14-в), кроме уменьшения количества ловушек на границе раздела, наблюдается и уменьшение плотности заряда в окисле с увеличением числа циклических обработок. Вышеописанные эффекты ярче выражены при толщине окисла 960 Å - (рис.14-с).

Метод постокислительной обработки состоит в охлаждении Si пластин после окисления в той же среде, в которой проводилось окисление структур. Согласно стандартной технологии, сразу после окисления, кремниевые пластины

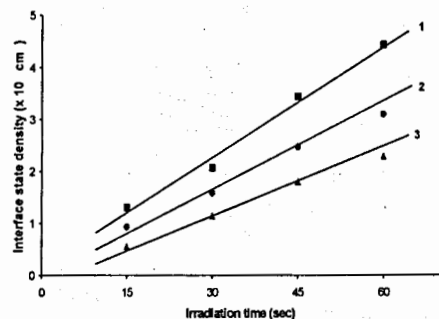


Рис.15 Изменение концентрации поверхностных состояний в зависимости от дозы электронного облучения для различных групп образцов: 1 - без постокисного охлаждения; 2 - охлаждение в азотной среде; 3 - охлаждение в кислородной среде.

вынимаются и охлаждаются на воздухе. В настоящей работе рассматривается влияние постокислительной обработки образцов Si-SiO<sub>2</sub> в различных средах на стойкость МОП структур по отношению к гамма облучению, облучению высокоэнергетическими электронами и ионной имплантации.

Эффект среды охлаждения Si-SiO<sub>2</sub> структур после окисления более ярко выявляется при их облучении высокоэнергетическими электронами. После окисления образцы разделялись на три группы: первая не охлаждалась в специальной среде; вторая группа охлаждалась в азотной, а третья в кислородной среде, т.е. в той среде, в которой произошло окисление. МОП

структуры, созданные на основе этих трех групп, одновременно облучались высокоэнергетическими (11 МэВ) электронами. Плотность индуцированных электронами поверхностных состояний на границе раздела измерялась методом ТОЗ. На Рис.15 показано изменение концентрации поверхностных состояний в зависимости от дозы электронного облучения для различных групп образцов. Видно, что охлажденные в кислородной среде структуры, имеют меньшую концентрацию поверхностных состояний.

Продемонстрировано, что при использовании каждого из этих методов или при их комбинированном использовании можно значительно повысить радиационную стойкость МОП структур.

В заключении сформулированы основные выводы и положения, которые выносятся на защиту.

### Основные результаты работы:

1. Предложен и применен новый метод усовершенствованной квазистатической C/V методики, которая расширяет исследуемую часть запрещенной зоны полупроводника. Распределение поверхностных состояний можно измерить с удовлетворительной точностью в случае кремния, в диапазоне от  $E_c-0,15$  до  $E_c-0,95$  эВ.

2. Впервые приведен подробный анализ изменения формы высокочастотных вольт-фарадных (C/V) характеристик МОП структур в зависимости от параметров приповерхностного потенциального барьера, образующегося при имплантации SiO<sub>2</sub>-Si структуры ионами. На основе изученного эффекта предложен новый метод диагностики концентрации активных примесей в имплантированном полупроводнике.

3. Предложен и применен новый метод очистки и обработки сложных спектров ТОЗ, позволяющий разделять объемные и поверхностные состояния и определять сечение захвата и энергетическое распределение поверхностных состояний, а также распределение каждого глубокого уровня по области пространственного заряда полупроводника.

4. Впервые проведены комплексные исследования высокоэнергетического электронного (11-12 МэВ) облучения на процессы в МОП структурах. Определены энергетические уровни, плотность и сечение захвата образовавшихся дефектов. Установлено, что с ростом дозы облучения заряд в окисле и плотность всех уровней (за исключением плотности самого мелкого уровня) возрастают.

5. Несколькими независимыми методами - C/V, XRS, ядерных реакций и эллипсометрии установлено радиационное стимулирование окисления n-типа кремниевых пластин при облучении высокоэнергетическими электронами (11-12 МэВ). Показано, что концентрация кислорода на границе раздела SiO<sub>2</sub>-Si возрастает, емкость окисла падает, что связано с увеличением толщины окисла. Наблюдаемый эффект блокируется предварительной имплантацией структур и не наблюдается при облучении p-типа МОП структур.

6. Определены параметры дефектов МОП структур, имплантированных ионами различных химических примесей. Исследовано влияние энергии имплантации и толщины окисла на генерацию дефектов в структурах SiO<sub>2</sub>-Si. Показано, что близость границы раздела SiO<sub>2</sub>-Si способствует образованию глубоких уровней в приповерхностном слое кремния, не меняя их энергетических характеристик.

7. Впервые показано, что МОП структуры с приповерхностным потенциальным барьером проявляют сильную температурную зависимость. Теоретическое и экспериментальное изучение процессов, ответственных за эту зависимость, показало, что при пониженных приповерхностных потенциальных барьерах температурная и частотная зависимости емкости или проводимости МОП структуры связаны с шунтированием потенциального барьера диффузионно-дрейфовыми токами. При этом проводимость шунтирующего тока экспоненциально связана с величиной приповерхностного потенциального барьера. На основе этого эффекта и разработанной теоретической модели предложены новые методы диагностики приповерхностного потенциального барьера в полупроводнике МОП структур и определения его величины, толщины

легированного приповерхностного слоя и эффективной концентрации легирующей примеси.

8. Установлено, что воздействие на структуры SiO<sub>2</sub>-Si мощным лазерным импульсом длительностью в несколько десятков наносекунд приводит к образованию значительной концентрации глубоких уровней в приповерхностном слое кремния, имеющих ту же энергетическую локализацию, что и уровни после ионной имплантации. При интенсивностях излучения, не вызывающих разрушения окисла, наблюдается невысокая степень активации имплантированной примеси.

9. Методом DLTS исследовано взаимодействие высокоэнергетического электронного облучения с дефектами ионной имплантации в кремниевой подложке МОП структур. Установлено, что электронное облучение в течении несколько десятков секунд увеличивает концентрацию дефектов ионной имплантации и создает новые, более мелкие, электрически активные дефекты на границе раздела SiO<sub>2</sub>-Si.

10. Проведено подробное изучение отжига дефектов ионной имплантации в МОП структурах:

а) Показано, что на термический отжиг глубоких уровней, влияет близость границы раздела SiO<sub>2</sub>-Si и взаимное пространственное расположение центров. Отжиг глубоких уровней локализованных вблизи границы раздела SiO<sub>2</sub>-Si, происходит одновременно с генерацией более мелких уровней, что приводит к частичной стабилизации этих уровней с ростом температуры.

б) Изучено влияние радиочастотной плазмы на дефекты ионной имплантации в МОП структурах. Показано преимущество плазменной обработки, которое состоит в том, что температура, при которой происходит реконструкция, взаимодействие и отжиг дефектов, ниже, чем при термическом отжиге.

в) Установлено, что если дефекты ионной имплантации реконструированы до обработки в плазме, то становится возможным понижение как температуры пассивации дефектов, так и температуры термического отжига.

г) Обнаружены и изучены эффекты отжига радиационных дефектов ионной имплантации и активации имплантированной легирующей примеси в приповерхностном слое полупроводника при УФ обработке структур SiO<sub>2</sub>-Si. Впервые показано, что в зависимости от дозы УФ облучения дефекты ионной имплантации в МОП структурах или отжигаются, или создаются новые дефекты. В зависимости от вида ионной имплантации УФ облучение может частично или полностью отжечь созданные ею дефекты, причем, процесс генерации новых дефектов может начаться как до, так и после полного отжига дефектов имплантации.

д) Установлено, что предварительная обработка МОП структур Х-лучами способствует полному термическому отжигу радиационных дефектов имплантации при относительно низких температурах - 450<sup>0</sup> С.

е) Показано, что эффект облучения МОП структур Х-лучами зависит от предыстории образца. Когда в образцах заранее созданы дефекты, облучение Х-лучами отжигает частично комплексные дефекты. При облучении неимплантированных образцов генерируется незначительное количество поверхностных состояний, а затем и заряд в окисле.

11) МОП структуры, облученные гамма лучами при температуре жидкого азота, являются более стойкими к радиации, чем образцы, облученные при комнатной температуре.

12) Предложен метод уменьшения концентрации нежелательных быстро подвижных примесей в структурах Si-SiO<sub>2</sub> с помощью радиационно стимулированного геттерирования. Методом нейтронного активационного анализа показано, что атомную концентрацию быстро диффундирующих металлических примесей Na, Cu, Ag, Mg в структурах Si-SiO<sub>2</sub> можно уменьшить, если до окислительного процесса имплантировать заднюю сторону кремниевых пластин. В процессе геттерирования существенную роль играют имплантационные дефекты, их местоположение, а химическая активность имплантированных ионов является несущественной.

13) Предложен и применен метод циклической обработки МОП структур, которой состоит из облучения гамма лучами низкой дозой и последующего

низкотемпературного термического отжига. Показано, что эффективность циклической обработки Si-SiO<sub>2</sub> увеличивается с возрастанием толщины окисла. С увеличением числа циклов плотность поверхностных состояний уменьшается, после чего наблюдается насыщение уровня радиационной стойкости структур.

14) Предложен метод постокислительной обработки образцов Si-SiO<sub>2</sub> с целью увеличения радиационной стойкости МОП структур. Эксперименты проводились на обработанных образцах, подвергавшихся гамма облучению, ионной имплантации и облучению высокоэнергетическими электронами. Показано, что эффект увеличения радиационной стойкости лучше всего выражен при охлаждении Si-SiO<sub>2</sub> структур (после окисления Si пластин) в кислородной среде, т.е. в среде, в которой проводилось окисление.

#### Основные публикации

1. S. Kaschieva, "Use of quasistatic C/V method in investigation the density of the states of Si-SiO<sub>2</sub> interface in MOS system", *Докл.БАН*, 27, N2, 181 (1974)
2. S. Kaschieva, L. Toncheva, I. Matev., Effect of  $\beta$ -radiation on MIS structure with thin SiO<sub>2</sub>, *Докл. БАН*, 29, 11, 1601, (1976)
3. В.С. Лысенко, А.В. Саченко, А.Н. Назаров, С.Б. Касчиева, М.М. Локшин "Влияние легирования ионами бора на вид вольт/фарадных характеристик МОП структур" *Болг.Физ.Журн.* 1, 57, (1978)
4. Проблемы физики поверхности полупроводников", Киев, Наукова думка, под ред. О.В.Снитко 139, 147, 316, (1981)
5. В.С. Лысенко, А.Н. Назаров, С.Б. Касчиева, М.М. Локшин Энергетический спектр радиационных дефектов в МОП структурах, имплантированных ионами бора различных энергий, *УФЖ* 23, 8, 1379, (1978).
6. В.С. Лысенко, А.Н. Назаров, С.Б. Касчиева, М.М. Локшин. Влияние лазерного облучения на электрофизические свойства границы раздела МДП структур, имплантированных ионами бора, *ФТП*, 11, 11, 2254 (1977).
7. С.Б. Касчиева, МОП структуры с тонким окисным слоем, облученные гамма лучами, *Болг.Физ.Жур.* V, 2, 1978.
8. S. Kaschieva, Gamma irradiation of MOS structures at 79K, *Докл.БАН*, 44, 4, 31, 1991.
9. S. Kaschieva, N. Smirnov, *Докл. БАН* 29, 3, 323, 1976.
10. S. Kaschieva, Influence of high energy electron irradiation on the interface states of the Si-SiO<sub>2</sub> system, , *Nucl.Instr.&Meth.Phys.Res.B* 93, 247, 1994.
11. S. Kaschieva, Change of the MOS sructure characteristics as a result of electron irradiation, *Докл.БАН*, 48, 8, 9, 1995.

12. E. Kurmaev, S. Shamin, V. Galakhov, A. Maknev, M. Kirilova, T. Kerennyk, V. Vykodest, S. Kaschieva, The influence of high energy electron irradiation and boron implantation on the oxide thickness in the Si-SiO<sub>2</sub> system, *J.Phys.Condens.Matter* 9, 6969, 1997.
13. S. Kaschieva, Influence of neutron irradiation on the surface states at the Si-SiO<sub>2</sub> system, *Докл.БАН*, 46, 1, 43, 1993.
14. S. Kaschieva, A. Djakov, Influence of fast neutrons upon the electrophysical parameters of MOS structures, *Rad.Effects Express*, 1, 21, 1987.
15. S. Kaschieva, A. Djakov, Interaction of fast neutrons and gamma rays with MOS structures, *Rad.Effects Express*, 1, 115, 1987.
16. N.Nedev, S.Kaschieva, Determination of energy spectra of B<sup>+</sup> implanted MOS structures; *Bulg.J.Phys.* 8,6,606, 1981.
17. R.Litovskii, V.Lysenko, A.Nazarov, T.Rudenko, S.Kaschieva, N.Nedev, The influence of defect surface layers on the capacitive properties of MOS structures, *Phys.Stat.Sol. (a)* 77, 699, 1983.
18. S.Kaschieva, K.Stefanov, D.Karpuzov, Electron irradiation of ion implanted Si-SiO<sub>2</sub> structures studied by DLTS, *Appl.Phys.A* 66, 561, 1998.
19. P.Danesh, S.Kaschieva, A.Djakov, On the interaction of hydrogen rf plasma with implantation induced defects in MOS structures, *Sol.State Electron.* 28, 11, 1095, 1985.
20. S.Kaschieva, P.Danesh, A.Djakov, RF annealing of the implantation induced defects in Si using hydrogen plasma, *Phys.Stat.Sol.(a)* 83, 411, 1984.
21. P.Danesh, S.Kaschieva, Hydrogen passivation of the implantation defects in MOS structures, *Rad.Effect.Letters* 86, 35, 1984.
22. S.Kaschieva, N.Nedev, P.Danesh, A.Djakov, Effect of UV radiation on ion implanted Si-SiO<sub>2</sub> structures, *Rad.Effect.Letters* 85, 225, 1985.
23. S.Kaschieva, P.Danesh, Annealing of radiation defects in helium implanted Si-SiO<sub>2</sub> structures, *Nucl.Instr.&Meth.Phys.Res.B* 129,551, 1997.
24. S.Kaschieva, A.Djakov, Influence of Ro radiation upon ion implantedS MOS structure, *Rad.Effect.Letters* 87, 185, 1986.
25. С.Касчиева, А.Джаков, Авторско свидетелство N41800, Метод за отгряване на ионно имплантирани дефекти в структури МДП, 28.04.1986, София, България.
26. S.Kaschieva, I.Yourukov, Use of X-ray irradiation for annealing of radiation defects introduced by ion implantation in Si-SiO<sub>2</sub> structures, *Sol.State Electron.*, 42, 10, 1835, 1998.
27. S. Kaschieva, Influence of backside implantation the impurity concentration in the Si-SiO<sub>2</sub> system, *Phys.Stat.Sol.(a)*, 123, K101, (1991).
28. S. Kaschieva, Reduction of the impurity concentration in the Si-SiO<sub>2</sub> system by backside treatment, Electronic and optoelectronic materials for the 21 century, Ed. J.Marshall, 462, (1992).
29. S. Kaschieva, Investigation of Na, Cl, and Al concentration in the system Si-SiO<sub>2</sub>, *Докл.БАН* 44, 45, 1991
30. S. Kaschieva, Reduction of the radiation sensitivity of MOS structure by irradiation-anneal cycle treatment, *Nucl.Instr.&Meth.Phys.Res.B* 74,396,1993.
31. S. Kaschieva, Radiation-hardened MOS structures, *Phyl.Mag.Lett.*, 69, 235. 1994.
32. S. Kaschieva, Improving of radiation hardness of MOS structures, *Int.J.Electron.* 76, 883, 1994.
33. S. Kaschieva, Decrease of MOS sensitivity by postoxidation cooling, *Докл.БАН* 48, 33, 1995.
34. S. Kaschieva, Influence of a postoxidation cooling on the interface state density of MOS structures, *Sol.State Electr.* 38, 609, 1995.
35. S. Kaschieva, Effect of postoxidation cooling on the interface states introduced by ion implantation, *Sol.State Electr.* 41, 413, 1997
36. K.Stefanov., S. Kaschieva, D.Karpuzov, Electrical characterization of defects induced by 12 MeV electrons in p- Si-SiO<sub>2</sub> structures, *Vacuum* 51, 235, 1998.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 октября 1999 года.



Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 28.10.99

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 3,04

Тираж 100. Заказ 51664.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области