

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА  
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

**Исмаилов Байрам**

**Изучение релаксационных свойств межфазных границ раздела  
полупроводник-стекло**

Специальность магистратуры:

5A140204 – Физика конденсированных сред и материаловедение

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание академической степени магистра

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., проф. Власов С.И.

# Содержание

**Введение**.....

**Глава 1. Граница раздела полупроводник- диэлектрик.**

- 1.1. Механические напряжения и структурные дефекты границ раздела**
- 1.2. Поверхностные состояния**
- 1.3. Генерационно-рекомбинационные процессы**
- 1.4. Краткие выводы к Главе 1**

**Глава 2. Экспериментальные методы исследования параметров границы раздела полупроводник-диэлектрик.**

- 2.1. Емкостные методы исследования**
- 2.2 . Определение генерационно-рекомбинационных характеристик границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> методами изотермической релаксации емкости**
- 2.3. Краткие выводы к Главе 2**

**Глава 3. Влияние внешних воздействий на параметр границы раздела полупроводник-диэлектрик.**

- 3.1. Влияние температуры оплавления стекла на параметры границы раздела Si-стекло.**
- 3.2. Влияние давления на свойства границ раздела полупроводник диэлектрик.**
- 3.3. Влияние ультразвуковой обработки на свойства границ раздела полупроводник диэлектрик.**
- 3.4. Краткие выводы к Главе 3**
- 3.5 Описание измерительной установки.**

**Выводы и заключение**

**Список используемой литературы**

**Список работ, опубликованных по теме диссертации**

## ВВЕДЕНИЕ

Основу современной микроэлектроники составляют многослойные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. Составной частью всех полупроводниковых приборов является комбинация чередующихся слоев полупроводник - диэлектрик. В таких приборах как полевые транзисторы, поверхностно барьерные варикапы, элементы памяти, приборы с зарядовой связью контакт полупроводник- диэлектрик является основной рабочей областью. В большинстве других полупроводниковых приборах контакт полупроводник - диэлектрик выполняет вспомогательные функции: разделительная изоляция, пассивация и защита поверхности полупроводника от внешних воздействий. Во всех случаях физические процессы, происходящие на границах раздела полупроводник- диэлектрик оказывают существенное влияние на рабочие характеристики полупроводниковых приборов.

Изучению влияния внешних воздействий на свойства переходных слоев полупроводник-диэлектрик посвящено также большое количество работ. Но эти работы, как правило, посвящены исследованию наиболее широко используемой системы кремний - диоксид кремния.

Однако, в ряде случаев, система кремний - диоксид кремния обладает некоторыми недостатками. К таким недостаткам относится высокая температура (900 - 1200 °С) формирования слоя  $\text{SiO}_2$ , приводящая к перераспределению примесных центров по толщине полупроводниковой подложке, обусловленное различными коэффициентами сегрегации и к возникновению в полупроводнике термодфектных центров.

Использование легкоплавких свинцово-боросиликатных стекол позволяет совмещать высокие изоляционные характеристики и простоту получения диэлектрических покрытий. С этой точки зрения актуальным является изучение природы электрофизических процессов, протекающих в покрытиях на основе свинцово - боросиликатных стекол при внешних воздействиях.

## ГЛАВА 1.

### Граница раздела полупроводник- диэлектрик.

Межфазная граница раздела полупроводник - диэлектрик является составной частью большинства современных полупроводниковых приборов. Одним из главных требований, предъявляемых к полупроводниковым приборам, является надежность работы и устойчивость их характеристик по отношению, к различного рода, внешним воздействиям. Такие воздействия, как температурная обработка, освещение и введение примесных центров в при контактную область полупроводника изучены достаточно подробно [1-5]. Изучению влияния внешних воздействий на свойства переходных слоев полупроводник-диэлектрик посвящено также большое количество работ. Но эти работы, как правило, посвящены исследованию наиболее широко используемой системы кремний - диоксид кремния [6-9].

Рассмотрим структуру, и электрофизические свойства границы раздела полупроводник- диэлектрик. С одной стороны эту границу раздела можно рассматривать как достаточно четко выраженную геометрическую границу, содержащую некоторое количество дефектов различного типа. Наиболее часто для описания дефектов используют модель оборванных (незавершенных) валентных связей, которые составляют основу электрически активных центров [7].

С другой стороны для описания свойств, границы раздела наиболее часто используют трехслойную модель, в которой систему полупроводник-диэлектрик условно разбивают на четыре качественно различные по своим свойствам области (рисунок. 1. а): *I* – объем диэлектрика; *II* – переходная область от диэлектрика к полупроводнику; *III* – приповерхностная область полупроводника; *IV* – объем полупроводника.

Этот подход рассматривает первый случай лишь как ориентировочное приближение, которое имеет свои ограничения. В частности расчет области объемного заряда полупроводника (ОПЗ) при малой его толщине должен

быть скорректирован с учетом изменения запрещенной зоны в названном переходном слое [10].

Имеется, однако, и более принципиальные различия моделей, касающиеся, в частности, природы электрически активных центров и интерпретации, связанных с этим экспериментальных данных. Так, в трехслойной модели не требуется введения оборванных, незавершенных валентных связей в чистом виде (типа  $Si-Si$ ). Здесь центры имеют природу дефектов и их комплексов с посторонними примесями аналогично радиационным нарушениям в полупроводнике. В этих центрах электронные валентные связи претерпевают существенную трансформацию, образуя более симметричную или новую гибридную связь с примесными атомами.

### **1.1. Механические напряжения и структурные дефекты границ раздела**

В целом структура  $Si-SiO_2$  характеризуется наличием в ней механических напряжений. Механические напряжения возникают уже в неокисленной пластине кремния при обработке верхней и нижней ее поверхностей разными способами. В случае выращивания окисла на одной из поверхностей пластины полупроводника механические напряжения могут быть значительными. В первую очередь это объясняется различием (почти на порядок) коэффициента линейного расширения материалов кремния, т.к. пленка оксида выращивается (или наносится) при повышенной температуре. Охлаждение структуры  $Si-SiO_2$  приводит к возникновению механических напряжений, и, следовательно, вызывает деформацию структуры [10] (пленка  $SiO_2$  сжата, а поверхностная часть пластин  $Si$  растянута). Причиной

возникновения механических напряжений может быть также и различие в

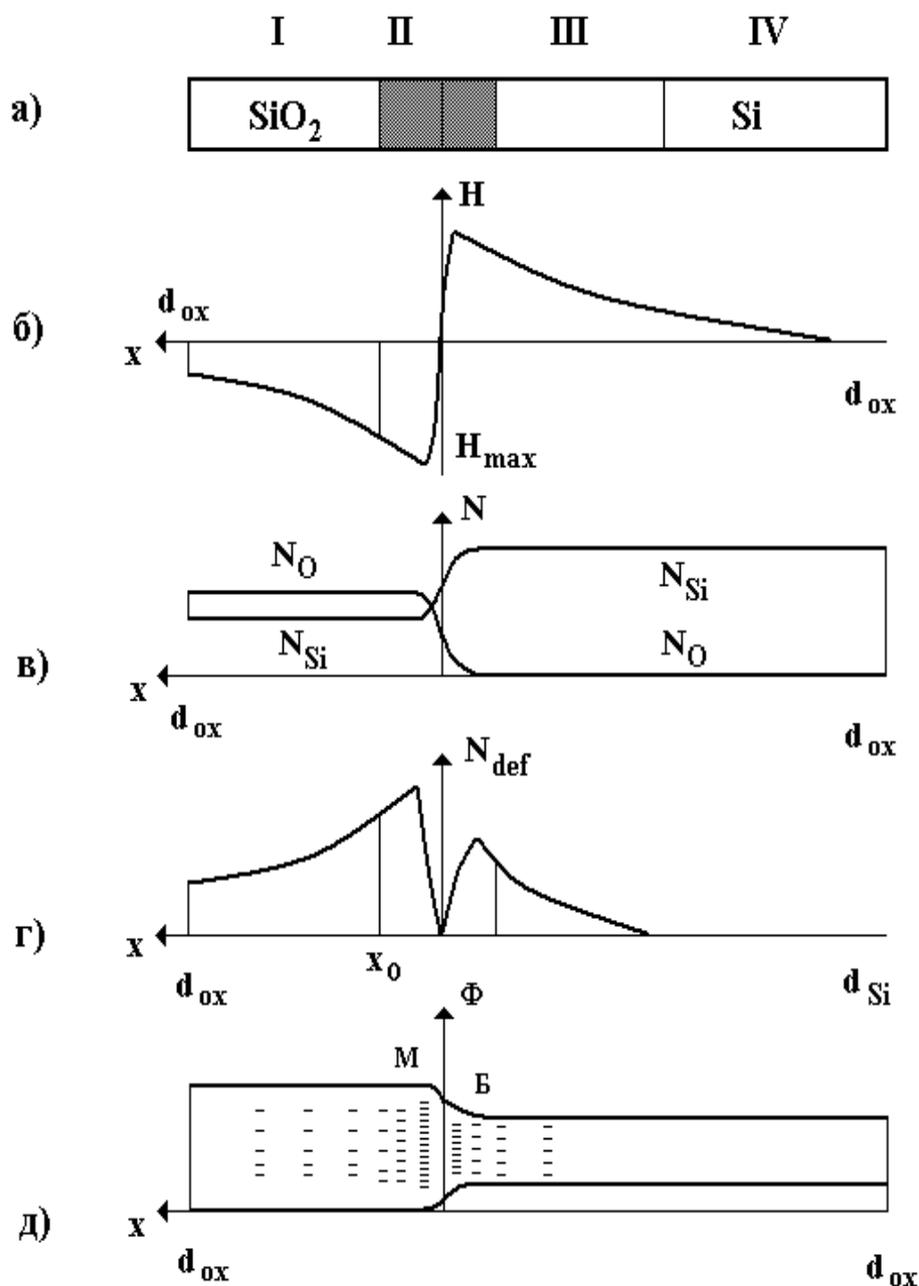


Рис.1. Схематическое изображение основных характеристик структуры SiO<sub>2</sub>-Si.

- а) структура SiO<sub>2</sub>-Si
- б) распределение механических напряжений в структуре
- в) распределение атомов кислорода (N<sub>O</sub>) и кремния (Si) по толщине структуры
- г) распределение дефектов
- д) расположение энергетических уровней дефектов (Б, М - быстрые и медленные поверхностные состояния)

строении материалов полупроводника и диэлектрика. Распределение механических напряжений в структуре  $Si-SiO_2$  показано на рисунке 1. б. На рисунке 1. в схематично изображено изменение химического состава при переходе от диоксида кремния к кремнию. Общий вид распределения дефектов и условное расположение их энергетических уровней представлены на рисунке 1., г и д соответственно.

Рассмотрим кратко основные характеристики трех основных областей структуры полупроводник-диэлектрик:

Объем диэлектрика  $I$  характеризуются небольшим спадом механических напряжений  $H$  от границы с кремнием в глубь оксида. В [10] показано, что величина  $H$  изменяется по экспоненциальному закону:

$$H(x) = H_{\max} \exp\left(-\frac{x}{d_{ox}}\right)$$

где  $d_{ox}$  - толщина пленки оксида. Видно, что механические напряжения на краях пленки различаются всего лишь в  $e$  раз. Экспериментальные исследования показали, что величина механических напряжений зависит как от толщины пленки  $SiO_2$ , так и от толщины пластины  $Si$  [11].

Химический состав  $SiO_2$  в  $I$  области постоянен, концентрация дефектов максимальна у границы со  $II$  областью, а энергетические уровни электроактивных центров дискретны. Граница  $x_0$  условно проводится на таком расстоянии полупроводника, что обмен носителями заряда посредством туннелирования можно пренебречь.

Переходная область  $II$  от диэлектрика к полупроводнику характеризуется изменением химического состава от  $SiO_2$  до  $Si$ , возрастанием до максимума механических напряжений и изменением их знака (сжатие  $SiO_2$  сменяется растяжением  $Si$ ), а также наличием двух дефектных слоев,

разделенных упорядоченным монослоем. Исследования методом Оже-спектроскопии выявили довольно резкие переходы от  $SiO_2$  к  $Si$  – химический состав изменяется в пределах 2 нм [12].

Однако эксперименты по стравливанию и другие методы показали, что ширина переходной области с учетом дефектных слоев может достигать 20 нм [13].

Электрические центры в этой области имеют непрерывный спектр, объясняющийся изменением химического состава (и, следовательно, вида атомов) в окружении дефекта они активно обмениваются зарядом с приповерхностной областью полупроводника [14].

## 1.2. Поверхностные состояния

Центры, расположенные в дефектном слое, примыкающем к полупроводнику, перезаряжаются в течение микросекунд и называются быстрыми поверхностными состояниями (ПС). Если ПС расположены на расстоянии 10 нм и более от поверхности полупроводника, то и время их перезарядки будет составлять миллисекунды и более. Такие ПС называются медленными.

Приповерхностная область полупроводника III начинается с момента стабилизации концентрации атомов  $Si$  (которая изменялась при переходе от  $SiO_2$  к  $Si$ ). Она характеризуется наличием механических напряжений растяжения и повышенной концентрацией дефектов, которые постепенно уменьшаются по мере удаления в глубь полупроводника. Кроме того, в случае термического окисления кремния в этой области имеет место изменение концентрации примеси. Как известно [15,16], концентрация атомов фосфора по мере приближения к границе раздела  $Si-SiO_2$  возрастает, а атомов бора уменьшается.

Исходя из вышеизложенного, будем рассматривать электрофизические характеристики ГР  $Si-SiO_2$  в свете представлений о ее строении и

дефектной структуры. Основные параметры, определяющие электрофизические характеристики ГР П-Д это:

1. ППС или состояния на границе раздела, которые определяются как энергетические уровни в запрещенной зоне на ГР П-Д, способные обмениваться зарядом с полупроводником в течение короткого времени;
2. Величина фиксированных поверхностных зарядов, которые локализируются вблизи поверхности полупроводника (около  $200 \text{ \AA}$ ) и не способны перемещаться под действием приложенного электрического поля;
3. Величина зарядов подвижных ионов, например ионов натрия, способных перемещаться в диэлектрике под действием термообработки со смещением;
4. Генерационно-рекомбинационные характеристики.

Приведенные в [17] измерения ППС на атомарно чистой поверхности  $Si$  показали, что ее величина весьма высока и ее порядки величины равны плотности атомов на поверхности (порядка  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). Термическое окисление приводит к уменьшению концентрации ПС, кроме того, ПС на ГР  $Si-SiO_2$  могут по своей природе, существенно отличаться от состояний на атомарно чистой поверхности.

Поверхностные состояния, включая ловушки в окисле, возникают в результате разупорядоченности структурных связей между  $SiO_2$  и  $Si$ , а также вследствие наличия дефектов в  $SiO_2$ , хотя до сих пор корреляция между определенными ПС и видами дефектов не обнаружена. В настоящее время установлено [18,19], что термическая обработка окисленного кремния в водороде или влажном азоте при температуре  $400-500 \text{ }^\circ\text{C}$  уменьшает ППС до  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Поверхностные заряды состоят из фиксированного поверхностного заряда, подвижных ионов и ионизированных ловушек, локализованных вблизи ГР П-Д. Пространственные заряды состоят из подвижных ионов и ионизированных ловушек внутри диэлектрика. Фиксированный

поверхностный заряд обладает следующими свойствами: он закреплен и не может дополнительно изменяться при изменении поверхностного потенциала  $\psi_s$  в широком диапазоне; он локализован на расстоянии не более  $100 \text{ \AA}$  от ГР П-Д; его плотность  $Q_{fc}$  слабо зависит от толщины изолятора, типа проводимости и концентрации примесей в полупроводнике;  $Q_{fc}$  зависит от условий образования (окисления), отжига диэлектрика и кристаллографической ориентации полупроводника [20, 21]. Предполагается, что избыточные ионы кремния в окисле являются причиной образования фиксированного заряда в системе  $Si-SiO_2$ .

Ряд характеристик полупроводниковых приборов, на основе структур металл – диэлектрик – полупроводник, в значительной степени определяется величинами генерационно – рекомбинационных потерь в объеме и на поверхности. Генерационно-рекомбинационные параметры ГР П-Д обычно характеризуются величинами скорости поверхностной генерации  $S_g$  и генерационным временем жизни  $\tau_g$ .

### 1.3. Генерационно-рекомбинационные процессы

В настоящее время генерационно-рекомбинационные характеристики ГР  $Si-SiO_2$  изучены в значительно меньшей степени, чем фиксированный заряд и заряд ПС. При этом наблюдается значительный разброс экспериментальных данных, касающихся определения значений  $S_g$  и  $\tau_g$ . Это может быть обусловлено применением различных методик и режимов измерений. Так в [17] показано, что величина  $S_g$  сильно зависит от значения концентрации неосновных носителей заряда (ННЗ). При этом значения  $S_g$ , измеренные в области обедняющих и инверсионных значений поверхностного потенциала  $\psi_s$ , отличаются более чем на порядок. В тоже время можно считать установленной корреляцию между значениями  $N_{ss}$  и  $S_g$ . Это свидетельствует о том, что ПС являются эффективными генерационными центрами и их концентрация определяет темп процессов поверхностной генерации-рекомбинации [23,24]. Однако, даже для структур,

полученных в одинаковых условиях и обладающих близкими значениями  $N_{ss}$ , величина  $S_g$  может отличаться в 5 – 10 раз [23]. Это может быть связано с неоднородным распределением поверхностного заряда по площади структуры на ГР  $Si-SiO_2$  и связанные с этими флуктуациями значения  $\psi_s$ . Наличие таких неоднородностей ведет к возникновению потенциальных ям на ГР. Такая потенциальная яма может играть роль центра генерации с аномально большим сечением захвата. Другой возможной причиной разброса значений  $S_g$  на ГР  $Si-SiO_2$  может служить неоднородность распределения генерационных центров по толщине переходного слоя диэлектрика [25]. Действительно, в разупорядоченном слое  $SiO_2$  обнаружено неоднородное распределение по толщине скопления точечных дефектов и микрокристаллических включений [17,23], которые также могут создавать уровни центров генерации-рекомбинации. Расположенные на различных расстояниях от поверхности  $Si$ , такие центры будут обладать различными сечениями захвата, что приведет к различным значениям  $S_g$ . В тоже время, при равной концентрации этих центров на единицу площади ГР их неоднородное распределение по толщине не будет существенным образом сказываться на величине  $N_{ss}$ . Из приведенных данных становится понятно, что для обеспечения стабильности параметров МДП-приборов при рабочих режимах (высокие электрические поля и повышенные температуры) необходимо контролировать как дрейфовую нестабильность ионов, так и нестабильность поверхностного заряда [26]. Основные способы уменьшения дрейфа ионов: модификация изолятора, например, добавлением фосфора в систему  $Si-SiO_2$ , или использование изоляторов, в которых затруднен дрейф ионов; чистота изготовления, исключая присутствие натрия и других примесей в окисле. Для уменьшения нестабильности поверхностного заряда необходимо использовать соответствующие отжиги, например, отжиги при высокой температуре в сухом водороде, позволяющие существенно уменьшить плотность поверхностного заряда, добиться, чтобы подложка

полупроводника не содержала посторонних примесей, кроме легирующих [5].

Вследствие связи между поверхностным зарядом и ПС, контролируя нестабильность поверхностного заряда, мы тем самым автоматически контролируем нестабильность ПС.

Из выше сказанного следует, что электрофизические процессы, протекающие на ГР  $Si-SiO_2$ , оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики полупроводниковых приборов. Несмотря на большое количество работ, посвященных данной теме, существует ряд проблем, касающихся природы изменения структурных и электрофизических свойств ГР  $Si-SiO_2$  при внешних воздействиях, решение которых позволило бы существенно улучшить характеристики полупроводниковых приборов.

Свойства полупроводниковых приборов определяются «характером электронных процессов, протекающих как в окисных слоях, так и в области межфазной границы» [27]. Эти процессы влияют на знак и величину пространственного распределения встроенного заряда, плотность и энергетическое распределение поверхностных состояний, величину пробивного напряжения, т.е. на важнейшие характеристики структур. Межфазные границы раздела полупроводник - диэлектрик, как правило, формируются при длительных температурных обработках поверхности полупроводника. Действительно, основным технологическим процессом получения наиболее широко используемой границы раздела  $Si - SiO_2$  является процесс термического окисления кристаллического кремния в потоке кислорода. Температура процесса, как правило, составляет 900-1200 °С. В процессе окисления, за счёт диффузии атомов кислорода в  $Si$ , граница раздела  $Si-SiO_2$  сдвигается в глубь полупроводниковой подложки, т.е. слой  $SiO_2$  нарастает в глубину  $Si$ . Помимо диффузии кислорода через сформированный слой  $SiO_2$ , происходит встречная диффузия кремния, вследствие чего пространственная область, охватываемая реакцией окисления, распространяется и в слой диэлектрика. Наличие встречных потоков

диффундирующих частиц приводит к отсутствию резкой границы между полупроводником и диэлектриком и к формированию переходного слоя  $\text{SiO}_2\text{-SiO}_x\text{-Si}$ , где  $x$  претерпевает изменения от двух до нуля. На рисунке 2 условно изображена двумерная переходная область от кристаллической структуры Si к аморфной структуре  $\text{SiO}_2$ . Нарушенные валентные связи Si являются источником положительного заряда на границе раздела, т.е. электронными состояниями донорного типа. Валентный электрон приповерхностного атома кремния, будучи слабосвязанным, легко отрывается от атома (при повышенных температурах), что приводит к увеличению положительного заряда на границе раздела. Ряд экспериментальных данных указывает на то, что в переходном слое, помимо электронных состояний донорного типа, присутствуют состояния акцепторного типа. Наличие как донорных, так и акцепторных состояний объясняется взаимодействием ненасыщенных валентных связей кремния с металлическими примесями, распространёнными в окисном слое. В процессе термического окисления кремния происходит перераспределение растворённых в ней примесей. Некоторые атомы примеси внедряются в растущий окисный слой, нарушая его электронейтральность, другие диффундируют к новым положениям в кремний. Основным параметром, управляющим процессом перераспределения примесей, является коэффициент сегрегации ( $\eta$ ), равный отношению коэффициентов диффузии примеси в Si и в  $\text{SiO}_2$ . При  $\eta < 1$  растущий слой  $\text{SiO}_2$  отталкивает примесь и её концентрация в Si в области, прилегающей к  $\text{SiO}_2$ , возрастает, при  $\eta > 1$  примесь, локализованная в приповерхностных слоях Si, втягивается в слой  $\text{SiO}_2$  и её концентрация в Si уменьшается. Так, для В и Al  $\eta < 1$ , а для P, Ga, As, In -  $\eta > 1$ .

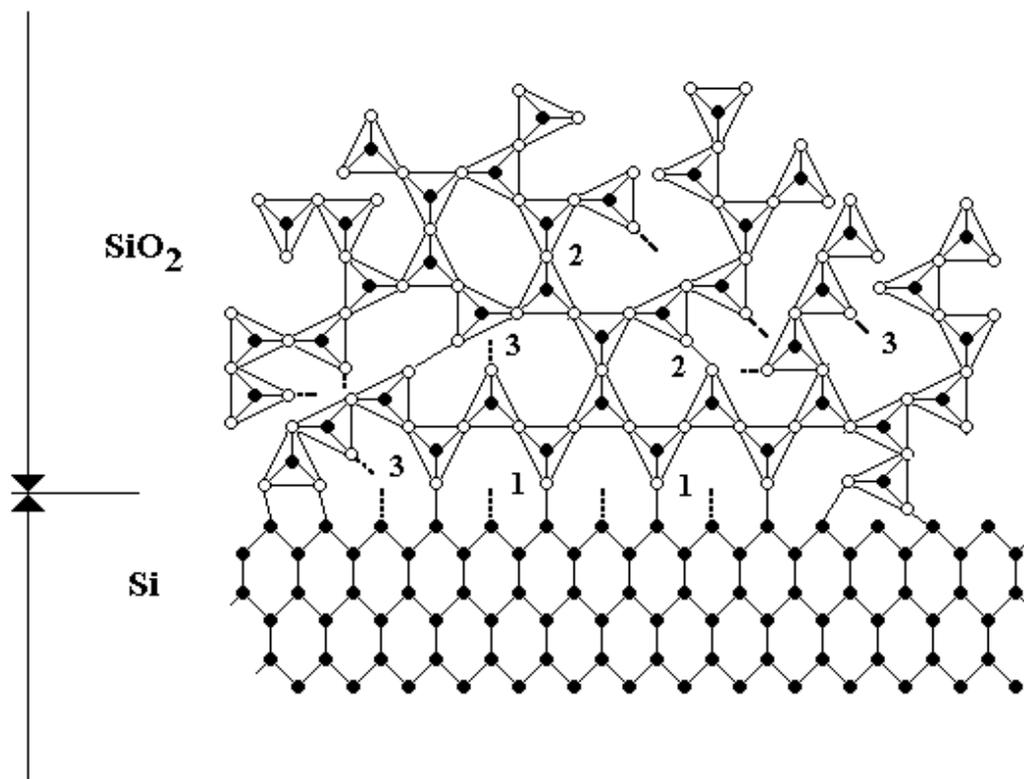


Рис. 2. Двумерная модель переходной области Si - SiO<sub>2</sub>.

1- оборванные валентные связи Si, 2- «мостиковый» кислород,  
3- «не мостиковый» кислород.  
( рисунок взят из работы [29])

В работе [28] приведена модель диффузионно-сегрегационного перераспределения фосфора в системе  $\text{SiO}_2\text{--Si}$  при термическом окислении сильно легированных слоев кремния, учитывающая образование приповерхностного пика концентрации примеси на межфазной границе. Образование приповерхностного пика концентрации связывается с изменением свободной энергии атомов примеси вблизи поверхности кремния и моделируется с помощью диффузионно-сегрегационного уравнения. Показана адекватность модели для описания перераспределения фосфора при окислении однородно легированных слоев кремния. В ряде случаев закономерности перераспределения примесных атомов могут быть объяснены на основе катионной модели диффузии и различной высотой потенциального барьера переходного слоя  $\text{Si-SiO}_2$  при диффузии различных примесей. Если межфазная граница раздела представляет барьер для диффундирующей из полупроводника примеси, то происходит увеличение её концентрации в полупроводнике, вблизи границы раздела. В противоположном случае примесь насыщает переходный слой и прилегающую к нему область диэлектрика. Увеличение или уменьшение концентрации примеси в переходных слоях по сравнению с её объёмными концентрациями в  $\text{Si}$  приводит к изменению ряда характеристических параметров МДП структур. Увеличение концентрации положительного заряда в переходном слое  $\text{Si-SiO}_2$  МДП структуры на основе  $n\text{-Si}$ , как и увеличение плотности поверхностных состояний донорного типа, вызывает изменение энергии электронов в прилегающих областях  $\text{Si}$  и искривление зон энергии на зонных диаграммах. Так в работе [30] рассматривалась кинетика дрейфа подвижного заряда в пленках  $\text{SiO}_2$ , его захват на ионные ловушки, локализованные на границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$ , приводящий к изменению величины потенциальных ям для подвижных частиц на рассматриваемой границе раздела.

В работе [31] предложена методика позволяющая характеризовать электронные свойства границы полупроводник-диэлектрик: усредненную по

$E_g$  плотность пограничных состояний, качественный характер их распределения по ширине щели, напряжение плоских зон и его компоненты, обусловленные фиксированным зарядом в подзатворном диэлектрике и зарядом, локализованным на пограничных состояниях. В работе [32] рассмотрены возможные структурные комплексы, образующиеся при высокотемпературном термическом окислении кремния в пограничном слое в системе Si-SiO<sub>2</sub>. На основании концепции пограничного слоя предложена математическая модель кинетики полимеризации кремний-кислородных кластеров. Отмечено влияние диффузионного потока этих кластеров на процентное содержание цепочек SiO<sub>4</sub>-тетраэдров разной длины в объеме SiO<sub>2</sub>.

Рассмотренные вопросы, касающиеся формирования, изменения структурных и электрофизических свойств при внешних воздействиях, влияние этих изменений на параметры полупроводниковых приборов и микросхем и вызывают необходимость изучения переходных слоев между полупроводником и диэлектриком в МДП структурах.

Однако низкие скорости роста слоя SiO<sub>2</sub> затрудняют получение достаточно толстых диэлектрических слоев, необходимых при производстве полупроводниковых приборов, что требует дополнительного технологического процесса герметизации получаемых приборов. Это обуславливает интерес к поиску диэлектрических пассивирующих слоев, альтернативных широко используемому диоксиду кремния. В работе [33] было предложено использовать в качестве под затворного диэлектрика боро-фосфоро-силикатное стекло, имеющего ряд преимуществ по сравнению с диоксидом кремния. В работах [34,35] приведены подробные данные о технологии получения [36] и о электрофизических свойствах [37] боро-фосфоро-силикатного стекла, показаны области его применения. В работах [38- 40] приводятся результаты исследования некоторых электрофизических свойств переходных слоев Si - свинцово - боро- силикатных стекол, там же показана перспективность использования указанных стекол в

микроэлектронике. Легкоплавкие стекла, нанесенные на поверхность полупроводника при пониженных температурах, уменьшают вероятность образования термических дефектов и снижают механические напряжения границы раздела.

Использование легкоплавких свинцово-боросиликатных стекол позволяет совмещать высокие изоляционные характеристики и простоту получения диэлектрических покрытий. С этой точки зрения, интересными могут быть исследования влияния всестороннего сжатия на свойства границ раздела кремний - стекло, т.к. при всестороннем сжатии имеет место изменения параметров стекла, переходного слоя и самой полупроводниковой подложки.

Из приведенного обзора видно, что легкоплавкие свинцово-боросиликатные стекла являются перспективным материалом для создания пассивирующих и герметизирующих покрытий в полупроводниковых приборах, а также для создания межуровневой изоляции и планаризации рельефа в интегральных схемах. При этом, электрофизические характеристики получаемых на основе стекол диэлектрических пленок могут оказывать существенное, а в ряде случаев и определяющее влияние на стабильность и надежность работы полупроводниковых приборов и структур. Основными параметрами диэлектрических на пленок основе свинцово-боросиликатных стекл, оказывающими влияние на характеристики полупроводниковых приборов является наличие в их объеме фиксированного и подвижного зарядов, наличие зарядов на границе раздела полупроводник-диэлектрик, а также концентрация ловушечных центров в диэлектрике, способных обмениваться носителями заряда с объемом полупроводника. Дальнейшее улучшение характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем обуславливает необходимость создания на основе легкоплавких стекол тонких диэлектрических пленок с заданными характеристиками. Для решения этой задачи необходимо создание и развитие физической модели, описывающей возникновение заряженных центров в

тонких диэлектрических пленках на основе легкоплавких стекол как в процессе их формирования, так и под влиянием внешних воздействий и в процессе эксплуатации. Однако, природа электрофизических процессов, протекающих в покрытиях на основе свинцово - боро- силикатных стекол при внешних механических воздействиях, на сегодняшний день остается недостаточно изученной. Повышение качества и надежности приборов, пассивируемых свинцово - боросиликатными стеклами, делает необходимым детальное изучение физических явлений, имеющих место в объеме диэлектрика и на его границе с полупроводником, как во время изготовления, так и во время эксплуатации прибора.

#### **1.4.Краткие выводы.**

1. Использование в микроэлектронике легкоплавких свинцово-боросиликатных стекол позволяет совмещать высокие изоляционные характеристики и простоту получения диэлектрических покрытий.
2. Природа электрофизических процессов, протекающих в покрытиях на основе свинцово - боро- силикатных стекол при внешних воздействиях, на сегодняшний день остается недостаточно изученной.

## **ГЛАВА 2**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК- ДИЭЛЕКТРИК**

Существует огромное количество методов исследования характеристик параметров полупроводниковых структур, достаточно подробно изложенных в монографиях и обзорах [41-43]. В настоящее время наиболее оптимальным вариантом для изучения электрофизических свойств ГР П-Д являются

емкостные методы. Достоинствами емкостных методов являются высокая чувствительность, возможность определения параметров глубоких центров при изменении их заполнения как основными, так и неосновными носителями, возможность исследования глубоких центров как в полупроводниковых приборах, изготовленных по реальной технологии, так и в исходном полупроводнике. Все емкостные методы исследования параметров полупроводников [44] основаны на единой, хорошо развитой теории барьерной емкости  $p - n$  – перехода и ёмкости структур металл-диэлектрик-полупроводник. Это обстоятельство позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты измерений независимо от типа используемых структур. Ёмкостные методы обладают высокой информативностью, т.е. позволяют в едином измерительном цикле получать информацию о многих параметрах полупроводникового материала, диэлектрика и переходного слоя полупроводник- диэлектрик. Эти методы достаточно просты как с точки зрения проведения экспериментальных измерений, так и при получении высокой чувствительности к измеряемым параметрам. Важным преимуществом этих методов является неразрушаемость контроля, т.е. возможность их использования без повреждения изучаемой полупроводниковой структуры.

## 2.1. Емкостные методы исследования

Ёмкостные методы исследования используют равновесные и неравновесные характеристики. В основе ёмкостных методов исследования, использующих статические, *равновесные характеристики*, лежит сравнение экспериментально измеренных вольт-фарадных характеристик реальных МДП-структур с теоретически рассчитанными характеристиками. При выводе уравнений, описывающих поведение расчетных  $CV$  характеристик МДП-структур, используются некоторые общепринятые приближения. К таким приближениям можно отнести отсутствие градиента концентрации легирующей примеси, отсутствие зарядов в слое диэлектрика, равенство нулю разности работ выхода из полупроводника и из металла. Для расчета

теоретических равновесных CV характеристик используются 2 предположения, соответствующие низкочастотным и высокочастотным вольт-фарадным характеристикам. В соответствии с этими предположениями используются методы низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) измерений емкости структур металл-диэлектрик-полупроводник.

В соответствии с существующими теориями и методами, при помощи равновесных вольтфарадных характеристик можно определить интегральное и дифференциальное распределение плотности поверхностных состояний по штрине запрещенной зоны полупроводника. В качестве примера на рисунке 3 приведены расчетная и экспериментальная вольт фарадных характеристики структуры металл-диэлектрик-полупроводник. На рисунке 4 показано дифференциальное распределение плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника, для структур подвергнутых различным воздействиям.

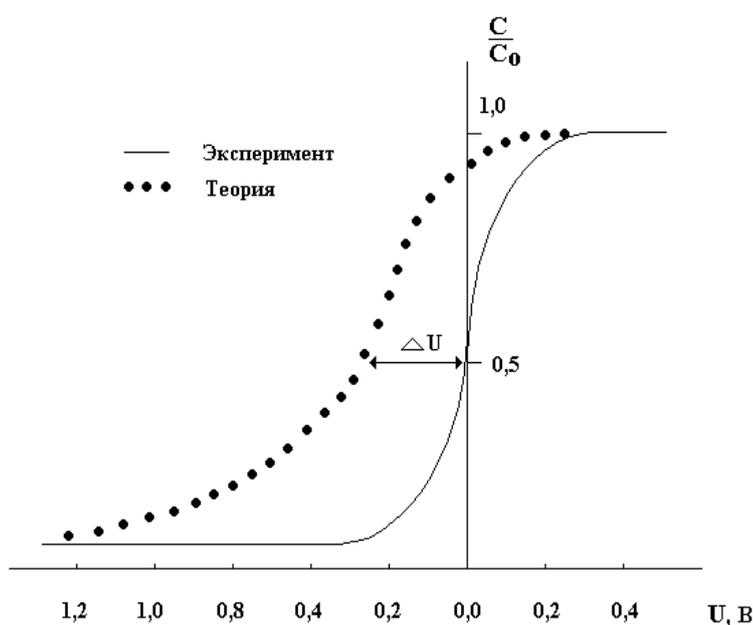


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная высокочастотные вольт фарадные характеристики структуры металл-диэлектрик-полупроводник, изготовленной на основе полупроводника электронного типа проводимости.

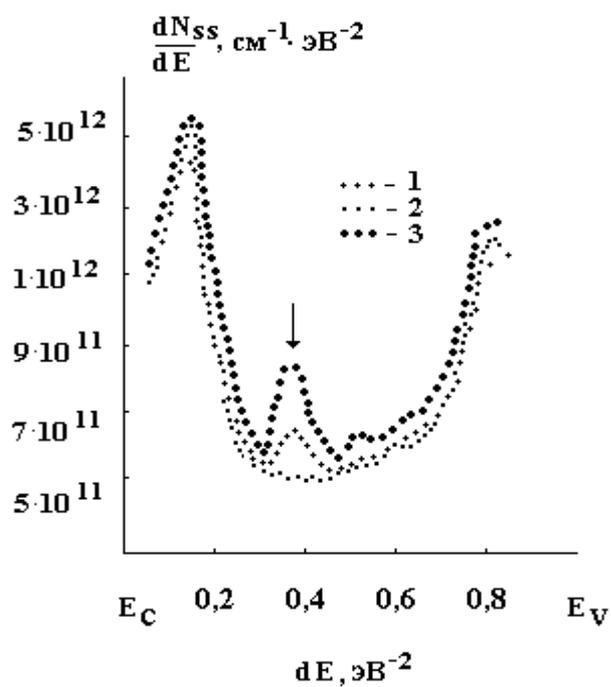


Рис. 4 Дифференциальное распределение плотности поверхностных состояний.

- 1- Структура подвергнутая воздействию давлением в 4 кБар.
- 2- Структура подвергнутая воздействию давлением в 4 кБар.
- 3- Контрольная структура.

Импульсные методы измерения параметров переходных слоев основаны на регистрации неравновесных вольт-фарадных зависимостей. Один из основных вариантов импульсного метода определения параметров переходного слоя в МДП-структурах базируется на предположении, что при больших скоростях нарастания напряжения смещения поверхностные состояния и неосновные носители заряда (ННЗ) не успевают следовать не только за переменным ВЧ сигналом, но и за изменением напряжения смещения. *Неравновесные вольт-фарадные характеристики*, полученные при условиях, когда лишь основные носители заряда успевают следовать за напряжением смещения, получили название импульсных характеристик. Анализ импульсных CV характеристик МДП-структур позволяет получать информацию о поверхностных состояниях и об их кинетике перезарядки.

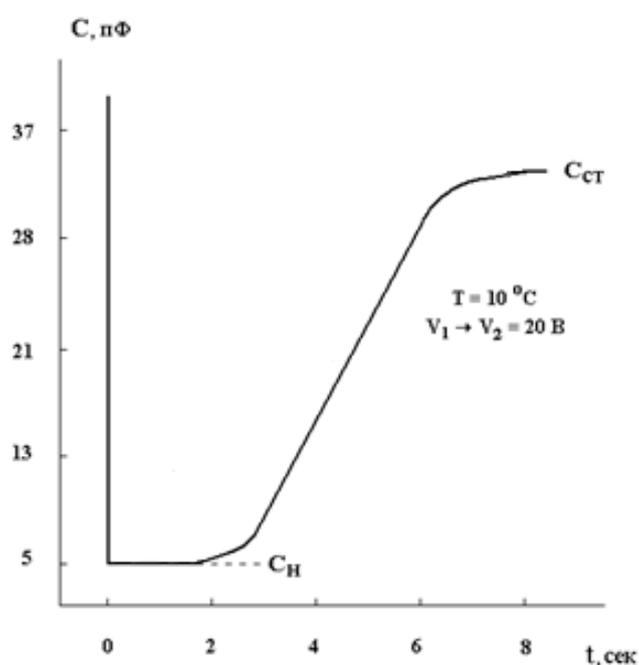


Рис. 5. Релаксационные зависимости емкости, одной из структур Al-SiO<sub>2</sub> -n - Si, снятые в темноте при температуре 10 °С, после переключения инверсионных напряжений от 12 до 20 В.

## 2.1. Определение генерационно-рекомбинационных характеристик границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> методом изотермической релаксации емкости

Для определения генерационно-рекомбинационных характеристик границ раздела полупроводник-диэлектрик наиболее часто используется метод изотермической релаксации емкости МДП-структуры, основанный на измерении скорости формирования инверсионного слоя [45]. В работах [46,47] этот метод доработан с целью определения генерационных параметров границ раздела полупроводник- диэлектрик. Рассмотрим этот метод. При подаче на структуру металл-диэлектрик-полупроводник напряжения, соответствующему инверсии поверхностной проводимости, ёмкость структуры релаксирует во времени от своего начального, неравновесного к конечному, равновесному состоянию. Этот процесс релаксации обусловлен формированием заряда инверсионного слоя – заряда неосновных носителей, локализуемых на границе раздела полупроводник – диэлектрик. Энергетическая диаграмма структуры в некоторый момент времени  $t$  после начала релаксации, приложение импульса, смещающего структуру из положения плоских зон в инверсию, показана на рисунка б.

Изменение ширины области неравновесного обеднения и релаксация емкости обусловлены генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ и на ГР, а также диффузией носителей из объема. Неосновные носители (дырки) притекают к поверхности, формируя инверсионный слой и экранируя внешнее поле. Основные носители (электроны) текут к краю ОПЗ, нейтрализуя заряд обеднённой области  $Q_{об} = qN_dW(t)$  и уменьшая ширину ОПЗ  $W$ .

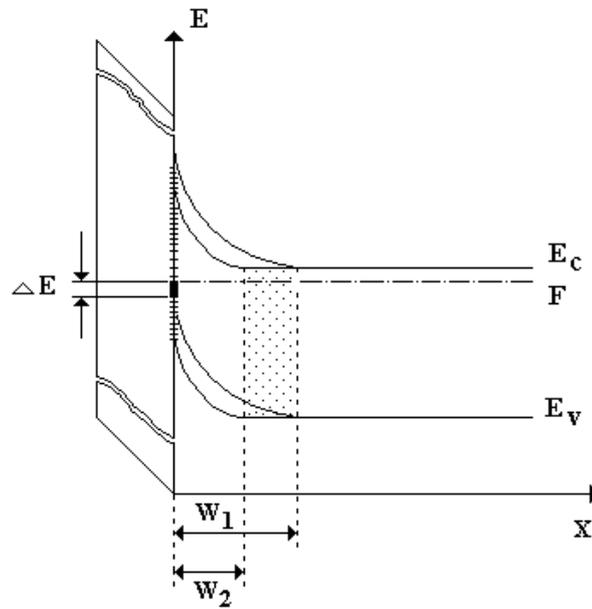


Рис 6. Модель энергетической зонной диаграммы структуры МДП с указанием энергетической области перезаряжающихся поверхностных состояний при подаче импульсного напряжения

Общее условие электронейтральности имеет вид:

$$Q_g = -(Q_s + Q_{ss} + Q_f) = C_d U \quad (1)$$

где  $Q_s$  - заряд ОПЗ;  $Q_{ss}$  - заряд в поверхностных состояниях;  $Q_f$  - фиксированный заряд в диэлектрике;  $C_d$  - емкость диэлектрика;  $U$  - напряжение, приложенное к МДП-структуре;

или [87]

$$-Q_g = [\Delta Q_{ss}(t) + Q_p(t)] + qN_d W(t) + [Q_f + Q_{nl}] = -C_d U \quad (2)$$

где  $Q_{nl}$  - заряд в поверхностных ловушках.

Заметим, что последний член  $[Q_f + Q_{nl}]$  не зависит от времени, а первый член  $[\Delta Q_{ss}(t) + Q_p(t)]$  есть суммарный заряд в поверхностных состояниях и инверсионном слое, расположенный в очень тонкой области у границы полупроводник-диэлектрик и меняющийся по мере накопления генерационных носителей.

Учитывая это и пренебрегая влиянием разницы работ выхода, имеем следующее состояние для приложенного напряжения:

$$V_g = U + V_{об} = -\frac{1}{C_d} \left[ qN_d W + \frac{qN_d W^2 C_d}{2\varepsilon_0 \varepsilon_s} + (\Delta Q_{ss} + Q_p) \right] \quad (3)$$

где  $V_{об}$  - падение напряжения на слое обеднения;  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость на поверхности.

Используя определение  $C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d_{ox}}$  ( $d_{ox}$  - толщина) и обозначая

суммарный заряд  $\Delta Q_{ss}(t) + Q_p(t)$  через  $Q(t)$ , из последнего равенства получим:

$$Q(t) = -C_d V_g - \frac{qN_d}{C_d} \left( C_d W + \frac{\varepsilon_d C_d W^2}{2\varepsilon_s d_{ox}} \right) \quad (4)$$

т.к. при неравновесном обеднении ВЧ емкость МДП-структуры  $C(t)$  связана с шириной обеднения  $W(t)$  соотношением:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{об}} = \frac{1}{C_d} + \frac{W}{\varepsilon_0 \varepsilon_s} \quad (5)$$

где  $C$  – ёмкость структуры;  $C_{об}$  – ёмкость обедненного слоя.

Тогда соотношение (6) примет вид:

$$Q(t) = -C_d V_g - \frac{qN_d \varepsilon_0 \varepsilon_s}{2C_d} \left[ \left( \frac{C_d}{C(t)} \right)^2 - 1 \right] \quad (7)$$

Дифференцируя (7) и учитывая, что скорость изменения заряда ( $Q(t)$ ) есть суммарный темп его генерации  $G(t)$ , получим:

$$G(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{qN_d \varepsilon_0 \varepsilon_s}{2C_d} \frac{d}{dt} \left( \frac{C_d}{C(t)} \right)^2 = \frac{qN_d \varepsilon_0 \varepsilon_s C_d}{(C(t))^3} \frac{dC}{dt} \quad (8)$$

Т.о. суммарный темп генерации заряда в инверсионном слое ОПЗ и на поверхностных состояниях, согласно (8) можно определить экспериментально двумя способами. Например, для расчёта  $G(t)$  в произвольный момент времени необходимо измерить эффективную ВЧ ёмкость структуры  $C(t)$ , соответствующую этому моменту и определить в этой точке наклон релаксационной кривой  $\frac{dC}{dt}$  (путём графического дифференцирования). Другой способ состоит в перестройке релаксационной кривой  $C(t)$  в координатах  $\left( \frac{C_d}{C(t)} \right)^2 = f(t)$  и графическом дифференцировании полученной зависимости.

Под термином «темп» поверхностной генерации-рекомбинации  $R_s$  принято понимать количество актов генерации-рекомбинации, приходящихся на единицу поверхности в единицу времени [87]. Однако оказалось более удобным характеризовать процессы рекомбинации и генерации на поверхности величиной скорости поверхностной генерации-рекомбинации  $S_{gr}$ , которая при условии  $\Delta n = \Delta p$  ( $\Delta n = n - n_0$  и  $\Delta p = p - p_0$  - концентрация избыточных носителей заряда) может быть введена в стационарных

условиях через темп поверхностной рекомбинации  $R_s$  и неравновесной концентрации носителей заряда  $\Delta n$  и  $\Delta p$  на поверхности (при  $x=0$ ) следующими соотношениями:

$$R_s = S_{gr} \cdot \Delta p \Big|_{x=0} = S_{gr} \cdot \Delta n \Big|_{x=0} \quad (9)$$

Если концентрация избыточных носителей  $\Delta n$  и  $\Delta p$  равны между собой,  $\Delta n = \Delta p$ , т.е. отсутствует процесс захвата в объеме, то можно говорить о едином рекомбинационном времени жизни  $\tau_r$ :

$$R_n = R_p = \frac{\Delta n}{\tau_r} = \frac{\Delta p}{\tau_r} \quad (10)$$

Рассмотрим дискретный (моноэнергетический) поверхностный уровень с концентрацией  $N_{ts}$  и энергетическим положением  $\varepsilon_{ts}$ . Согласно общепринятой теории генерации-рекомбинации, результирующий темп поверхностной рекомбинации можно записать как [87]:

$$R_s = \frac{\alpha_n \alpha_p N_{ts} (n_s p_s - n_{1s} p_{1s})}{\alpha_n (n_s + n_{1s}) + \alpha_p (p_s + p_{1s})} \quad (11)$$

где  $n_s p_s > n_{1s} p_{1s} = n_i^2$ , а коэффициенты захвата  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  выражены соотношениями

$$\alpha_n = \sigma_{ns} v_n, \quad \alpha_p = \sigma_{ps} v_p \quad (12)$$

где  $\sigma_{ns}$ ,  $\sigma_{ps}$  – сечения захвата электронов и дырок,  $v_n$ ,  $v_p$  – тепловые скорости электронов и дырок.

Аналогичным образом выражается темп поверхностной генерации:

$$G_s = \frac{\alpha_n \alpha_p N_{ts} (n_i^2 - n_s p_s)}{\alpha_n (n_s + n_{1s}) + \alpha_p (p_s + p_{1s})} \quad (13)$$

где  $n_s p_s < n_i^2$ . В обоих соотношениях концентрации  $n_{1s}$  и  $p_{1s}$  численно равны соответственным равновесным концентрациям электронов и дырок в

разрешённых зонах, когда уровень Ферми совпадает с моноэнергетическим поверхностным уровнем  $\varepsilon_{ts}$ .

Соотношения (12) и (13) справедливы при следующих условиях:

- Квазиравновесное распределение электронов и дырок по энергиям в разрешенных зонах. При неравновесном распределении коэффициенты захвата  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  уже не будут определяться тепловыми скоростями электронов  $v_n$  и дырок  $v_p$  (2.34).
- Квазистационарное состояние полупроводника, когда заполнение уровней определяется положением квазиуровней Ферми свободных носителей заряда. При этом перезарядка этих уровней не оказывает влияния на распространение потенциалов в МДП-структуре, что накладывает ограничение на величину концентрации этих уровней:

$$N_{ts} \ll \frac{Q_{об}}{q} = (N_d - N_a) \cdot W \quad \text{для } t \approx 0 \quad (14)$$

$$N_{ts} \ll \frac{Q_p}{q} \quad \text{для } t \rightarrow \infty \quad (15)$$

Очевидно, что темп поверхностной генерации до некоторого момента (начиная с которого ОПЗ становится близка к полностью равновесной) может зависеть только от поверхностной концентрации неосновных носителей, т.к. основные носители вблизи поверхности в неравных условиях практически отсутствуют.

Т.о., для полупроводника  $n$  – типа в моменты времени, не близкие к равновесным, имеем:

$$n_s \ll n_{1s}, \quad n_s p_s \ll n_i^2 \quad (17)$$

В связи с этим выражением для темпа поверхностной генерации (13) будет иметь вид:

$$G_s = \frac{\alpha_n \Delta p N_{ts} n_i^2}{\alpha_n n_{1s} + \alpha_p (p_s + p_{1s})} = n_i S_g \quad (18)$$

где введена величина  $S_g$ , имеющая размерность см/с, носит название скорости поверхностной генерации и определяется как

$$S_g = \frac{\alpha_n \alpha_p N_{ts} n_i}{\alpha_n n_{1s} + \alpha_p (p_s + p_{1s})} \quad (19)$$

Общее выражение для темпа объёмной рекомбинации в ОПЗ через моноэнергетические уровни с концентрацией  $N_t$ , энергетическим положением  $\varepsilon_r$  и коэффициентами захвата  $\alpha_n = v_n \sigma_n$ ,  $\alpha_p = v_p \sigma_p$  имеет вид:

$$R_{об} = \frac{\alpha_n \alpha_p N_t [n(x)p(x) - n_i^2]}{\alpha_n [n(x) + n_1] + \alpha_p [p(x) + p_1]} \quad (20)$$

где величины  $N_t$ ,  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  приняты не зависящими от координаты  $x$ , а произведение  $n(x)p(x) > n_i^2$ . Соответственно темп объёмной генерации равен:

$$G_{об} = \frac{\alpha_n \alpha_p N_t [n_i^2 - n(x)p(x)]}{\alpha_n [n(x) + n_1] + \alpha_p [p(x) + p_1]} \quad (21)$$

где  $n(x)p(x) < n_i^2$ ,  $n_1$  и  $p_1$  – равновесные концентрации электронов и дырок в полупроводнике. В отличие от генерации - рекомбинации через поверхностные уровни, здесь размерность  $N_t$  есть [см<sup>-3</sup>], а в отличие от генерации - рекомбинации в объеме вследствие изгиба зон в ОПЗ концентрации  $n(x)$  и  $p(x)$  зависят от координаты.

Величина полного потока  $G$  в приповерхностный слой ОПЗ полупроводника равна сумме темпов тепловых генераций:

$$G = G_s + G_0 + G_{sk} + I_{pd} = n_i S_g + \left(1 - \frac{np}{n_i^2}\right) \left(\frac{n_i W}{\tau_{go}} + \frac{n_i W_k}{\tau_{gk}}\right) + I_{pd} \quad (22)$$

где  $G_s$  - поверхностная генерация;  $G_0$  – полный темп генерации электронно-дырочных пар в ОПЗ;  $G_{sk}$  - темп генерации в краевой части ОПЗ;  $I_{pd}$  – поток

дырок;  $W$ ,  $W_k$  - толщины ОПЗ и краевой части ОПЗ;  $\tau_{go}$ ,  $\tau_{gk}$  - генерационное время жизни в объеме и в краевой части ОПЗ соответственно.

Характерными чертами соотношения (22) являются:

- линейная зависимость  $G$  от неравновесной толщины ОПЗ  $W$  в случае наибольшего вклада в  $G$  темпов генерации в ОПЗ от приконтактной части ОПЗ ( $G_o + G_{sk}$ );
- вклад  $G_s$  существенен лишь в начальные моменты релаксационного процесса (т.е. при больших  $W$ ), т.к.  $S_g$  очень сильно убывает с ростом поверхностной концентрации неосновных носителей  $p_s$ ;
- скорости генерации сильно зависят от температуры, уменьшаются, как правило, с её понижением пропорционально  $\exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$ .

Теория тепловых генерационных процессов в МДП-структурах [87] дает общее выражение для потока носителей заряда (2.43), включающее в себя параметры объемных и поверхностных генерационных центров, а также характеристики приконтактных ОПЗ и процесса диффузии. Очевидно, что если приравнять экспериментально определяемый темп генерации к полному потоку неосновных носителей в приповерхностный слой ОПЗ:

$$G(t) = q(G_s + G_o + G_{sk} + I_{pd}) \quad (23)$$

или

$$\frac{qN_d \epsilon_0 \epsilon_s C_d}{(C(t))^3} \frac{dC}{dt} = q \left\{ n_i S_g + \left(1 - \frac{np}{n_i^2}\right) \left[ \frac{n_i W}{\tau_{go}} + \frac{n_i W_k}{\tau_{gk}} \right] + I_{pd} \right\} \quad (24)$$

то из анализа и сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей можно определять доминирующие механизмы генерации, а также оценивать указанные выше генерационно-рекомбинационные параметры.

Рассмотрим учёт и разделение поверхностной и объемной генерационных составляющих. Составляющая потока  $I_{pd}$ , например, для структур на основе кремния, при комнатной температуре обычно

незначительна. Если исключить влияние приконтактной части ОПЗ, то составляющей потока  $G_{sk}$ , также можно пренебречь. Тогда задача упрощается и сводится к разделению темпов генерации через поверхностные уровни  $G_s(t)$  и через объемные центры в ОПЗ  $G_o(t)$ . Объемный темп генерации в ОПЗ можно записать в следующем виде:

$$G_o = \frac{n_i \Delta W(t)}{\tau_{go}} = \frac{n_i [W(t) - W_\infty]}{\tau_{go}} = \frac{n_i \varepsilon_0 \varepsilon_s}{\tau_{go} C_d} \left[ \frac{C_{cr}}{C(t)} - 1 \right] \quad (25)$$

где равновесная ёмкость  $C_{cr}$  и ёмкость  $C(t)$  связаны равновесной шириной ОПЗ  $W_\infty$  и шириной  $W(t)$  соотношениями типа:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_d} + \frac{W}{\varepsilon_0 \varepsilon_s} \quad (26)$$

Т.о., окончательный результат для суммарного темпа рекомбинации в этом случае имеет вид:

$$G(t) = q(G_s + G_o) = -\frac{qN_d \varepsilon_0 \varepsilon_s}{2C_d} \frac{d}{dt} \left[ \frac{C_d}{C(t)} \right]^2 = qn_i S_g + \frac{qn_i \varepsilon_0 \varepsilon_s}{\tau_{go} C_{cr}} \left[ \frac{C_{cr}}{C(t)} - 1 \right] \quad (27)$$

или

$$-\frac{d}{dt} \left[ \frac{C_d}{C(t)} \right]^2 = \frac{2C_d n_i S_g}{\varepsilon_0 \varepsilon_s N_d} + \frac{2C_d n_i}{C_{cr} N_d \tau_{go}} \left[ \frac{C_{cr}}{C(t)} - 1 \right] \quad (28)$$

продифференцировав выражение (28) получим

$$\frac{1}{C^3} \frac{dC}{dt} = \frac{n_i S_g}{q \varepsilon_0 \varepsilon_s N_d C_d} + \frac{n_i}{C_d N_d \tau_{go}} \left( \frac{C_{cr}}{C(t)} - 1 \right) \frac{1}{C_{cr}} \quad (29)$$

Полученное выражение описывает процесс релаксации емкости МДП структуры в ходе формирования заряда инверсионного слоя после переключения напряжения смещения  $V_1 \square V_2$ . Это уравнение представляет собой уравнение прямой линии в координатах:

$$x = \left( \frac{C_{ст}}{C(t)} - 1 \right) \frac{1}{C_{ст}}, \quad y = \frac{1}{C^3} \frac{dC}{dt} \quad (30)$$

т.е. уравнение вида  $y = ax + b$  (рис. 7).

Скорость поверхностной генерации  $S_g$  и время жизни неосновных носителей  $\tau_g$  определяются из тангенса угла наклона зависимости  $a$  и коэффициента  $b$  определяющего сдвиг зависимостей по оси  $\frac{1}{C^3} \frac{dC}{dt}$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются при помощи метода наименьших квадратов.

Тангенс угла наклона прямо пропорционален времени жизни основных носителей заряда в полупроводнике. Отрезок отсекаемый на оси «у» при «х» равном нулю позволяет определить скорость поверхностной генерации носителей заряда (рисунок 7).

Отсюда:

$$S_g = \frac{C_d N_d \varepsilon_s \varepsilon_0 b}{n_i} \quad (31)$$

$$\tau_g = \frac{n_i}{C_d N_d a} \quad (32)$$

где  $C_d$  - ёмкость слоя окисла, определяемая как ёмкость исследуемых структур при напряжениях обогащения,  $N_d$  - концентрация донорной примеси,  $\varepsilon_s$  - диэлектрическая проницаемость кремния,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $n_i$  - собственная концентрация носителей заряда в Si при заданной температуре,  $a$  - угол наклона полученных зависимостей,  $b$  - точка их пересечения с осью  $\frac{1}{C^3} \frac{dC}{dt}$ .

Таким образом, данный метод позволяет определять генерационно-рекомбинационные характеристики ГР П-Д, проводя измерения релаксационной неравновесной емкости в различных режимах (различные температура, напряжение переключения), можно определить параметры генерационных центров как в ОПЗ, так и на ГР П-Д.

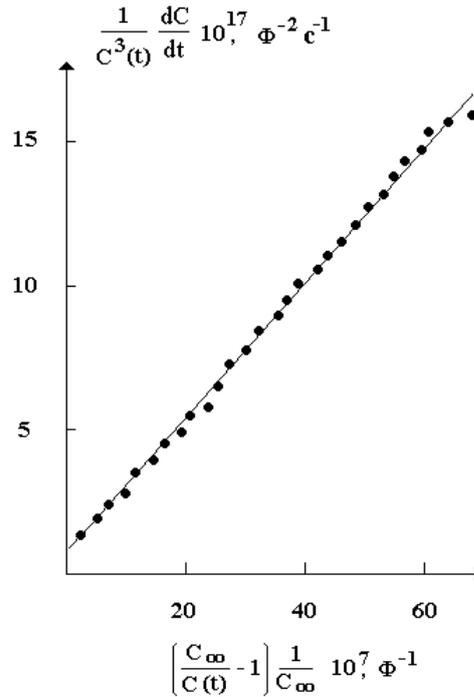


Рис. 7. Экспериментальные значения  $C(t)$ , для одной из структур МДП, построенные при помощи выражения (29).

Проводя измерения релаксации емкости МДП структуры (после переключения напряжения  $V_1-V_2$ ) при различных температурах, по температурной зависимости тангенса угла можно определять энергетические характеристики объемного генерационного центра в полупроводнике. Другими словами, по температурной зависимости времени жизни носителей заряда из соотношения  $\tau_g = \tau_0 \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right)$ , достаточно просто находится глубина залегания энергетического уровня  $E_g$ , через который идет генерация носителей заряда.

### **2.3. Краткие выводы к Главе 2**

Ёмкостные методы позволяют определять генерационно-рекомбинационные характеристики границ раздела полупроводник-диэлектрик и о обладают наглядностью интерпритации полученных экспериментальных данных

## **ГЛАВА 3**

### **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК-ДИЭЛЕКТРИК**

#### **1.3. Влияние температуры оплавления стекла на параметры границы раздела Si-стекло**

Как было показано, электрофизические параметры межфазной границы раздела полупроводник-стекло в значительной степени определяются компонентным составом и структурной однородностью, которая для диэлектриков на основе свинцово-боросиликатных стекол зависит от режимов их нанесения на полупроводниковую поверхность. В связи с этим нами было проведено исследование плотности поверхностного заряда, локализованного на границе раздела Si-стекло, в зависимости технологических режимов термической обработки, сопутствующих нанесению стекла [49]. Тестовые структуры изготавливались путём нанесения стекла на подложку Si n – типа проводимости, с кристаллографической ориентацией <100>.

Нанесение стекла осуществлялась при помощи электрофореза из суспензии, содержащей мелкодисперсную шихту стекла и изопропилиновый спирт, с последующим оплавлением при температуре 670-720 и отжигом в бескислородной атмосфере.

Толщина полученных слоёв свинцово-боросиликатного стекла составляла  $d = (2 \text{ } 0,2) \cdot 10^{-4}$  см. Массовое содержание входящих в стекло оксидов составляло:  $\text{SiO}_2$  – 30 %;  $\text{PbO}$  – 50%;  $\text{B}_2\text{O}_3$  – 15%. Также исследуемые стёкла содержали оксиды алюминия и тантала с массовыми долями 5% и оксиды щелочных металлов  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , массовые доли которых не превышали 0,01%. В качестве основного метода исследования использовался метод изотермической релаксации ёмкости МСП (металл-стекло-полупроводник) структур в процессе формирования заряда инверсионного слоя, после переключения напряжения, прикладываемого к структуре  $V_1 - V_2$  где  $V_1 < V_2$ . Для изготовления структур, на поверхность стекла путем вакуумного напыления наносились алюминиевые электроды площадью  $0,01 \text{ см}^2$ . На рисунке 8 приведены релаксационные зависимости двух из исследуемых структур, изготовленных на основе кремния с исходным удельным сопротивлением 5 Ом см. Зависимость 1 соответствует структуре, сформированной оплавлением стекла при  $T = 670 \text{ }^\circ\text{C}$ , а зависимость 2 – структуре, сформированной оплавлением стекла при  $T = 720 \text{ }^\circ\text{C}$ . Приведенные зависимости снимались на частоте 350 кГц, в темноте, при температуре  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ , после импульсного увеличения напряжения от 8 до 20 вольт. Из приведенных зависимостей видно, что скорость формирования заряда инверсионного слоя, в структурах сформированных оплавлением при  $T = 670 \text{ }^\circ\text{C}$  значительно меньше, чем в структурах сформированных при  $T = 720 \text{ }^\circ\text{C}$ . Согласно имеющимся данным [4-6], скорость формирования заряда инверсионного слоя, в структурах МСП определяется как объемными генерационными центрами, так и плотностью поверхностных состояний, локализованных на межфазной границе раздела полупроводник - стекло или в самом стекле, в слоях, прилегающих к полупроводнику.

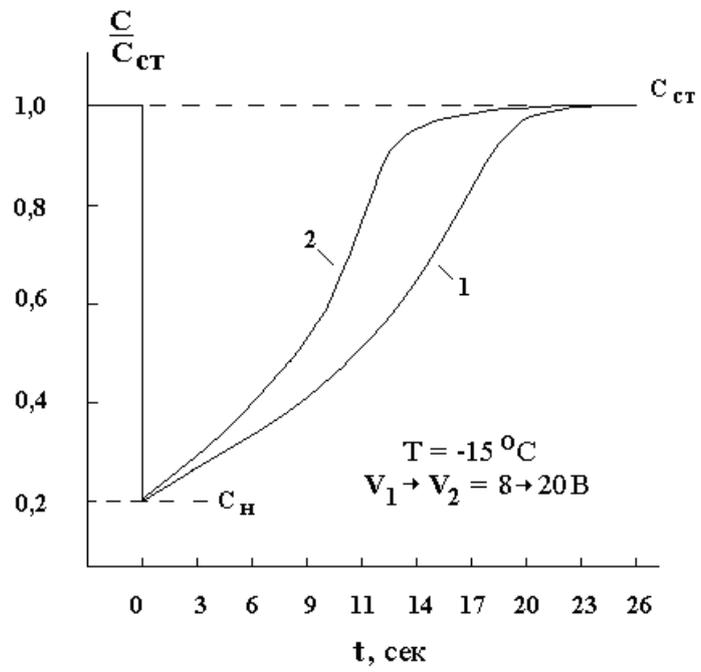


Рис.8. Релаксационные зависимости исследуемых структур.

Для определения величины плотности поверхностных состояний и их вклада в процесс релаксации емкости, во всех структурах, при помощи метода высокочастотных вольт-фарадных характеристик было определено спектральное распределение интегральной плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны Si. Измерение вольт-фарадных характеристик проводилось в темноте, на частоте 350 кГц, при комнатной температуре.

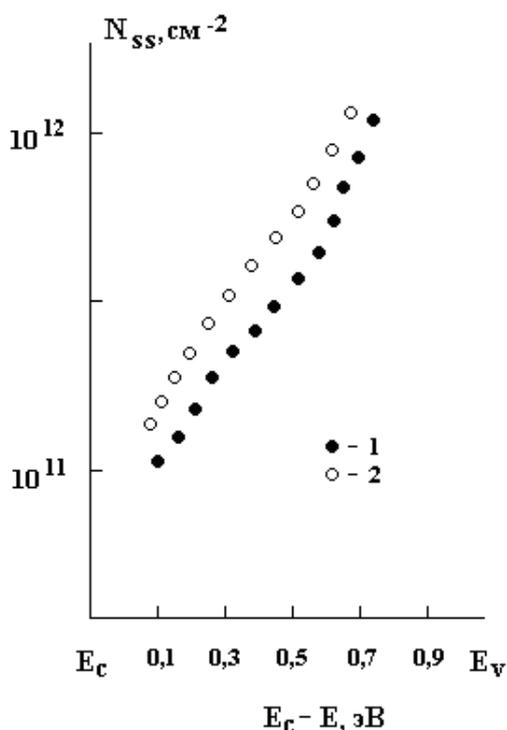


Рис.9. Распределение плотности поверхностных состояний в исследованных структурах.

На рисунке 9 приведено это распределение для двух из измеренных структур, сформированных оплавлением стекла при  $T = 670$  °С, (зависимость 1) и при  $T = 720$  °С (зависимость 2). Как видно из приведенных зависимостей распределение интегральной плотности поверхностных состояний, в структурах обеих групп имеет одинаковый характер.

Однако в структуре, сформированной при повышенной температуре оплавления, абсолютное значение величины плотности электронных состояний, несколько выше, по сравнению со структурой, сформированной

при пониженной температуре. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что увеличение скорости формирования заряда инверсионного слоя, в структурах, изготовленных при температуре оплавления стекла 7200С, вызвано увеличением плотности электронных состояний, локализованных на границе раздела полупроводник - стекло. Следует отметить, что аналогичные результаты были получены для структур, в которых в качестве диэлектрика использовались свинцово-боро-силикатное стекло следующего состава SiO<sub>2</sub> – 40 %; PbO –45%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –15%. Следовательно, при формировании пассивирующих покрытий на основе свинцово-боро-силикатных стекол указанного состава, оплавлении стекла целесообразно проводить при температурах не превышающих 670 °С.

### **2.3. Влияние давления на свойств границ раздела полупроводник диэлектрик.**

Для изучения влияния давления на параметры трехслойных структур использовалась следующая методика.

Запишем условие электронейтральности структуры МДП:

$$kqNx + Q_p + Q_{ss} = Q_{cs} \quad (33)$$

где  $k$  - площадь омического контакта,  $q$  - заряд электрона,  $N = N_m$  - концентрация мелкой легирующей примеси,  $x$  - ширина области пространственного заряда (ОПЗ),  $Q_p$  - заряд инверсионного слоя,  $Q_{ss}$  - заряд поверхностных состояний,  $Q_{cs}$  - заряд на затворе структуры МДП.

Продифференцировав правую и левую часть уравнения (33) по времени  $t$ , получим выражение описывающее изменение заряда во времени:

$$kqN \frac{dx}{dt} + \frac{dQ_p}{dt} + \frac{dQ_{ss}}{dt} = \frac{dQ_{cs}}{dt} \quad (34)$$

Так как в процессе релаксации заряд на металлическом электроде не изменяется ( $\frac{dQ_{CS}}{dt} = 0$ ), то выражение (34) будет выглядеть так:

$$kqN \frac{dx}{dt} + \frac{dQ_P}{dt} + \frac{dQ_{SS}}{dt} = 0 \quad (35)$$

Изменение заряда инверсионного слоя можно записать в виде:  $\frac{dQ_P}{dt} = Aqkx$ , где  $A$  - скорость генерации носителей заряда в объеме полупроводника, а изменение заряда поверхностных состояний  $\frac{dQ_{SS}}{dt} = Sqk$ , где  $S$  - скорость поверхностной генерации носителей заряда. С учетом этих обозначений уравнение (35) примет вид:

$$kqN \frac{dx}{dt} + Aqkx + Sqk = 0 \quad (36)$$

или, после упрощений:

$$-\frac{dx}{dt} = \frac{A}{N}x + \frac{S}{N} \quad (37)$$

Это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка. Решив его относительно  $x$ , получим:

$$x = C \exp\left(-\frac{A}{N}t\right) - \frac{S}{A}, \quad (38)$$

где  $C$  - постоянная интегрирования. Для ее определения воспользуемся начальным условием  $x(t=0) = x_0$  - значение ширины ОПЗ в начале процесса релаксации. Тогда решение (6) примет вид:

$$x = \left(x_0 + \frac{S}{A}\right) \exp\left(-\frac{A}{N}t\right) - \frac{S}{A} \quad (39)$$

Полученную расчетную временную зависимость ширины ОПЗ можно использовать для определения величин скорости поверхностной и объемной генерации носителей заряда при сравнении её с экспериментальной зависимостью. Используя общепринятую модель структуры МДП, можно показать, что временная зависимость измеряемой емкости (без учета влияния формирующегося заряда инверсионного слоя) имеет следующий вид:

$$C(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 K C_D}{K + x(t)C_D} \quad (40)$$

здесь:  $K$  - площадь управляющего электрода,  $C_D$  - емкость слоя диэлектрика,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная.

Величина  $C_D$  - определяется по высокочастотной вольт-фарадной характеристике, величину  $C(t)$  можно найти для каждого момента времени  $t$  из экспериментальной релаксационной характеристики структуры МДП.

На рисунке 10 приведены экспериментальная ( $1^1$ ), измеренная на частоте 250 кГц, при температуре  $-15\text{ C}^0$  и теоретическая ( $1^2$ ) зависимости  $C(t)$  для одного из контрольных образцов Al - n - Si<Ni >- SiO<sub>2</sub> - Al, полученные после переключения напряжения  $V_1 \rightarrow V_2$  ( $V_1=7\text{ В}$ ,  $V_2=14\text{ В}$ ). Величины скорости объемной ( $A$ ) и поверхностной ( $S$ ) генерации найдены при помощи соотношений (39,40) методом оптимального подбора:  $A = 9 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $S = 4 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . При указанных значениях  $A$  и  $S$ , расчетная зависимость релаксации емкости хорошо совпадает с экспериментальной зависимостью. Отклонение расчетной зависимости от экспериментальной, в конце процесса релаксации, обусловлено влиянием растущего слоя инверсионного заряда и увеличением вероятности обратного захвата генерированных носителей заряда. Зависимости ( $2^1$ ) и ( $2^2$ ), измеренные при аналогичных условиях, соответствуют образцу, подвергнутому

всестороннему гидростатическому сжатию до давлений 8 кБар. Из приведенных зависимостей видно, что расчетная ( $2^2$ ) и экспериментальная ( $2^1$ ) зависимости хорошо совпадают при значениях  $A = (8-9) \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $S = (1-2) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . На наш взгляд это указывает на то, что при указанных величинах давления, концентрация и энергетическое распределение примесных центров обусловленных Ni, практически не изменяется, а уменьшение скорости поверхностной генерации обусловлено изменением плотности поверхностных состояний. Для подтверждения этого предположения со структур, подвергнутых воздействию давления, химическим способом (обработка в парах плавиковой кислоты) удалялся слой  $\text{SiO}_2$  и при помощи вакуумного осаждения Au (без подогрева подложки) изготавливались диоды Шоттки типа Au-n-Si<Ni>. Далее, при помощи метода изотермической релаксации емкости идентифицировалась примесь Ni и определялась ее концентрация. Анализ полученных результатов показал следующее. Во всех диодах Шоттки, как в контрольных, так и в изготовленных на пластинах подвергавшихся давлению, энергетическое положение примеси никеля ( $E_C - 0.4 \pm 0,03 \text{ эВ}$  и  $E_V + 0,2 \pm 0,03 \text{ эВ}$ ) и ее концентрация ( $n = (3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) практически не изменялись (разброс этих значений для различных диодов составлял 5-7%), что лежит в пределах ошибки эксперимента.

Непосредственное измерение плотности поверхностных состояний, выполненное при помощи метода высокочастотны вольт фарадных характеристик, показало (рисунок 11) , что в структурах подвергнутых воздействию давления распределение интегральной плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника, в диапазоне энергий больших  $E_C - 0,35 \text{ эВ}$ , уменьшается по сравнению с контрольными структурами.

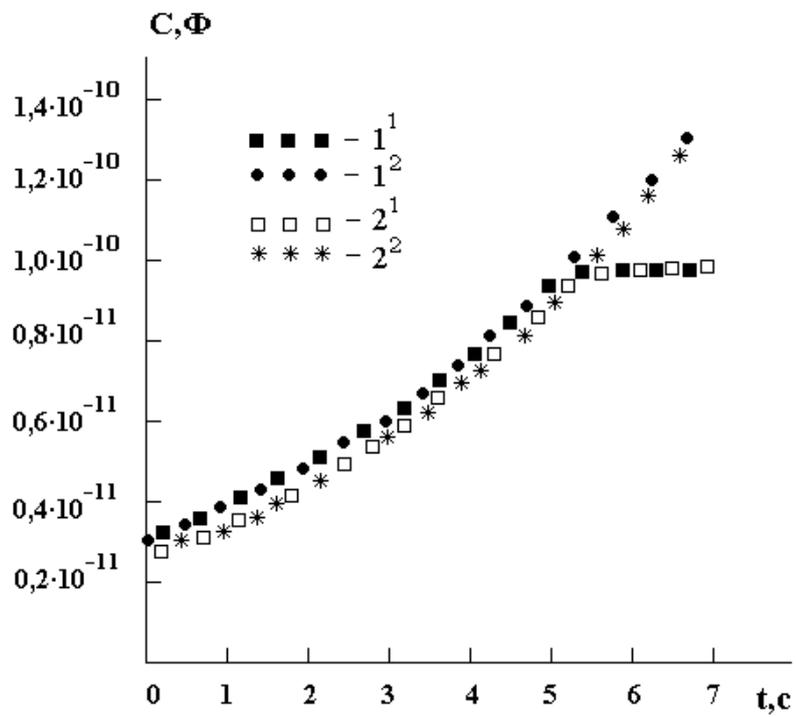


Рис.10. Экспериментальные ( $1^1, 2^1$ ) и теоретические ( $1^2, 2^2$ ) зависимости релаксации емкости исследуемых структур ( $1^1$  и  $1^2$  - контрольные,  $2^1, 2^2$  - подвергнутые давлению).

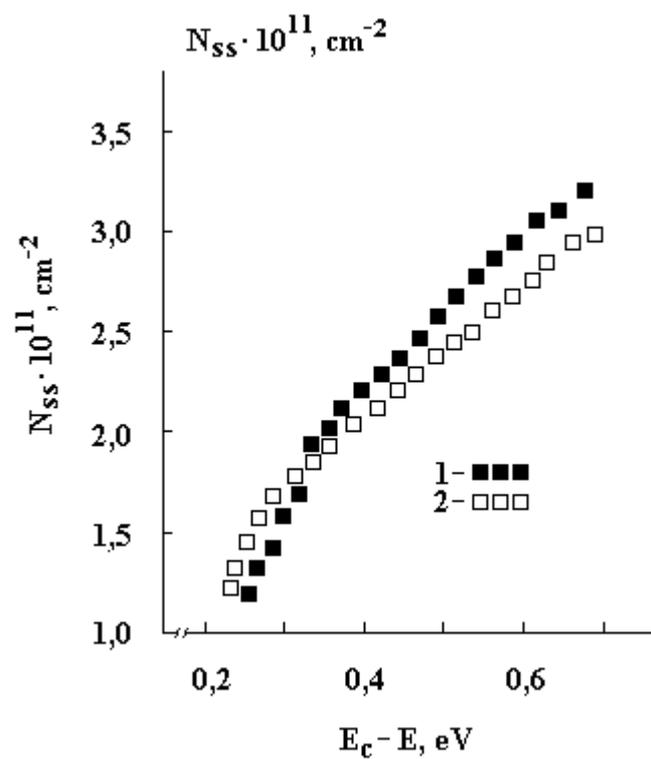


Рис. 11. Распределения интегральной плотности поверхностных состояний для исследованных структур (1-контрольная структура, 2-структура подвергнутая давлению в 8 кБар )

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что барическая обработка структур Al - n - Si <Ni >- SiO<sub>2</sub> - Al при помощи всестороннего сжатия до давлений в 8 кБар в течении 20 минут, приводит к перестройке структуры переходного слоя Si -SiO<sub>2</sub>, следствием которой является уменьшение интегральной плотности электрически активных поверхностных состояний, при этом указанная величина давления не оказывает заметного влияния на свойства объемных генерационных центров.

### **2.3. Влияние ультразвуковой обработки на свойств границ раздела полупроводник диэлектрик.**

Для изучения влияния ультразвуковых воздействий на свойства границы раздела полупроводник – стекло нами изготавливались тестовые структуры. Эти структуры изготавливались путём нанесения стекла на подложку Si, n – типа проводимости, с кристаллографической ориентацией <100>. Нанесение стекла осуществлялась при помощи электрофореза из суспензии, содержащей мелкодисперсную шихту стекла (SiO<sub>2</sub>-PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) и изопропилиновый спирт, с последующим оплавлением при температуре 670 - 680 градусов и отжигом в бескислородной атмосфере. Толщина полученных слоёв стекла составляла  $d = (2 \pm 0,2) \times 10^{-4}$  см. Массовое содержание входящих в стекло оксидов составляло: SiO<sub>2</sub> – 30 %; PbO –50%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –15%. Также исследуемые стёкла содержали оксиды алюминия и тантала с массовыми долями 5% и оксиды щелочных металлов K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O, массовые доли которых не превышали 0,01%. МДП структуры изготавливались при помощи вакуумного осаждения алюминия на поверхность слоя стекла (управляющий электрод) и на тыльную поверхность пластин кремния (омический контакт). Диаметр управляющих электродов - 3 мм. Изготовленные структуры подвергались облучению продольными ультразвуковыми волнами частотой 2,5 мГц мощностью 0,5 Вт, в течении 40 минут, т.е. использовалось

воздействие, аналогичное описанному в [47]. Звукопроводом между пьезопреобразователем и исследуемой структурой являлась жидкость.

В соответствии с общепринятой моделью структуры МДП, временная зависимость емкости этой структуры, после импульсного увеличения прикладываемого напряжения, (без учета влияния обратного захвата на скорость формирующегося заряда инверсионного слоя) может быть выражена при помощи следующего соотношения:

$$C(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 K C_D}{K + x(t)C_D} \quad (41)$$

здесь:  $K$  - площадь управляющего электрода,  $C_D$  - емкость слоя диэлектрика,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon$  - электрическая постоянная,  $x(t)$  - временная зависимость ширины области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника. Величина  $C_D$  - определяется по высокочастотной вольт-фарадной характеристике. Значения  $C(t)$  можно найти, для каждого момента времени  $t$ , из экспериментальной релаксационной характеристики структуры МДП, при помощи метода, описанного в работе [ 50], используя выражение (7) указанной работы:

$$x = \left( x_0 + \frac{S}{A} \right) \exp\left( -\frac{A}{N} t \right) - \frac{S}{A} \quad (42)$$

здесь:  $x$  - толщина слоя объемного заряда полупроводника структуры МДП;  $x_0$ - начальная толщина этого слоя;  $A$  - скорость генерации носителей заряда в объеме полупроводника;  $S$  - скорость поверхностной генерации носителей заряда;  $N$  - концентрация легирующей примеси.

Полученную расчетную временную зависимость ширины ОПЗ, изменяющуюся в процессе формирования заряда инверсионного слоя, можно использовать для определения величин скорости поверхностной и объемной генерации носителей заряда при сравнении её с экспериментальной зависимостью. Для изучения энергетического спектра объемных состояний,

локализованных в кремнии, использовалась методика идентификации, описанная в [44], для чего изготавливались диоды Шоттки типа Au-n-Si, путем химического удаления слоя стекла и вакуумного осаждения Au.

На рисунке 12 приведены экспериментальная (1), измеренная на частоте 150 кГц, при температуре  $-11\text{ C}^0$  и теоретическая (2) зависимости  $C(t)$  для одного из контрольных образцов, полученные после переключения напряжения  $V_1 \rightarrow V_2$  ( $V_1=8\text{ В}$ ,  $V_2=15\text{ В}$ ). Величины скорости объемной (A) и поверхностной (S) генерации найдены при помощи соотношений (1,2) методом оптимального подбора:  $A = 9 \cdot 10^{13}\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $S = 4 \cdot 10^9\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Видно, что при указанных значениях A и S, расчетная зависимость релаксации емкости хорошо совпадает с экспериментальной зависимостью. Отклонение расчетной зависимости от экспериментальной, в конце процесса релаксации, обусловлено влиянием растущего слоя инверсионного заряда и увеличением вероятности обратного захвата генерированных носителей заряда. Зависимость (3) измеренная при аналогичных условиях, соответствуют образцу, подвергнутому воздействию ультразвуком. Из приведенных зависимостей видно, что расчетные (2,4) и экспериментальные (1,3) зависимости хорошо совпадают при значениях  $A = (8-9) \cdot 10^{13}\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $S = (1-2) \cdot 10^9\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . На наш взгляд это указывает на то, что при указанных ультразвуковых воздействиях, концентрация и энергетическое распределение примесных центров, имеющих в объеме полупроводника, практически не изменяется, а уменьшение скорости поверхностной генерации ( $S = 4 \cdot 10^9\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  - в контрольных и  $S = (1-2) \cdot 10^9\text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  - в обработанных ультразвуком структурах) обусловлено изменением плотности поверхностных состояний. Для подтверждения этого предположения со структур, подвергнутых воздействию ультразвуком, химическим способом (обработка в парах плавиковой кислоты) удалялся слой стекла и при помощи вакуумного

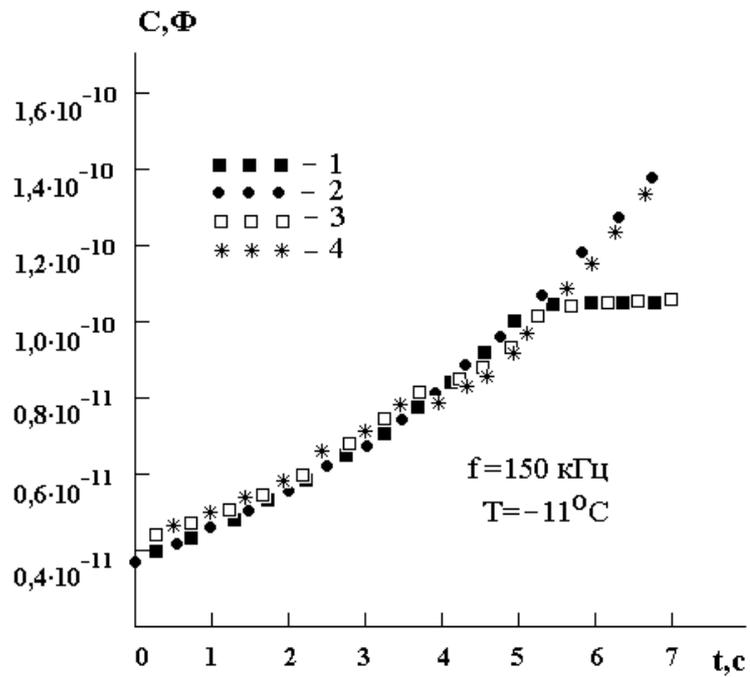


Рис.12. Экспериментальные (1,3) и теоретические (2,4) зависимости релаксации емкости исследуемых структур 3 и 4 - контрольные, 1, 2 - подвергнутые ультразвуковому воздействию

осаждения Au (без подогрева подложки) изготавливались диоды Шоттки типа Au-n-Si. Далее, при помощи метода изотермической релаксации емкости [44], определялось энергетическое распределение и концентрация примесных центров, локализованных в базовой области диодов. Анализ полученных результатов показал следующее. Во всех диодах Шоттки, как в контрольных, так и в изготовленных на пластинах подвергавшихся ультразвуковому воздействию, энергетическое положение примесных центров ( $E_C - 0,27$  эВ и  $E_C - 0,54$  эВ, а так же их концентрация ( $n = (3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) практически идентичны (разброс этих значений для различных диодов составлял 5-7%), что лежит в пределах ошибки эксперимента. На наш взгляд, это подтверждает то, что указанное ультразвуковое воздействие не влияет на параметры объемных генерационных центров и, следовательно, на скорость объемной генерации носителей заряда. Непосредственное измерение плотности поверхностных состояний, выполненное при помощи метода высокочастотных вольт фарадных характеристик [29], (на частоте 150 кГц, в интервале температур от -5 до -18 °С) показало (рисунок 2), что в структурах подвергнутых указанному ультразвуковому воздействию, распределение интегральной плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника, уменьшается по сравнению с контрольными структурами. Причем наиболее заметно это уменьшение в диапазоне энергий больших, чем  $E = E_C - 0,4$  эВ.

Следует отметить, что аналогичное уменьшение плотности заряда, локализованного на межфазной границе раздела полупроводник – диэлектрик, наблюдалось в структурах МДП, подвергнутых всестороннему сжатию, при этом наблюдалось и уменьшение скорости поверхностной генерации.

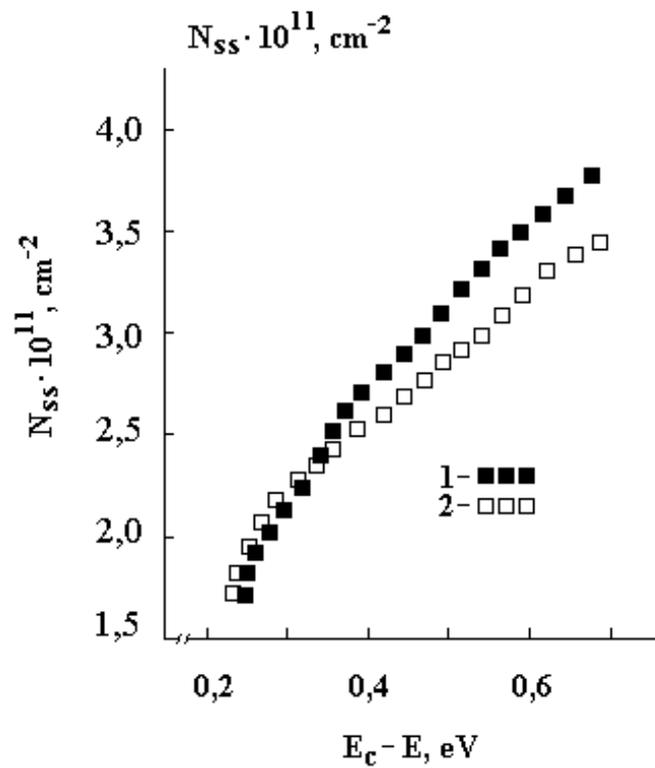
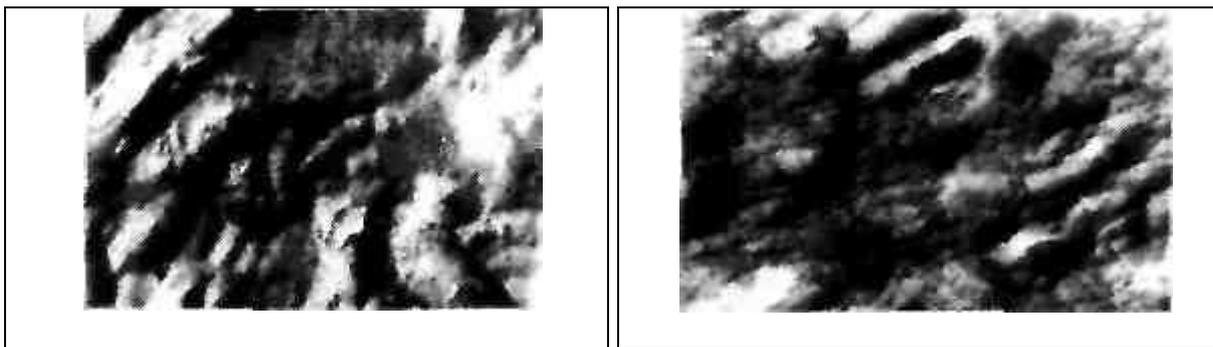


Рис. 13. Распределения интегральной плотности поверхностных состояний для исследованных структур (1-контрольная структура, 2-структура подвергнутая ультразвуковому воздействию)

На рисунке 13 приведены, экспериментально измеренные при температуре  $T = -12$  °С, временные зависимости скорости поверхностной генерации  $S(t)$  для контрольной структуры МСП (зависимость 1) и для структуры облученной ультразвуком (зависимость 2). Измерения и расчет скоростей поверхностной генерации было выполнено согласно [47]. Из рисунка видно, что в структуре МСП облученной ультразвуковыми волнами, скорость поверхностной генерации несколько меньше, чем в контрольной структуре. Более того, временная зависимость скорости поверхностной генерации, в облученной структуре, является более плавной.

Учитывая, что спектральное распределение плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны кремния, после облучения ультразвуком, изменяется незначительно, можно сделать следующее предположение: ультразвуковое облучение структур металл-стекло-полупроводник приводит к структурной перестройке слоев стекла на межфазной границе раздела полупроводник-стекло. Уменьшение скорости поверхностной генерации и изменение её временной зависимости может быть обусловлено уменьшением числа и протяженности межфазных границ раздела кристаллических включений, входящих в состав стекла.

Для проверки этого предположения с части структур МДП, химическим способом, удалялся слой алюминия, выполняющего роль управляющего электрода, и в парах плавиковой кислоты удалялись поверхностные слои стекла. После чего производилось микрофотографирование поверхности стекол. На рисунке 14 приведены микрофотографии поверхности (увеличение 2800) стекол для двух структур (а - до воздействия ультразвуковой обработки, б- после воздействия).



а

б

**Рис.14.** Микрофотографии поверхности исследуемых структур, измеренные до воздействия ультразвуковой обработки - (а) и после воздействия после воздействия мощностью  $P = 0,5 \text{ W/cm}^2$  в течение времени  $t = 90$  мин.)- (б).

Из сравнения приведенных фотографий видно, что в структурах подвергнутых воздействию ультразвука, морфология поверхности стекла более однородная, наблюдаемые неоднородности и включения являются более мелкими [50].

### 2.3. Краткие выводы к Главе 3

1. При формировании пассивирующих покрытий на основе свинцово-боросиликатных стекол типа  $\text{SiO}_2 - 40\%$ ;  $\text{PbO} - 45\%$ ;  $\text{B}_2\text{O}_3 - 15\%$ , оплавление стекла целесообразно проводить при температурах не превышающих  $670^\circ\text{C}$ .
2. Барическая обработка структур  $\text{Al} - n - \text{Si} < \text{Ni} > - \text{SiO}_2 - \text{Al}$  при помощи всестороннего сжатия до давлений в 8 кБар в течении 20 минут, приводит к перестройке структуры переходного слоя  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ , следствием которой является уменьшение интегральной плотности электрически активных поверхностных состояний,

3. Ультразвуковая обработка структур Al - n - Si - стекло - Al, частотой 2,5 мГц мощностью 0,5 Вт, в течении 40 минут приводит к уменьшению интегральной плотности электронных состояний, локализованных на межфазной границе раздела полупроводник-стекло, не оказывая влияния на энергетический спектр объемных электронных состояний, находящихся в полупроводнике. Указанные режимы ультразвукового воздействия можно использовать при изготовлении полупроводниковых приборов со структурой МДП, для повышения их быстродействия.

### **2.3. Описание измерительной установки.**

Для измерения высокочастотных вольтфарадных зависимостей и релаксационных характеристик структур металл-диэлектрик-полупроводник использовалась усовершенствованная установка, аналогичная установке, описанной в [56]. Блок схема этой установки приведена на рис.2.5.

Здесь: Г - генератор высокочастотных (100 кГц-1мГц) колебаний синусоидальной формы (типа ГЗ-106), М - мост полных проводимостей (типа МПП-300), У - усилитель сигнала разбаланса моста (В6-1), совмещенный с детектором, ИПН - источники постоянного напряжения смещения (типа КБНС), О - ноль индикатор (осциллограф С1-78), С- двухкоординатный самописец, Сх - измеряемая структура. Мост полных проводимостей (см. рисунок 2.6) состоит из двух трансформаторов - трансформатора напряжения ( $T_1$ ) и трансформатора тока ( $T_2$ ), эталонного комплексного сопротивления ( $RC$ ). Вторичные обмотки трансформатора напряжения включены так, что при условии равенства измеряемого и эталонного комплексных сопротивлений, токи, протекающие по первичным обмоткам трансформатора тока, при подаче переменного напряжения от генератора Г, компенсируют друг друга. Степень компенсации регистрируется при помощи ноль

индикатора (И на рисунке 2.7). Эталонное сопротивление представляет собой параллельную RC цепочку, составленную из эталонного магазина сопротивлений и градуированного конденсатора переменной емкости. В качестве эталонных конденсаторов используются специально градуированные блоки конденсаторов и измерителей добротности Е9-1 и Е12-1.

Эталонное R и емкость C служат для установки баланса моста и для отсчета измеряемых величин. Чувствительность этой установки к разбалансу моста по емкости составляет порядка 0,1 пФ, что вполне достаточно для снятия C-V зависимостей МДП -структур. Для снятия релаксационных характеристик используется переключение напряжения ( $V_1 \rightarrow V_2$ ) от обоих источников ИПН и самописец С.

Для изучения температурных зависимостей релаксации емкости, исследуемая структура МДП помещается в криостат, конструкция которого приведена на рисунке 2.7. Здесь: 1- исследуемая структура, 2- 3- кварцевый стакан, 4- жидкий азот, 5- пенопластовый кожух, 6- обмотка нагревателя, 7- прижимной контакт из фосфористой бронзы, 8- светонепроницаемая камера. Температура измеряемого образца контролируется при помощи термопары хромель-алюмель (Т на рисунке 2.4). Для повышения точности измерения рабочий конец термопары поддерживается при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . ЭДС, создаваемая термопарой, поступает на вольтметр типа В7-21. В описанную установку введена схема стабилизации температуры 12, фиксирующая отклонение термо - ЭДС от заданного значения и управляющей источником питания 10 нагревательного элемента 9. Введение данной схемы позволяет добиться стабилизации температуры в пределах  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

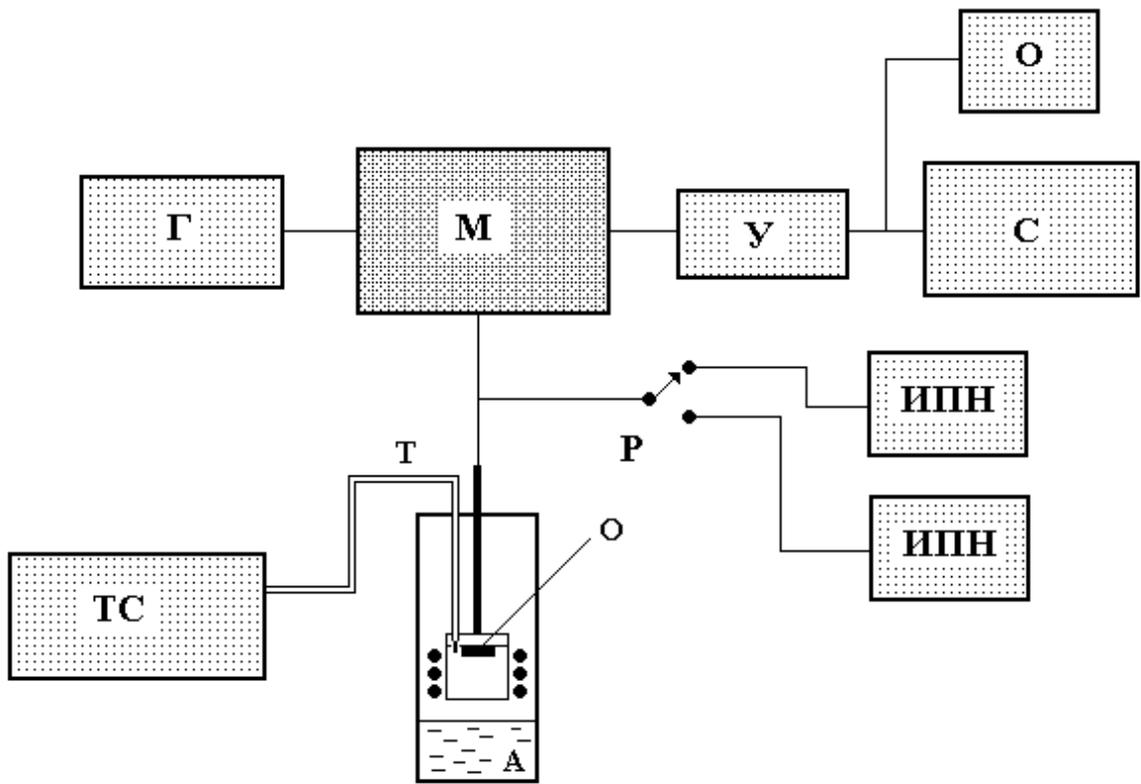


Рисунок 2.5. Блок-схема измерительной установки.

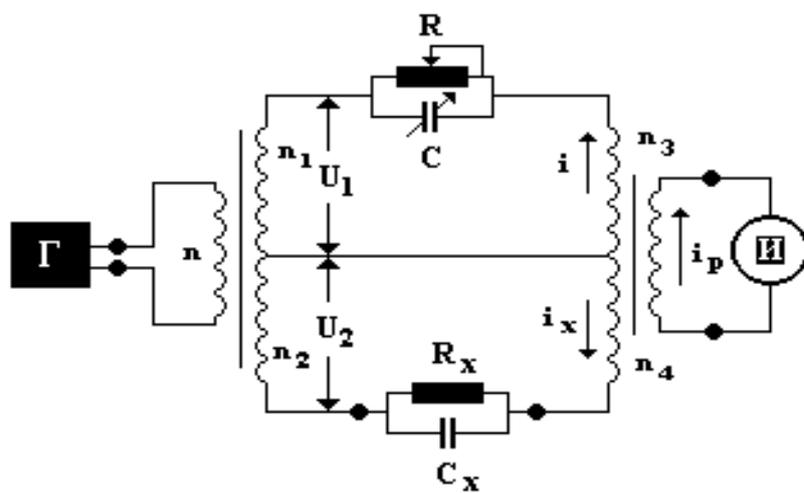


Рисунок 2.6. Схема измерительного моста.

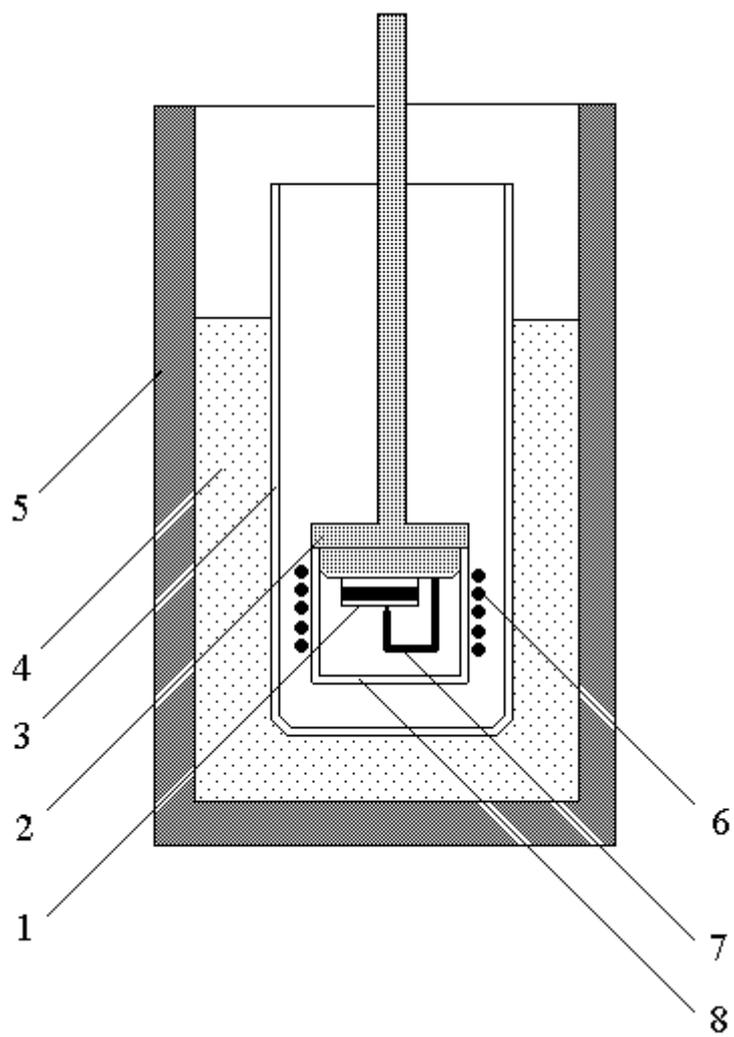


Рисунок 2.7. Конструкция криостата.

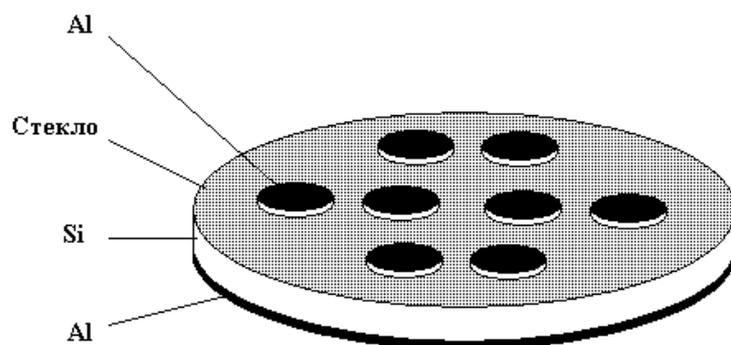


Рисунок 3.4. Внешний вид структур металл-стекло-полупроводник, используемых для изучения влияний всестороннего давления.

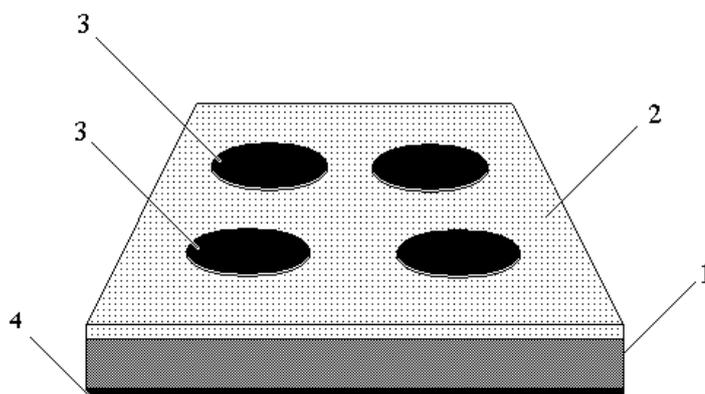


Рис. 2.1. Внешний вид одной из используемых структур.

1- полупроводниковая подложка ( Si), 2 - слой стекла, 3 - алюминиевые управляющие электроды, 4 - омический контакт (Al)

## Выводы и заключение

1. Барическая обработка структур Al - n - Si <Ni >- SiO<sub>2</sub> - Al при помощи всестороннего сжатия до давлений в 8 кБар в течении 20 минут, приводит к перестройке структуры переходного слоя Si -SiO<sub>2</sub> , следствием которой является уменьшение интегральной плотности электрически активных поверхностных состояний,

2. Ультразвуковая обработка структур Al - n - Si - стекло - Al, частотой 2,5 мГц мощностью 0,5 Вт, в течении 40 минут приводит к уменьшению интегральной плотности электронных состояний, локализованных на межфазной границе раздела полупроводник-стекло, не оказывая влияния на энергетический спектр объемных электронных состояний, находящихся в полупроводнике. Указанные режимы ультразвукового воздействия можно использовать при изготовлении полупроводниковых приборов со структурой МДП, для повышения их быстродействия.

## Используемая литература.

1. Полякова А.А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. - Москва: Энергия, 1979.- 168 с.
2. Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. - Сборник статей. Под. ред. В. И. Фистуля. Москва: Металлургия, 1987. - 232 с.
3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. - Москва: Наука, 1990. -688 с.
4. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыгов Н.А. Полупроводниковые приборы. – Москва: Энергоатомиздат,1990,- 576 с.
5. Бехштедт Ф., Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников: Пер. с англ. - Москва: Мир, 1990.- 488 с.
6. Гурский Л.И., Румак Н.В., Куксо В.В. Зарядовые свойства МОП-структур.- Минск: Наука и техника, 1980. - 200 с.
7. Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик – полупроводник. - Киев: Наукова думка, 1978.- 312 с.
8. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. – Ленинград: ЛГУ. 1988. - 302 с.
9. Репинский С.М. Процессы окисления полупроводников и строение границ раздела // Физика и техника полупроводников.- Санкт-Петербург, 2001.- т.5. вып. 9.- С. 1050-1061.
10. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 256 с.
11. Yuriume Y. Deformation of silicon wafers by thermal oxidation // J. Electrochemical Soc. – Tokio, 1982. - V.129, - № 9. - P. 2076-2081.
12. Johannessen J.S., Spicer W.E., Strausser Y.E. Auger depth profiling of interfaces in MOS and MNOS structures // J. Vac. Sci. and Technol. – New York, 1976. - V.13. - № 4. - P. 849-855.

13. Шаповалов В.П., Гридун В.И., Королёв А.Е. Дефектообразования в поверхностной области кремния при его термическом окислении // ФТП. – Ленинград, 1995. – Т.29. - № 11. – С.1995-2001.
14. Романов О.В., Котов И.А. Общая и тонкая структура распределения собственных ловушек по толщине аморфного термического SiO<sub>2</sub> на Si // ФТП. – Санкт-Петербург, 1996. – Т.30. - № 4. – С. 707-711.
15. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1992. – 232 с.
16. Заводинский В.Г. Компьютерное изучение механизмов сегрегации фосфора на границе SiO<sub>2</sub>-Si (100) // ФТП. – Санкт-Петербург, 2000. Т.34. – вып. 3. – С.302-305.
17. Свойства структур металл - диэлектрик – полупроводник / Под ред. Ржанова А.В. – М.: Наука, 1976. -280 с.
18. Гадиян Г.В., Stathis J. Физическая модель и результаты численного моделирования деградации Si / SiO<sub>2</sub> структуры при отжиге в вакууме // ФТП. – Санкт-Петербург, 1998. – Т.32. - № 9. - С. 1079-1082.
19. Гадиян Г.В. Моделирование распределения водорода при инжекции электронов в пленках SiO<sub>2</sub> в сильных электрических полях // ФТП. – Санкт-Петербург, 1997. – Т. 31. - № 3. – С. 257-263.
20. Kropman D., Dolgov S., Korner T. On the kinetics of the generation of point defects in the Si-SiO<sub>2</sub> system // Applied Physics A: Materials Science & Processing. - Berlin, 1996. – V. 62. - № 5. – P. 469-472.
21. Deal B.E., Sklar M., Grove A.S., Snow E.N. Characteristics of the Surface-State Charge (Q<sub>ss</sub>) of Thermally Oxidized Silicon // J. Electrochemical Soc. - Tokyo, 1967. – V.114. – P.266-274.
22. Schroder D. K., Cudberg J. Interpretation surface and bulk effects using pulsed MIS capacitor // Sol. St. Electronics. - New York, 1971. - V. 14. - № 6. -P.1285-1297.
23. Fitzgerald D.J., Grove A.S. Surface recombination in semiconductors // Surf. Sci. - Amsterdam, 1968, - V.9. - № 2. - P. 347-369.
24. Гольдман Е.И., Ждан А.Г. Генерация электронно-дырочных пар у поверхности полупроводника в краевых полях макроскопически заряженных кластеров: эффекты электрических неоднородностей

различных масштабов // ФТП. – Ленинград, 1995. - Т. 29. - № 3. – С. 428-437.

25. Корзо В.Ф., Черняев В.Н. Диэлектрические пленки в микроэлектронике. – М.: Энергия, 1977. – 368 с.
26. Вавилов В.С., Горин М., Данилин Н.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике. – М.: Радио и связь, 1990. - 184 с.
27. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов.- Москва: Высшая школа, 1984.- 288 с.
28. Александров О.В. ,Афонин Н.Н. Особенности сегрегационного перераспределения фосфора при термическом окислении сильно легированных слоев кремния // Физика и техника полупроводников.- Санкт-Петербург, 2005.- т.39, вып. 6.- С. 67-71.
29. Зайнабидинов С.З., Власов С.И., Насиров А.А.. Не равновесные процессы на границе раздела полупроводник –диэлектрик.- Ташкент: Университет, 1995.-112 с.
30. Дмитриев С.Г., Маркин Ю.В. Макроскопические ионные ловушки на границе раздела кремний – окисел // Физика и техника полупроводников.- Санкт- Петербург, 1998.- том 32, вып. 12. - С. 1439- 1444.
31. Ждан А.Г., Кухарская Н.Ф., Чучева Г.В. Определение абсолютной величины поверхностного потенциала полупроводника по квазистатическим вольт- фарадным характеристикам МДП структуры // Физика и техника полупроводников.- Санкт- Петербург, 2003.- том 37, вып. 6. - С. 686-691.
32. Красников Г.Я., Зайцев НА., Матюшкин И.В. Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si -SiO<sub>2</sub> // Физика и техника полупроводников.- Санкт- Петербург, 2003.- том 37, вып. 1. - С. 44-49
33. Kern W, Schnabl G.L. Chemically Vapor-deposited Borophosphosilicate Glasses for Silicon device Applications. // RCA Rev.- New York, 1982. v.43. № 3.- P. 423- 457.
34. Vasilev V.Y. Borophosphosilicate Glass Films in Silicon Microelectronics, Part 1: Chemical Vapor Deposition, Componets, and Properties // Microelectronics, - Moskva, 2004. -vol. 33, №5,- P. 271-284.

35. Vasilev V.Y. Borophosphosilicate Glass Films in Silicon Microelectronics, Part 2: Structure and Applications // Microelectronics, - Moskva, 2005, - vol. 34, №2, -P. 67-76.
36. Аикулин В.Х., Викторова О.С., Пруганова Л.М., Айнутдинова Р.И., Мещерякова М.Г. Влияние ликвации на свойства малощелочных боросиликатных стекол. // Стекло и керамика.- Москва, 1991, № 4,- С. 61 – 68.
37. Flowers P.L. Dielectric breakdown and device evaluation of fritter glass composition. // J. Elektrochem. Sos. - New York, 1981. V. 128, № 10 . 3. 2179 - 2183.
38. Парчинский П.Б., Власов С.И., Насиров А.А., Адилов Т.П. Исследование заряда диэлектрика и границы раздела кремний свинцово – боросиликатное стекло. // Письма в ЖТФ. -Москва, 1996.- т.26. вып. 2. - С. 46 - 49.
39. Парчинский П.Б., Власов С.И. Генерация не основных носителей заряда на границе раздела кремний-свинцово-боросиликатное стекло. // Микроэлектроника. - Москва, 2001.- том.30, №6. -С.466-470.
40. Парчинский П.Б. Власов С.И., Влияние  $\gamma$  - облучения на характеристики пассивирующих покрытий на основе свинцово-бороиликатных стекол. // Письма в ЖТФ. - Москва, 2002, -том.28, вып. 22,- С. 17-22.
41. Снитко О.В., Саченко А.В., Примаченко В. Б. и др. Проблемы физики поверхности полупроводников.- Киев, 1981. -332 с.
42. Девисон С., Левин Дж. Поверхностные (таммовские) состояния. - М.: Мир, 1973. – 203 с.
43. Чистов Ю.С., Сыноров В.Ф. Физика МДП-структур. - Воронеж: Издательство ВГУ, 1989. – 224 с.
44. Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. -176 с.
45. Zerbst M. Relaxation effekte an halbleiter-isolator grenzflachen // Z. Angew. Phys. – Berlin, 1966. - V. 22. - № 1. - P. 3039-3046.
46. Sah C.T., Fu H.S. Current and capacitance transient responses of MOS capacitor // Phys. Status Sol. (a). – Berlin, 1972. - V. 11. - № 1. - P. 297-301.

47. Власов С.И., Овсянников А.В. Скорость поверхностной генерации носителей заряда на границе раздела полупроводник-стекло // Электронная обработка материалов. – Кишинев, 2008. - №1. – С.91-94.
49. Власов С.И., Исмаилов Б.К. , Кучкаров Б.Х. Влияние температуры оплавления стекла на параметры границы раздела Si –стекло. Материалы международной научно-технической конференции. Фундаментальные и прикладные проблемы физики. Часть 1. Саранск, 28-30 мая 2012 г. Стр.88-90.
50. Власов С.И., Овсянников А.В., Исмаилов Б.К., Кучкаров Б.Х. Влияние ультразвуковой обработки на скорость формирования заряда инверсионного слоя в структурах металл- стекло- полупроводник. Материалы международной научно-практической конференции. Структурная релаксация в твердых телах. Винница, 29-31 мая. 2012 г. Стр.234-236
51. Ovsyannikov A.V., Ismailov B.K., Kuchkarov B.H. Effect of pressure on the properties of Al-SiO<sub>2</sub>-n-Si<Ni> structures. Semiconductor Physics, Quantum electronics and Optoelectronics. 2012. Vol. 15. № 2. P.166-169.

## Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Vlasov S.I., Ovsyannikov A.V., **Ismailov B.K.**, Kuchkarov B.H. Effect of pressure on the properties of Al-SiO<sub>2</sub>-n-Si<Ni> structures. Semiconductor Physics, Quantum electronics and Optoelectronics. 2012. Vol. 15. № 2. P.166-169.
2. Власов С.И., **Исмаилов Б.К.**, Кучкаров Б.Х. Влияние температуры оплавления стекла на параметры границы раздела Si –стекло. Материалы международной научно-технической конференции. Фундаментальные и прикладные проблемы физики. Часть 1. Саранск, 28-30 мая 2012 г. Стр.88-90.
3. Власов С.И., Овсянников А.В., **Исмаилов Б.К.**, Кучкаров Б.Х. Влияние ультразвуковой обработки на скорость формирования заряда инверсионного слоя в структурах металл- стекло- полупроводник. Материалы международной научно-практической конференции. Структурная релаксация в твердых телах. Винница, 29-31 мая. 2012 г. Стр.234-236
4. Власов С.И., Кучкаров Б.Х., **Исмаилов Б.К.** Влияние ультразвукового воздействия на свойства структур металл-стекло-полупроводник. **Вестник НУУз. № 2/1, 2013г. Стр.16-18 .**