

Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК 621.315.2

На правах рукописи

НАРЕЙКО АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА
СВОЙСТВА ГРАНИЦЫ КРЕМНИЙ-ОКСИД КРЕМНИЯ**

05.27.01- твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Минск 2000

Работа выполнена в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Научный руководитель -

д.ф.-м.н., профессор Борисенко В.Е.

Научный консультант -

к.ф.-м.н. Данилюк А.Л.

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор Квасов Н.Г.

к.ф.-м.н., доцент Углов В.В.

Оппонирующая организация -

Институт физики твердого тела и
полупроводников НАН Республики
Беларусь

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. На сегодняшний день самым распространенным полупроводниковым материалом для интегральной электроники является кремний. Причем структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на его основе играют очень важную роль при изготовлении приборов интегральной твердотельной электроники. Прогресс в совершенствовании оборудования и технологии позволил достичь субмикронных размеров МДП-структур для серийных изделий.

Однако с уменьшением размеров элементов интегральных схем электрофизические процессы в них претерпевают качественные изменения. Происходит усиление влияния на их электрические характеристики границ раздела и скоплений дефектов. Возникает ряд специфических явлений, связанных с токовыми неустойчивостями, например, самопроизвольная генерация колебаний. Такие явления изменяют функционирование твердотельных структур и приборов, ведут к непредсказуемым изменениям и деградации электрических характеристик. В результате проявляются такие эффекты, как низкочастотный шум, модуляция выходных характеристик.

Дефектные области и границы раздела относятся к метастабильным, неустойчивым системам. Их свойства чувствительны к влиянию неконтролируемых технологических воздействий. Поэтому при изготовлении МДП-структур с субмикронными размерами необходимо обеспечивать требуемые параметры при минимуме побочных воздействий.

К одному из видов побочных трудно контролируемых воздействий относятся слабые постоянные, переменные и импульсные магнитные поля. Энергия их прямого воздействия на 2-3 порядка меньше энергии тепловых флуктуаций при комнатной температуре. Однако они оказывают существенное влияние на процессы с энергией активации 1-5 эВ. Влияние слабых магнитных полей (СМП) на свойства дефектных областей полупроводников, ионных кристаллов и других метастабильных объектов интенсивно исследуются. Механизмы их воздействия на свойства дефектных областей еще нуждаются в уточнении. Характерной особенностью этих явлений в твердых телах является эффект последействия.

Проведенные исследования показали, что воздействие СМП с индукцией 0.05-0.30 Т на границу кремний-оксид ведет к изменениям плотности поверхностных состояний, встроенного заряда, тока через оксид, а также к генерации дефектов и структурной перестройке дефектно-примесной системы. Однако интерпретация физических процессов, лежащих в основе указанных эффектов, отсутствует. С точки зрения идентификации физических механизмов задача исследования влияния СМП на свойства границы кремний-оксид является актуальной и представляет значительный интерес. Такие исследования актуальны для современной кремниевой технологии МДП-структур, так как создание твердотельных приборов с необходимыми характеристиками напрямую зависит от наличия информации

не только об электронных свойствах используемых материалов, но и о влиянии различных факторов.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках исследовательских проектов Республиканской научно-технической программы «Информатика», утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 327 от 16.11.88 г. (НИР № 88-1035 выполнялась в 1988-1989 гг., № ГР 0188072431, ГБЦ № 89-1089 выполнялась в 1989-1990 гг., № ГР 0291007370).

Целью настоящей диссертационной работы явилось установление закономерностей воздействия слабого постоянного и переменного магнитного поля на электрофизические параметры оксида кремния и границы кремний-оксид, выяснение механизма последствия этого поля; разработка рекомендаций по обеспечению долговременной стабильности МДП-структур в условиях воздействия СМП.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

- проведение анализа известных закономерностей процессов, происходящих при воздействии СМП на границу кремний-оксид, определение основных факторов, влияющих на процессы деградации оксида кремния и его границы с кремнием, анализ имеющихся представлений о механизмах таких процессов;
- установление закономерностей влияния СМП на изменение тока канала МДП структуры и тока через оксид кремния;
- выяснение закономерностей релаксации электрофизических свойств границы кремний-оксид после воздействия СМП;
- разработка моделей, описывающих влияние СМП на свойства границы кремний-оксид;
- разработка рекомендаций по обеспечению долговременной стабильности параметров МДП структур в условиях воздействия СМП.

Методы исследования. При проведении экспериментальных исследований применялась разработанная система контроля параметров МДП-структур в совокупности с комплектом измерительного оборудования, обеспечивающего необходимую точность и скорость измерений напряжения и тока, а также их цифровую обработку. Разработка моделей проводилась, исходя из теории магнитных спиновых эффектов, теории ядерной поляризации и релаксации. Для проведения расчетов использовались численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а также систем нелинейных алгебраических уравнений.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан принцип автоматизированного контроля параметров МДП-структур при воздействии СМП, в соответствии с которым обработка результатов измерений производится путем применения алгоритма согласованного выборочного анализа.
2. Установлено, что изменение тока канала МДП структуры после кратковременного воздействия СМП имеет осциллирующий затухающий характер с периодом колебаний 32-65 час. Амплитуда осцилляций пропорциональна временной степенной зависимости t^k , где коэффициент k определяется индукцией магнитного поля, концентрацией и типом носителей заряда в полупроводнике.
3. Показано, что приложение постоянного СМП ведет к уменьшению тока через оксид на 20-200% в зависимости от его толщины, а переменное СМП увеличивает ток через оксид в 100-130 раз. Последствие постоянного СМП и приложение электрического поля с напряженностью порядка 10^7 В/см ведет к возникновению немонотонных ВАХ оксида кремния с отрицательным дифференциальным сопротивлением.
4. Развита представления о механизме воздействия СМП на свойства границы раздела кремний-оксид, в рамках которых изменение этих свойств объясняется реконструкцией дефектной системы, ведущей к образованию заряженных состояний на границе раздела и в объеме оксида. Эта реконструкция стимулируется процессами поляризации и релаксации спинов ядер магнитного изотопа кремния.
5. Разработана модель изменения зарядовых свойств границы кремний-оксид после воздействия СМП с учетом кинетики релаксации концентрации заряженных поверхностных состояний и встроеного заряда в оксиде. Показано, что зависимости зарядовых свойств границы кремний-оксид от индукции магнитного поля и времени носят периодический характер. Предложен механизм токопереноса через оксид кремния после воздействия СМП, в основе которого лежат последовательные туннельные переходы через дискретные уровни квантовых ям в оксиде. Показано, что токоперенос в рамках этого механизма характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Разработана методика и аппаратура контроля параметров МДП-структур при воздействии СМП, позволяющие проводить анализ долговременных изменений в этих структурах.
2. Получены экспериментальные данные, устанавливающие влияние СМП на изменение тока канала МДП- структуры и токоперенос через оксид кремния.
3. Предложенные механизмы и модели, а также совокупность экспериментальных данных позволяют прогнозировать изменение параметров МДП структур при воздействии СМП.

4. Разработаны рекомендации по обеспечению долговременной стабильности параметров МДП структур в условиях воздействия СМП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Контроль параметров МДП-структур при воздействии СМП, приводящем к долговременным изменениям свойств этих структур, требует автоматизированной обработки результатов измерения с применением алгоритма согласованного выборочного анализа.
2. Изменение тока канала МДП структуры после кратковременного воздействия СМП характеризуется осциллирующим затухающим характером с периодом колебаний от 32 до 65 час и уменьшением амплитуды пропорционально временной зависимости t^k , что является следствием реконструкции дефектных состояний в окисле и на границе раздела, обуславливающей образование заряженных состояний. Эта реконструкция стимулируется процессами поляризации и релаксации спинов ядер магнитного изотопа кремния.
3. Последствие СМП ведет к изменению токопереноса через оксид кремния, определяемого реконструкцией дефектных областей, образованием квантовых ям и дискретных энергетических уровней в запрещенной зоне оксида.
4. Зарядовые свойства границы кремний-оксид после воздействия СМП определяются кинетикой изменения концентрации заряженных поверхностных состояний и встроенного заряда в оксиде, зависимости которых от индукции магнитного поля и времени имеют периодический характер.

Личный вклад соискателя. Все результаты диссертации получены лично соискателем или с его непосредственным участием: подготовка и проведение экспериментальных исследований, разработка моделей, подготовка и проведение расчетов, анализ и интерпретация полученных результатов. Вклад научного руководителя проф. В.Е.Борисенко состоит в постановке цели и задач исследований, разработке концепции моделирования, а также совместной разработке механизма токопереноса через оксид и модели зарядовых свойств границы раздела. Вклад научного консультанта, к.ф.-м.н. А.Л.Данилюка заключается в участии в разработке моделей влияния СМП на свойства границы кремний-оксид, генерации поверхностных состояний и заряда в оксиде, токопереноса через оксид, концепции обработки экспериментальных измерений, в критической оценке полученных экспериментальных данных и результатов расчетов.

Апробация результатов диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции «Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля», 23-25 мая 1989, Могилев; III отраслевой

научно-технической конференции «Опыт разработки, производства и применения БИС, РПЗУ, ПЗУ и ПЛИС», 10-12 сентября 1990, Киев; III Всесоюзной научной конференции «Физика окисных пленок», 10-12 апреля 1991, Петрозаводск; научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники, электроники и связи», 4-5 мая 1995, БГУИР, Минск; IV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи», 20-24 сентября 1999, Нарочь, Беларусь.

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 4 статьи в научно-технических журналах, 5 тезисов докладов в сборниках конференций, 1 информационный листок. Общее количество опубликованных материалов составляет 28 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка используемых источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 217 страниц. Диссертация содержит 130 рисунков на 85 страницах, 14 таблиц на 10 страницах и 2 приложения на 9 страницах. Библиография включает 205 наименований на 14 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель и основные задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор опубликованных данных и определено современное состояние исследований по влиянию СМП на дефектные свойства полупроводников и границы раздела кремний-оксид кремния.

Изучение влияния СМП на параметры полупроводников и границ раздела при комнатной температуре приобрело характер систематических исследований в конце 80-х годов. Необычность этого явления состоит в следующем: при комнатной температуре энергия магнитного поля много меньше энергии химических связей, основное изменение параметров системы происходит после окончания воздействия СМП, эти явления инициируются не только импульсным, но и постоянным магнитным полем.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по изучению изменения свойств кремниевых структур после воздействия СМП. Проведенные исследования показали, что приложение СМП ведет к изменению генерационно-рекомбинационных параметров, плотности поверхностных состояний (ПС), встроенного заряда, тока через оксид, а также к генерации дефектов, структурной перестройки дефектных

комплексов. Это приводит к изменению электрических характеристик МДП структур.

Для интерпретации экспериментальных данных не существует пригодных моделей. Имеется практически одна гипотеза о возможном механизме воздействия СМП на свойства границы кремний-оксид. Суть ее в том, что СМП стимулирует распад напряженных химических связей и диффузию примесных и собственных атомов и таким образом обуславливают структурную перестройку на границе раздела. Распад химических связей вызывается заполнением антисвязывающих орбиталей при изменении ориентации спина электрона. Проведенный анализ гипотезы о возможном механизме влияния СМП показал, что ей присущи внутренние противоречия. В связи с чем, она нуждается в уточнении и модификации.

В заключении, на основе анализа литературных данных сформулированы нерешенные задачи.

Вторая глава носит методический характер. В ней рассмотрена автоматизированная система контроля (АСК) в составе АСУ и методы исследования параметров МДП структур.

Разработанная АСК электрофизических параметров тестовых элементов МДП СБИС включает управляющую ЭВМ, ряд микроЭВМ, последовательный интерфейс, устройства сопряжения и цифровое измерительное оборудование. Разработано программное обеспечение для автоматизированного контроля основных параметров тестовых элементов. Описан ряд устройств для связи измерительных приборов с АСК. Система функционирует на основе алгоритма согласованного выборочного анализа, суть которого состоит в получении, сравнении, анализе и согласовании результатов выборок параметров по базовым показателям.

Рассматривается методика проведения экспериментальных измерений и обработки параметров МДП структур при воздействии СМП. В настоящей работе исследовались ток канала и ток через оксид кремния после кратковременного воздействия СМП с индукцией 0.068-0.200 Т. Для исследования были выбраны тестовые МДП структуры, изготовленные в идентичных технологических режимах. Длина канала тестовых структур 2-3 мкм, ширина 50 мкм, толщина диэлектрика 18- 44 нм. Образцы помещались в магнитное поле соленоида на 20 с. Размер образца со структурами $15 \times 15 \text{ мм}^2$, что гарантировало однородность поля по всей площади. Индукция измерялась датчиком Холла с погрешностью не более 2%. Температура во время воздействия СМП контролировалась термопарой, помещенной на держателе образцов. Ее величина не превышала $320 \pm 5 \text{ К}$.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования тока канала МДП структур и тока оксида кремния в зависимости от типа СМП (постоянное или переменное), толщины оксида кремния, потенциала затвора, типа проводимости кремния.

Установлено, что после воздействия СМП происходит существенное изменение крутизны вольт-амперной характеристики (ВАХ) тока канала от

потенциала затвора. На линейном участке ВАХ зависимость крутизны от потенциала затвора переходит в нелинейную. В области потенциалов 1.5-2.5 В появляются эффекты типа биений (колебания крутизны). Эти эффекты сохраняются в течение 11 суток после воздействия СМП. Изменяется также пороговое напряжение МДП структур: наблюдается его рост в среднем в 1.3-1.8 раза.

Установленный эффект изменения крутизны и ее биений связан с изменением встроенного заряда и плотности ПС на границе кремний-оксид после воздействия СМП. Непосредственно крутизну ВАХ определяет напряженность электрического поля на границе, значение которой зависит как от падения потенциала в оксиде, так и от зарядов ПС и оксида. Эти эффекты связаны с немонотонным изменением сопротивления оксида, появлением областей отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), изменением механизмов токопереноса через оксид кремния.

Установлена колебательная релаксация тока канала МДП структуры в течение 11-17 суток после воздействия СМП. Колебания характеризуются переменным периодом и немонотонной амплитудой. Величина периода составляет 32-65 час. Изменения амплитуды составляют 5-30% начального значения тока канала в зависимости от индукции СМП и потенциала затвора. Причем с ростом этого потенциала относительная величина колебаний тока уменьшается. Экстраполяция экспериментальных данных показала, что ток канала релаксирует к начальному значению за время 45-50 суток с момента приложения СМП. Уменьшение амплитуды при этом происходит пропорционально временной зависимости t^{-k} , где величина коэффициента определяется индукцией СМП, типом проводимости кремния и величиной потенциала затвора.

Обсуждается суть явления, которое состоит в наличие колебательной релаксации тока канала МДП структуры в течение 11-17 суток после воздействия СМП. Подобный эффект в литературе не описан. Видимо, его механизм связан с генерацией электрически активных состояний на границе раздела, в объеме оксида и с последующей эволюцией дефектного состояния.

Проведенный анализ имеющихся и полученных экспериментальных данных позволил предположить, что при воздействии СМП происходит динамическая поляризация и последующая релаксация спинов ядер магнитных изотопов ^{29}Si посредством сверхтонкого взаимодействия (СТВ) электронов на парамагнитных центрах, находящихся в неравновесном спиновом состоянии (со спином ~ 1). При этом модуляция СТВ, необходимая для динамической поляризации, происходит при электронных переходах на ПС. Последующая релаксация ядерной поляризации приводит к переходу неспаренных электронов на парамагнитных центрах (со спином $1/2$) в антисвязывающее триплетное состояние. Его энергия связи много меньше энергии связывающего состояния, а время жизни электрона на нем относительно велико (порядка 10^{-6} с). Подобные электронные переходы на границе и наличие в оксиде кремния дефектных областей способствуют

генерации ПС и переходу дефектных центров в электрически активное состояние.

В результате измерения тока через оксид кремния установлено, что приложение постоянного СМП ведет к уменьшению тока в среднем в 1.2-2.0 раза. Уменьшение тока через оксид связано как с генерацией заряда на границе кремний-оксид, так и с залечиванием дефектов в оксиде и влиянием ловушек носителей заряда в его объеме. Приложение переменного СМП, наоборот, ведет к увеличению тока через оксид в среднем в 100-130 раз. Механизм увеличения проводимости оксида на два порядка связан, на наш взгляд, с генерацией в этом случае дырочных центров в оксиде. Наличие таких центров ведет к росту проводимости оксида. Токоперенос при этом происходит не по разрешенным зонам оксида, а по системе локализованных состояний, расположенных в запрещенной зоне оксида. В некоторых случаях приложение постоянного СМП ведет к возникновению немонотонных зависимостей тока через оксид от потенциала затвора при напряженности электрического поля в оксиде 10^7 В/см. В этом случае ВАХ оксида имеет области отрицательного дифференциального сопротивления. Обсуждаются возможные механизмы изменения токопереноса через оксид после воздействия СМП. Обнаруженные немонотонные зависимости тока через оксид кремния от внешнего смещения другими авторами не описывались. Мы полагаем, что в этом случае токоперенос осуществляется через разупорядоченные области (локальные скопления дефектов), которые характеризуются многообразием энергетических уровней. В электрическом поле такие скопления создают или кластеры (рельеф потенциала), или потенциальные (квантовые) ямы. Образование этих областей происходит при формовке электрическим полем разупорядоченных областей оксида кремния после воздействия СМП. Предполагается, что токоперенос в оксиде кремния в данном случае осуществляется путем последовательных резонансных туннельных переходов. В рассматриваемом случае возможно формирование резонансно-туннельных переходов, имеющих различное направление относительно нормали к границе раздела и обладающих различными резонансными энергиями. Так как число обнаруженных максимумов ВАХ не превышает четырех, то и число таких переходов невелико. Они возникают в дефектных наноразмерных областях, которые перестраивают свою электронную структуру под действием магнитного и электрического полей. При этом традиционного пробоя диэлектрика не происходит, а вместо этого возникают новые каналы токопереноса туннельного типа.

В четвертой главе анализируются механизмы процессов, происходящих при воздействии СМП на границу кремний-оксид. Это динамическая поляризация и последующая релаксация спинов ядер магнитных изотопов кремния ^{29}Si , генерация заряженных дефектов и ПС на границе раздела кремний-оксид.

Развитые нами представления о механизме воздействия СМП на метастабильную структуру, какой является граница раздела кремний-оксид,

состоят в следующем. При воздействии СМП происходит динамическая поляризация спинов ядер магнитных изотопов кремния ^{29}Si . Последующая релаксация ведет к переходу неспаренных электронов на оборванных напряженных связях в антисвязывающее триплетное состояние. Вследствие чего происходит реконструкция дефектных состояний, ведущая к образованию заряженных состояний на границе и в объеме оксида кремния.

Ядерная поляризация магнитных изотопов кремния состоит в модуляции СТВ ядерных спинов с электронами на парамагнитных центрах, характеризующихся неравновесным спиновым состоянием. Такая модуляция осуществляется при переходах электронов между различными электронными состояниями на границе. Эти переходы описываются неравновесной кинетикой в отсутствии внешнего поля. Механизм релаксации динамической поляризации ядер с отличным от нуля спином также связан с влиянием электронных переходов на СТВ. Появление флуктуирующего локального поля у электронов на парамагнитных центрах на границе кремний-оксид обусловлено захватом и тепловой генерацией носителей заряда с ПС. Приложение СМП ведет к появлению неравновесной заселенности спиновых состояний на ПС. В этом случае создаются условия для динамической поляризации ядер изотопов с ненулевым спином за счет электронных переходов на ПС.

На основании изложенных положений нами предложен механизм динамической поляризации спинов ядер ^{29}Si , которая происходит при их взаимодействии с возбужденными триплетными центрами со спином $S=1$, имеющими неравновесную спиновую поляризацию.

Релаксация поляризации спинов ядер ^{29}Si на границе кремний-оксид происходит при их СТВ с электронами на поверхностных парамагнитных центрах (напряженных связях), находящихся в основном синглетном состоянии, т.е. имеющих спин $1/2$.

Для численного моделирования названных процессов записаны кинетические уравнения для населенностей магнитных подуровней изотопа ^{29}Si с учетом зависимости заполнения поверхностных центров носителями заряда и генерации ПС на границе (ионизации напряженных связей). В них учтены концентрации электронов на напряженных связях, находящихся не только в состояниях со спином $+1/2$ и $-1/2$, но и перешедшие в антисвязывающее состояние. Такой переход происходит за счет СТВ со спином ядра ^{29}Si при переориентации спина электрона. Включены также процессы генерации ПС, перенос носителей заряда, образование электронно-дырочных пар (триплетных экситонов), рекомбинация, диссоциация пар на свободные электрон и дырку и др.

Результаты моделирования поляризации и релаксации спинов ядер изотопа ^{29}Si на границе кремний-оксид показали, что концентрация возбужденных состояний при величине ядерной поляризации $\delta_a=10^3$ и концентрации напряженных связей $N_a=10^{18}$ см $^{-3}$ составляет $2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, а при

$N_a = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ достигает $3.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При $N_a > 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ эта концентрация достигает 20-70% концентрации напряженных связей.

Модель генерации заряженных дефектов и ПС на границе кремний-оксид после воздействия СМП основана на том, что при переходах электронных спинов между магнитными подуровнями происходит их переориентация из синглетного в триплетное состояние. При этом фактически происходит генерация триплетных экситонов. Они могут аннигилировать, или диссоциировать на электрон или дырку. При этом центр переходит в заряженное состояние. Освобожденный электрон уходит в полупроводник, или захватывается на ловушки в оксиде, изменяя его заряд. Ионизованные состояния реконструируются в дырочные центры, или происходит захват дырок на напряженные связи, в результате чего генерируются ПС. Плотность дырочных центров, образованных при возбуждении напряженных связей определяется процессами диссоциации и реконструкции этих связей.

Для оценки величины плотности ПС, генерированных в процессе ядерной релаксации, полагаем, что захват дырок на напряженные связи приводит к разрыву последних и образованию ПС. Дырки, захватывающиеся на уровни напряженных валентных связей, образуют заряженные псевдовакансии. На основе этих представлений получена система уравнений, которая описывает кинетику релаксации зарядовых свойств границы кремний-оксид после воздействия СМП.

Проведенные оценки позволили установить, что плотность ПС при релаксации поляризации в рамках принятой модели увеличивается в 3-9 раз по сравнению с первоначальной, а ее зависимость от индукции магнитного поля носит колебательный характер. Проведенная оценка плотности фиксированного заряда в оксиде кремния показала, что он увеличивается до $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$ при плотности дефектов порядка 10^{18} см^{-3} .

Таким образом, в результате проведенных расчетов установлено, что действие СМП ведет к долговременным изменениям (характерное время более 10 суток) зарядовых свойств границы кремний-оксид вследствие реконструкции дефектных состояний в оксиде и на границе.

В основе механизма токопереноса через оксид кремния лежат следующие представления. Рассматривается трехбарьерная структура, возникшая в результате формовки электрическим полем метастабильного оксида кремния после воздействия СМП. Структура характеризуется наличием двух квантовых ям, разделенных потенциальными барьерами. В общем случае барьеры не совпадают по толщине и высоте, также не совпадает положение дискретных уровней в квантовых ямах в отсутствие внешнего смещения. Квантовые ямы свободно обмениваются электронами с электродами путем туннелирования. Обмен электронами между ямами затруднен вследствие того, что дискретные уровни не совпадают по энергии, а импульс электронов в направлении, нормальном к их границе раздела близок к нулю. С ростом внешнего потенциала уровни в ямах смещаются. При их совпадении становится возможен обмен электронами между ямами.

Такое совпадение уровней возможно также в процессе рассеяния электронов в ямах. Количественное описание предложенного токопереноса дано с использованием кинетических уравнений, учитывающих электронные переходы между дискретными и непрерывными состояниями. Для проведения расчетов принималось, что толщина слоев диэлектрика 3-5 нм, толщина квантовых ям (скоплений дефектов) 5-15 нм, высота потенциальных барьеров 3-5 эВ, число дискретных уровней в ямах 2-3, эффективная масса электрона соответствует наноразмерному кремнию и составляет 0.6-0.8 m_0 . В результате расчетов установлено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Рассматриваются способы обеспечения долговременной стабильности кремниевых МДП структур в условиях воздействия СМП на основе технологических, конструктивных, схмотехнических и физико-технических подходов. Технологические способы уменьшения влияния СМП, как следует из проведенного исследования, должны обеспечить высокое структурное совершенство и требуемые параметры оксида и границы кремний-оксид: минимальные дефектность, концентрацию напряженных связей и величину остаточных напряжений, максимальную однородность по толщине. Также предложены технологические способы создания оксида, обладающего способностью к самовосстановлению свойств в условиях воздействия СМП. Эти способы основаны на применении оптических (облучение поляризованным, или неполяризованным светом в магнитном поле), электромагнитных, или других видов воздействий в процессе формирования оксида кремния. Конструктивные методы повышения стабильности в условиях воздействия СМП: введение стоков дефектов (областей геттеров), центров нейтрализации заряженных ПС и встроенного заряда в оксиде, защитного слоя между окислом и каналом МДП структуры, увеличение потенциального барьера для электронов или дырок между полупроводником и оксидом. Формирование областей в оксиде, содержащих стабильные заряженные центры с относительно высокой концентрацией. Введение проводящей магнитной пленки между оксидом и затвором, или вместо затвора.

Схмотехнические способы состоят в корректировке режимов функционирования МДП приборов (повышение потенциала затвора, уменьшение потенциала стока), введение в схему обратных связей для компенсации изменения тока канала.

К физико-техническим методам относятся методы, с помощью которых достигается уменьшение степени ядерной поляризации и увеличение скорости ее релаксации. Это возможно с помощью применения кремния с низким содержанием природного изотопа ^{29}Si , создания парамагнитных центров, обладающих малым временем спин-решеточной релаксации (например, введение атомов железа), устранения неравновесных по спину центров, уменьшения времен жизни возбужденных состояний и электронов на ПС, устранения электронных переходов между ПС и кремнием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан принцип и система автоматизированного контроля параметров МДП-структур при воздействии слабых магнитных полей (СМП). Особенностью системы является обработка результатов измерений с применением алгоритма согласованного выборочного анализа, обеспечивающего получение, сравнение, анализ и согласование результатов выборок параметров по базовым показателям [7, 8, 10].
2. На основании проведенных экспериментальных измерений установлено, что изменение тока канала МДП структуры после кратковременного воздействия СМП имеет осциллирующий затухающий характер с периодом колебаний 32-65 час. Показано, что уменьшение амплитуды колебаний тока пропорционально t^k , где коэффициент k определяется индукцией магнитного поля, концентрацией и типом носителей заряда в кремнии. Экспериментально установлено, что после воздействия СМП ток через оксид кремния уменьшается в 1.2-2.0 раза, а после переменного СМП увеличивается в 100-130 раз. Последствие постоянного СМП и формовки в электрическом поле с напряженностью 10^7 В/см ведет к возникновению немонотонных ВАХ оксида кремния, имеющих отрицательное дифференциальное сопротивление [1, 2, 4, 5].
3. Предложена модель воздействия СМП на свойства границы кремний-оксид, в рамках которой изменение электрофизических параметров этой границы связано с реконструкцией дефектных областей, ведущей к образованию заряженных состояний на границе раздела и в объеме оксида кремния. Сформулировано, обосновано и подтверждено предположение о том, что такая реконструкция стимулируется процессами поляризации и релаксации спинов ядер магнитного изотопа кремния [1, 2, 3, 5].
4. Разработана модель изменения зарядовых свойств границы кремний-оксид после воздействия СМП с учетом кинетики релаксации плотности заряженных поверхностных состояний и встроенного заряда в оксиде. На основании проведенных расчетов показано, что зависимости зарядовых свойств границы кремний-оксид от индукции магнитного поля и времени носят периодический характер. На ее основе предложен механизм токопереноса через оксид кремния в результате воздействия СМП и формовки электрическим полем. Он состоит в последовательном туннельном переносе через дискретные уровни квантовых ям в оксиде [2, 3, 5, 6].
5. Разработаны рекомендации по обеспечению долговременной стабильности параметров МДП-структур, состоящие в нейтрализации воздействия СМП за счет применения усовершенствованной технологии изготовления оксида, выбора электрических режимов, конструктивных решений и воздействия на протекание физических процессов в магнитном поле при формировании оксида [1, 2, 6, 9].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи

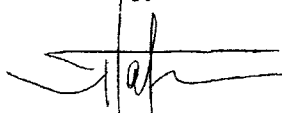
- [1] Данилюк А.Л., Курмашев В.И., Нарейко А.И. Воздействие слабых магнитных полей на параметры МДП-структур// Весці АН Беларусі, сер.фіз.-мат. навук.-1994.-№ 3.- С.93-97.
- [2] Данилюк А.Л., Нарейко А.И. Колебательная релаксация поверхностной проводимости кремния после воздействия слабого магнитного поля// Поверхность.-1996.-№ 9.- С.27-33.
- [3] Модель релаксации зарядовых свойств границы кремний-окисел после воздействия слабого магнитного поля/ А.И.Нарейко, Е.И.Евдокимова, А.Л.Данилюк, В.Е.Борисенко // Известия Белорусской инженерной академии.- 1999.- №1(7)/2.- С.111-113.
- [4] Осцилляции тока канала МДП структуры после воздействия слабого магнитного поля/ А.И.Нарейко, Е.И.Евдокимова, А.Л.Данилюк, В.Е.Борисенко // Известия Белорусской инженерной академии.-1999.- №1(7)/2.- С.108-110.

Тезисы докладов

- [5] Данилюк А.Л., Нарейко А.И. Колебательная релаксация параметров МДП-структур после воздействия слабых магнитных полей// Современные проблемы радиотехники, электроники и связи. Научно-техническая конференция. – Минск, 1995.- С.125-126.
- [6] Комплекс аппаратных и программных средств для контроля электрофизических параметров МДП-элементов СБИС/ А.Г.Черных, С.К.Минюк, А.И.Нарейко, С.В.Прозоров // Опыт разработки, производства и применения БИС, РПЗУ, ПЗУ и ПЛИС. Тезисы докладов III отраслевой научно-техн. конф.- Киев, 1990.- С.103.
- [7] Черных А.Г., Нарейко А.И. Автоматизированная система неразрушающего контроля СБИС// Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. -Могилев, 1989. - С.164-165.
- [8] Деградационные процессы, обусловленные инжекцией горячих носителей в подзатворный окисел короткоканальных МОП элементов СБИС/ А.Г.Черных, С.К.Минюк, С.В.Прозоров, А.И.Нарейко // Физика окисных пленок. Тезисы докладов III Всесоюзной научной конференции.- Петрозаводск, 1991.-Ч.2.- С.101.

Информационный листок

- [9] Автоматизированная система контроля параметров МДП-элементов СБИС на базе микроЭВМ ДВК-3М: Информационный листок о научно-техническом достижении. Серия 50.47.31, № 90-114/ А.Г.Черных, С.К.Минюк, А.И.Нарейко, В.Л.Гаврук/ БелНИИНТИ. – Минск, 1990. - 3с.



РЭЗЬЮМЭ

Нарэйка Андрэй Ігаравіч, Уплыў слабых магнітных палёў на ўласцівасці мяжы падзела крэмній – аксід крэмнію.

Ключавыя словы: мяжа падзелу, аксід крэмнію, слабае магнітнае поле, токаперанос, магнітны ізатоп, спін, ядзерная палярызация і рэлаксацыя, паслядзеянне.

Распрацаваны прынцып і сыстэма аўтаматызаванага кантролю параметраў МДП структур пры ўздзеянні слабых магнітных палёў (СМП), прыводзячага да доўгачасовых змяненняў іх параметраў з ужываннем алгарытму ўзгодненага выбарачнага аналізу.

Праведзена эксперыментальнае даследаванне току каналу МДП крэмнёвай структуры і тока праз аксід крэмнію пасля ўздзеяння СМП. Паказана, што змяненне току каналу пасля кароткачасовага ўздзеяння СМП мае асцыліруючы характар з перыядам калыханняў ад 32 до 65 гадзін. Паказана, што пасля ўздзеяння СМП адбываецца істотнае змяненне току праз аксід. Паслядзеянне пастаяннага СМП і фармоўкі ў электрычным полі з напружаннасцю 10^7 В/см прыводзіт да ўзнікнення ВАХ аксіда з вобласцю адмоўнага дыферэнцыяльнага супраціўлення.

Прапанавана мадэль, апісваючая ўплыў СМП на ўласцівасці мяжы крэмній-аксід, у межах якой змяненне электрафізічных параметраў гэтай мяжы абумоўлена рэканструкцыяй дэфектных састаянній на мяжы падзелу і ў аб'ёме аксіду. У яе анове ляжыць меркаванне аб тым, што такая рэканструкцыя стымулюецца працэсамі палярызаты і рэлаксацыі спінаў ядзер магнітнага ізатопу крэмнію.

Распрацаваны механізм токапераносу праз аксід крэмнію пасля ўздзеяння СМП і фармоўкі электрычным полем, улічваючы паслядоўны тунельны перанос носбітаў зараду праз дыскрэтныя ўзроўні квантавых ямаў у аксідзе. Паказана, што залежнасць току праз аксід ад патэнцыялу брамкі ў межах гэтага механізму характарызуецца прысутнасцю вобласці адмоўнага дыферэнцыяльнага супраціўлення.

Распрацавана мадэль змянення зарадавых ўласцівасцей мяжы крэмній-аксід пасля ўздзеяння СМП, улічваючы змяненне шчыльнасці паверхнастных састаянняў і ўстроенага зараду ў аксідзе, выкліканае магнітным полем.

Распрацаваны шэраг рэкамендацыяў па забеспячэнню даўгачасовай стабільнасці МДП-структур ва ўмовах уздзеяння СМП, які заключаецца ў нейтралізацыі фізічных працэсаў і вынікаў уздзеяння магнітнага поля.

РЕЗЮМЕ

Нарейко Андрей Игоревич, Влияние слабых магнитных полей на свойства границы кремний-оксид кремния.

Ключевые слова: граница раздела, оксид кремния, слабое магнитное поле, токоперенос, магнитный изотоп, спин, ядерная поляризация и релаксация, последствие.

Разработан принцип и система автоматизированного контроля параметров МДП структур при воздействии слабых магнитных полей (СМП), приводящего к долговременным изменениям их параметров с применением алгоритма согласованного выборочного анализа.

Проведено экспериментальное исследование тока канала МДП структуры кремния и тока через оксид кремния после воздействия СМП. Показано, что изменение тока канала МДП-структуры после кратковременного воздействия СМП имеет осциллирующий характер с периодом колебаний от 32 до 65 час. Установлено, что после воздействия СМП происходит существенное изменение тока через оксид. Последствие постоянного СМП и формовки в электрическом поле с напряженностью 10^7 В/см ведет к возникновению ВАХ оксида с областью отрицательного дифференциального сопротивления.

Предложена модель, описывающая влияние СМП на свойства границы кремний-оксид, в рамках которой изменение электрофизических параметров этой границы обусловлено реконструкцией дефектных состояний, ведущей к образованию заряженных состояний на границе раздела и в объеме оксида. В ее основе лежит предположение о том, что такая реконструкция стимулируется процессами поляризации и релаксация спинов ядер магнитного изотопа кремния.

Предложен механизм токопереноса через оксид кремния после воздействия СМП и формовки электрическим полем, учитывающий последовательный туннельный перенос носителей заряда через дискретные уровни квантовых ям в оксиде. Показано, что зависимость тока через оксид от потенциала затвора в рамках этого механизма характеризуется наличием области отрицательного дифференциального сопротивления.

Разработана модель изменения зарядовых свойств границы кремний-оксид после воздействия СМП, учитывающая изменение плотности поверхностных состояний и встроенного заряда в оксиде, вызванное магнитным полем.

Разработан ряд рекомендаций по обеспечению долговременной стабильности МДП-структур в условиях воздействия СМП, состоящих в нейтрализации физических причин и последствий влияния магнитного поля.

SUMMARY

Andrey I. Nareiko. Low magnetic fields influence on the properties of silicon-silicon-oxide interface.

Key words: interface, silicon oxide, low magnetic field, charge transport, magnetic isotope, spin, nuclear polarization and relaxation, aftereffect.

Proposed is a principle and system of automated control of parameters of metal-insulator-semiconductor (MIS) structures exposed to low magnetic fields (LMF) which causes long-term variation of their parameters; the algorithm of the consistent sampling analysis is proposed.

The variation of MIS structure channel current and current through silicon oxide after exposure to LMF has been studied. It has been shown that the variation of the surface current at the interface after the short-term exposure to LMF is of oscillating character, oscillations cycle from 32 to 65 hours. It has been shown that a considerable change of current through oxide takes place after exposure to LMF. Aftereffect of magnetostatic field exposure and forming by electrostatic field with intensity of 10^7 V/cm results in formation of the current-voltage characteristics of oxide with negative differential resistance.

A model describing the effect of LMF on the properties of silicon-oxide interface is proposed. In the framework of the model the variation of electrophysical characteristics of this interface is caused by the reconstruction of defective states which results in formation of charged states at the interface and volume the oxide. The model is based on the assumption that such reconstruction is stimulated by the processes of polarisation and relaxation of spins of nuclei of silicon magnetic isotope.

A mechanism of charge transport through silicon oxide after exposure to LMF and forming by electrostatic field has been developed. The mechanism takes account of the successive tunneling transition of charge carriers through discrete levels of quantum well in the oxide. In the framework of this mechanism the dependence of the current through oxide on the potential of the gate is characterized by negative differential resistance.

A model of modification of charge properties of silicon-oxide interface after exposure to LMF has been developed. The model takes account the variation of density of the surface states and charge in oxide caused by the magnetic field.

A set of recommendations on achieving long-term stability of MIS-structures exposed to LMF has been worked out. The recommendations focus on neutralization of the physical processes and aftereffect of exposure to the magnetic field.

НАРЕЙКО
Андрей Игоревич

**ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА
СВОЙСТВА ГРАНИЦЫ КРЕМНИЙ ОКСИД КРЕМНИЯ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, микроэлектроника
и нанoeлектроника»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 28.04.2000.

Формат 60 × 84 1/16.

Бумага офсет. Печать ризографическая.

Чсл. печ. л. I, I6.

Уч.-изд. л. I, 0.

Тираж 90 экз.

Заказ 217.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Опечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156.

220027, Минск, ул. П.Бровки, 6