

Наумова Ольга Викторовна

Наноразмерные структуры Si/ SiO₂ и сенсоры на их основе

01.04.10 “Физика полупроводников”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Новосибирск 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант:

доктор физико-математических наук

Попов Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

Неизвестный Игорь Георгиевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, советник РАН

Гридчин Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор

Соболев Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Физико-технологический институт Российской академии наук

Защита состоится « 23 » апреля 2013 года в 10 часов

на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т им. Ак. Лаврентьева, д.13, конференц зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Автореферат разослан «.....»

2013 года

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

Актуальность темы

Процесс масштабирования элементов ИС, являющийся основой получения высокопроизводительных СБИС, стимулировал в последнее десятилетие интенсивные разработки новых материалов и поиск новых конструктивно-технологических решений [1], в результате чего конструктивной основой современных электронных приборов становятся нанопроволочные элементы [2, 3], а одним из базовых материалов, альтернативой объемному кремнию - структуры кремний на изоляторе (КНИ) [4].

Переход от объемного кремния к структурам КНИ позволяет решить ключевые проблемы масштабирования - подавление короткоканальных эффектов и контролируемого управления носителями заряда в основных элементах СБИС - МОП-транзисторах. Достигается это за счет: 1) конструктивных параметров слоев КНИ (введения скрытого диэлектрика и уменьшения толщины рабочего слоя Si) и 2) возможности изготовления альтернативных планарным многозатворных (2-4 затворных) конструкций МОП-транзисторов, в которых канал индуцируется (и контролируется) не только со стороны планара [5], но и с двух-четырех сторон полоски или нанопроволоки (НП) кремния на изоляторе [6, А1].

Поэтому в конце 90-х - начале 2000-х гг. нанопроволочные структуры становятся объектом фундаментальных исследований в области нанoeлектроники. Цели исследований - создание новых приборов нанoeлектроники и методов их массового изготовления. Применение пластин КНИ, изначально предназначенных для изготовления радиационно-стойких приборов, становится стандартным в инженерии архитектуры приборов, в том числе, для высокоскоростных микропроцессоров [2, 4].

В то же время, в начале 2000-х годов после расшифровки генома человека стала интенсивно развиваться наука о белках – протеомика. Задачи протеомики по составлению каталога и идентификации (определению структуры и функций) порядка пяти миллионов белков, закодированных в геноме, задачи современной медицинской диагностики по проведению высокочувствительного комплексного экспресс-анализа белков по капле биожидкости, регистрации низкокопийных белков [7, 8], а также задачи безопасности и мониторинга окружающей среды - обнаружение взрывоопасных веществ [9], патогенных бактерий, вирусов, токсинов в воздухе, воде и пище (см. обзор [10]), потребовали создания высокочувствительных, высокопроизводительных диагностических устройств нового типа. Основные требования к таким устройствам – считывание сигнала с массива высокочувствительных сенсорных элементов, в режиме реального времени и без искажения свойств целевого объекта (без меток). Это стимулировало интенсивный поиск и развитие нанотехнологий в изготовлении сенсорных элементов. Одним из таких элементов являются нанопроволочные сенсоры с электрическим способом передачи сигнала, удовлетворяющие

совокупности всех вышеперечисленных требований (см. обзор [11]). Таким образом, разработка методов изготовления НП сенсоров становится актуальной научной и стратегически важной задачей, связанной со здоровьем и безопасностью населения, которая поддерживается в ряде стран (США, Англия, Китай) на уровне правительственных грантов.

Основным преимуществом НП сенсоров на основе структур КНИ (по сравнению с НП сенсорами из других материалов и отдельно выращенных цилиндрических НП), является совместимость методов их изготовления со стандартной КМОП-технологией. Это превращает КНИ-НП сенсор в универсальную платформу для широкомасштабного производства портативных высокочувствительных диагностических систем – электронных биохимических детекторов, доступных для индивидуального применения. Использование подложки структур КНИ в качестве затвора, превращает КНИ-НП сенсор в двухзатворный транзистор с управляемой проводимостью и управляемым режимом работы [12, А2]. Однако наличие скрытого окисла структур КНИ определяет не только преимущества, но и ряд проблем для наноразмерных структур Si/SiO₂ и приборов на их основе.

Скрытый окисел структур КНИ может быть барьером для диффузии дефектов в подложку, соответственно, приводить к изменению кинетики накопления и отжига дефектов в отсеченных слоях Si [12, А3]. Дефекты, накапливаемые в наноразмерных слоях Si, являются причиной деградации параметров структур - уменьшения подвижности носителей заряда, увеличения заряда в слое SiO₂. Сопоставимость размеров структурных дефектов с толщиной нанометрового слоя Si ведет к нарушению целостности слоя КНИ при последующих химических обработках, проблемам утечек на подложку при введении легирующей примеси и др.

Близость границ раздела Si/SiO₂ (Si с окислом на поверхности и скрытым слоем SiO₂) в наноразмерных структурах КНИ означает, что одна из границ раздела может работать в качестве более эффективного геттера для вводимых дефектов. Поэтому исследование закономерностей накопления дефектов и разработка методов их устранения являлись актуальными задачами по управлению примесно-дефектным составом в нанослоях КНИ.

Нанометровые толщины Si резко ограничивают возможности методов для диагностики таких структур. Взаимосвязь потенциалов (взаимовлияние) противоположных границ раздела нанослоя Si при неконтролируемом состоянии на поверхности Si приводит к некорректному определению параметров структур. Поэтому разработка методов по определению и управлению зарядовым состоянием поверхности наноразмерных структур Si/SiO₂ являлась актуальной и важной методической (диагностической) задачей.

Уменьшение толщины слоя кремния увеличивает аспектное соотношение поверхность/ объем. Соответственно, возникают требования не только структурного совершенства нанослоев Si, но и

низкой плотности дефектов в системах Si/SiO₂ (Si со слоем SiO₂ на поверхности и нижележащим скрытым диэлектриком структур КНИ).

Чтобы иметь низкую плотность дефектов (стабильность параметров) для системы отсеченный слой Si/скрытый слой SiO₂ в данной работе использовались структуры Si/SiO₂, полученные методом водородно-индуцированного переноса слоя Si на окисленную подложку. Метод, названный DeleCut (ion irradiated Deleted oxide Cut), был разработан в ИФП СО РАН в начале 2000-х гг. [14].

В структурах КНИ-DeleCut в качестве скрытого диэлектрика используется термически выращенный слой SiO₂, который не подвергается ионной имплантации в процессе изготовления структур КНИ (в отличие от получивших коммерческое распространение структур КНИ Smart-Cut¹ [15] или КНИ-SIMOX² (Silicon Implanted by Oxygen) [16]). Граница между отсеченным слоем кремния и скрытым окислом в структурах КНИ-DeleCut формируется соединением (бондингом) слоев Si и SiO₂ [16].

Таким образом, в качестве основного объекта исследований, мы имели структуры Si/SiO₂, отличающиеся по методу изготовления (соответственно, и свойствам) от исследуемых на протяжении 50-60 лет структур Si/SiO₂, в которых граница раздела создается термическим окислением кремния, или от структур КНИ, сформированных другими методами. Поэтому данная работа началась в 2001 г. с исследования свойств отсеченных слоев Si и скрытого диэлектрика структур КНИ-DeleCut [A4, A5].

Исследования закономерностей накопления дефектов в структурах Si/SiO₂, полученных методом водородно-индуцированного переноса Si и бондинга с окисленной подложкой Si, поиск методов устранения дефектов в наноразмерных структурах КНИ являлись не только необходимым условием для формирования структур со стабильной границей раздела Si/SiO₂, но и актуальной задачей получения системы знаний о свойствах и эволюции гетерофазных систем в физике конденсированного состояния для новой системы Si/SiO₂. Кроме того, проводимые исследования являлись перспективной задачей для трехмерной интеграции, поскольку при формировании многослойных структур (Si/SiO₂)_n методом многократного водородно-индуцированного переноса и бондинга одна из границ раздела слоя Si всегда будет сформирована бондингом, другая – термическим окислением.

В кремниевой технологии с целью уменьшения механических напряжений и плотности состояний на границе раздела Si/SiO₂, формирования диффузионного барьера для различных примесей (бора, фосфора, водорода) используется введение азота в системы Si/SiO₂ [5, 17]. Поэтому

¹ В структурах КНИ - Smart-Cut скрытый слой SiO₂ имплантирован водородом, граница между отсеченным слоем кремния и скрытым окислом сформирована термическим окислением Si, граница между слоем SiO₂ и Si-подложкой является границей срачивания.

² В структурах КНИ - SIMOX скрытый слой SiO₂ формируется в результате имплантации кислорода в Si и высокотемпературного отжига.

для формирования диэлектрика на поверхности Si с повышенной стойкостью к стрессовым воздействиям (низкой плотностью ловушек носителей заряда), и в качестве перспективного способа создания защитного покрытия для нанопроволочных структур в ИФП СО РАН проводились работы по разработке метода нитрирования систем Si/SiO₂ с нанометровыми слоями диэлектрика. Поскольку нанометровые слои SiO₂ в приборных структурах подвергаются стрессовым электрическим воздействиям, то основным открытым вопросом для таких систем был вопрос об энергетическом спектре центров, ответственных за ток утечки через нанометровые слои диэлектрика.

Основной проблемой при изготовлении наноразмерных приборов на основе слоев КНИ является проблема формирования нанометрового изображения в маске и его “бездефектным” переносе на нанослой Si. Работы по наноструктурированию слоев КНИ (с использованием электронной литографии и реактивно-ионного травления) в ИФП СО РАН были начаты в 2001-2002 гг. [A6, A1].

Условие совместимости метода изготовления НП-структур со стандартными операциями кремниевой технологии выдвигало следующие требования - в идеале метод формирования КНИ-НП должен быть процессом: 1) низкотемпературным, 2) “бездефектным”, исключая деградацию подвижности носителей заряда в НП на слоях SiO₂, и 3) селективным, исключая повреждение слоя SiO₂. Разработка низкотемпературного “бездефектного” метода формирования КНИ-НП была начата в ИФП СО РАН в 2007 г. в рамках проекта ФЦНТП [A7]. Первые журнальные публикации по изготовлению КНИ-НП транзисторов на основе разработанного метода формирования КНИ-НП элементов и тестированию их в качестве биохимических сенсоров вышли в 2009-2010 гг. [A2, A8]. Это первые полученные в России результаты по НП сенсорам с чувствительностью на уровне 10⁻¹⁴-10⁻¹⁵ М к молекулам белка и ионов хлора при тестировании в режиме реального времени.

В табл.1 суммирован ряд проблем и вопросов, существовавших до начала и решенных в ходе выполнения данной работы.

Целью данной работы являлось установление основных закономерностей формирования дефектов в наноразмерных структурах Si/SiO₂, разработка подходов, позволяющих уменьшить их плотность, и разработка методов создания нанопроволочных приборных структур (на примере КНИ-нанопроволочных сенсоров) на их основе.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

1. установление основных закономерностей накопления дефектов в наноразмерных структурах Si/SiO₂, полученных методом водородно-индуцированного переноса Si и бондингом с окисленной подложкой Si, которые включали:
 - определение плотности структурных дефектов и их зависимостей от толщины слоев КНИ

Таблица1. Основные проблемы и вопросы, решаемые в данной работе

Проблемы	Вопросы
1 Наноразмерные структуры Si/SiO₂	
1.1 увеличение плотности структурных дефектов при термо-окислительных операциях слоев Si на SiO ₂ , сопоставимость размера структурных дефектов с толщиной нанослоя Si	место формирования (граница сращивания или граница отсеченного слоя Si с жертвенным слоем SiO ₂ на поверхности Si), природа и методы управления концентрацией дефектов в отсеченном слое Si
1.2 деградация подвижности носителей заряда с уменьшением толщины слоя Si	вклад различных механизмов рассеяния, причины - дополнительное рассеяние на внешней поверхности нанослоя Si / механические напряжения/накопление структурно-примесных дефектов
1.3 увеличение плотности заряда в скрытом слое SiO ₂ при переходе к наноразмерным слоям КНИ, нестабильность параметров наноразмерных структур Si/SiO ₂ ,	реальная перестройка примесно-дефектной структуры систем Si/SiO ₂ или проблемы определения параметров наноразмерных структур; плотность дефектов/прекурсоров дефектов в слоях SiO ₂ , вклад дефектов ионного легирования, центры, ответственные за ток утечки через нанослой SiO ₂
2 Определение параметров наноразмерных структур Si/SiO₂	
Ограничение слоя Si по толщине, взаимосвязь потенциалов границ Si/SiO ₂ : неконтролируемое состояние поверхности Si, паразитное сопротивление контактов	управление состоянием поверхности и его стабилизация, методы подготовки поверхности, обеспечивающие основные состояния – обогащения, обеднения и инверсии, метод формирования контактов
3 Метод формирования КНИ-нанопроволок (наноструктурирование слоев КНИ)	
введение дефектов в наноразмерные структуры Si/SiO ₂ (деградация подвижности носителей заряда, разрушение слоя SiO ₂)	низкотемпературный “бездефектный” метод формирования НП совместимый с КМОП-технологией
4 КНИ-НП сенсоры (разработка прототипа электронных биохимических детекторов)	
4.1 конструктивно-технологических параметры КНИ-НП сенсоров	основные параметры системы КНИ-транзистор/электролит, обеспечивающие максимальный отклик к тестируемым частицам; предельная чувствительность КНИ-НП сенсора
4.2 неконтролируемое состояние/подготовка поверхности чипа с КНИ-НП перед тестированием	методы очистки и стабилизации поверхности Si-НП сенсоров на чипе, исключаяющие повреждение элементов транзисторов (Si, SiO ₂ , Me)
4.3 режим работы КНИ-НП сенсоров	метод (алгоритм) выбора рабочей точки КНИ-НП транзистора, обеспечивающий максимальный отклик при последующей адсорбции частиц на НП

при различных способах утончения и типа исходного материала кремния (определение места формирования, природы доминирующих HF-дефектов и методов управления их концентрацией);

- определение подвижности носителей заряда и вклада различных механизмов их рассеяния в 9-400 нм слоях КНИ в сравнении с системами Si/SiO₂ с границами раздела, сформированными термическим окислением кремния;
 - установление закономерностей накопления дефектов в слоях SiO₂ структур КНИ при радиационных и электрических воздействиях;
2. определение энергетического спектра центров, ответственных за стресс-индуцированные токи утечки через нитрированные нанометровые слои SiO₂;
 3. управление зарядовым состоянием поверхности наноразмерных структур Si/SiO₂ и его стабилизация;
 4. разработка метода формирования НП структур на основе слоев КНИ;
 5. разработка прототипа электронных детекторов, включающая выбор методов изготовления, конструктивно-технологических параметров и режима работы КНИ-нанопроволочных транзисторов, как биохимических сенсоров.

Объекты и методы исследования.

Объектами исследований являлись:

- структуры Si/SiO₂ с субмикронными слоями Si, полученные методом водородно-индуцированного переноса Si и сращивания (бондинга) с окисленной подложкой;
- наноразмерные структуры Si/SiO₂, полученные методом последовательного цикла операций термического окисления и удаления жертвенного окисла с поверхности слоев КНИ;
- нанопроволочные структуры на основе слоев Si/SiO₂;
- нанопроволочные структуры, полученные методом МЛЭ (для сравнения);
- структуры Si/SiO₂ с нанометровыми слоями SiO₂, нитрированными в процессе термического окисления в закиси азота.

В ходе работы использованы следующие методы: для определения электрических параметров структур Si/SiO₂ - метод статических характеристик МОП-транзисторов, метод порогового напряжения транзистора, температурные и временные зависимости тока, метод определения заряда, накопленного перед пробоем диэлектрика, метод вольт-фарадных характеристик, а также сканирующая эллипсометрия для определения толщины слоев КНИ, оптическая и электронная микроскопия для выявления структурных (HF-) дефектов, ИК-спектроскопия для определения групп связей после обработок поверхности кремния.

В работе использовались 5 типов КНИ-транзисторов:

- классические n- и p-канальные КНИ-МОП транзисторы;
- точечно-контактные транзисторы (ТКТ);
- транзисторы с омическими контактами или барьерами Шоттки на концах (в областях стока - истока) и свободной поверхностью;
- транзисторы с омическими контактами на концах (в областях стока - истока) и фронтальным затвором;
- КНИ-нанопроволочные транзисторы со свободной поверхностью.

Во всех типах транзисторов подложка использовалась в качестве управляющего электрода (независимого затвора), скрытый окисел структур КНИ - в качестве подзатворного диэлектрика. Вольт-фарадные характеристики структур с окислом на поверхности проводились с использованием Hg-зонда.

Научная новизна работы.

На основе проведенных в работе исследований формируется новая система знаний о свойствах и эволюции гетерофазных систем в физике конденсированного состояния. Научная новизна конкретных результатов состоит в следующем:

1. Установлено, что в широком диапазоне толщины слоев КНИ (20-400 нм) значения подвижности и механизмы рассеяния носителей заряда вблизи границы раздела, полученной бондингом, соответствуют подвижности и механизмам рассеяния носителей заряда вблизи границ раздела Si/SiO₂, сформированных термическим окислением Si. Резкая деградация подвижности носителей заряда при уменьшении толщины слоев КНИ с 20 нм до 9 нм связана с увеличением концентрации дефектов в нанослоях КНИ в процессе термоокислительных операций и определяется структурно-примесным составом исходного материала кремния.
2. Установлено, что стабильность не подвергавшихся ионному облучению структур КНИ к радиационным и электрическим воздействиям определяется низкой плотностью дефектов (структурой слоев SiO₂) вблизи границы бондинга со слоем Si. Не более 10% из общего числа дефектов в слоях SiO₂ вблизи границы бондинга работают как ловушки для свободных носителей заряда. Генерация новых ловушек из электрически неактивных дефектов (прекурсоров), является лимитирующей стадией в накоплении заряда в слоях SiO₂ при ионизирующем облучении (в отличие от термически сформированных систем Si/SiO₂, где доминирует заполнение уже существующих ловушек в слоях SiO₂).

3. Предложены методы подготовки поверхности кремния, позволяющие контролируемо создавать три основных состояния (инверсии, обеднения и обогащения) со стороны поверхности, необходимые для изучения свойств нанослоев Si и приборов на их основе. Определен эффективный заряд на поверхности слоев КНИ и его стабильность во времени после различных способов подготовки поверхности, включающих обработки в метаноле, йодистом метаноле, хингидроне, нанесение нитрированных покрытий, пассивированных в водороде естественных слоев SiO₂.
4. Показано, что проводимость нитрированных 5-6 нм слоев SiO₂ после пробоя диэлектрика определяется механизмами Пула-Френкеля и туннелирования по ловушкам. Установлено, что центры, ответственные за стресс - индуцированные токи утечки через слои SiO₂ имеют глубокое (при T=300 K) энергетическое положение относительно зоны проводимости SiO₂ - (0.53±0.04 эВ, 0.73±0.04 эВ, 0.95±0.5 эВ и 2.67±0.4 эВ).
5. Показано, что распределение концентрации электрически активных центров, влияющих на проводимость НП, выращенных методом МЛЭ, неоднородно по длине нанопроволок. Определена область локализации центров по длине НП.
6. Разработан метод формирования НП на слоях КНИ, который основан на переносе литографически определенного в маске изображения на нанослой Si при использовании низкотемпературного, селективного сухого травления в XeF₂ или плазмохимического травления в смеси SF₆:CFCl₃ при смещениях, исключающих генерацию радиационных нарушений.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработан метод формирования НП транзисторов на слоях Si на изоляторе, который:
 - совместим со стандартными технологическими операциями КМОП-технологии,
 - является низкотемпературным процессом, что позволяет формировать НП элементы на любой стадии технологического процесса и легко интегрировать их в любые ИС.

Подтвержденная измерениями чувствительность КНИ-НП транзисторов в качестве сенсорных элементов к молекулам белка находится на уровне лучших мировых достижений в этой области. Поэтому данная работа может служить в качестве базовой для разработки промышленной технологии отечественных электронных детекторов для задач высокочувствительной медицинской экспресс-диагностики, исследований в области протеомики, задач безопасности и мониторинга окружающей среды.
2. Предложен алгоритм выбора режима работы КНИ-нанопроволочных транзисторов,

позволяющий достигать максимальный отклик сенсорного элемента при взаимодействии с исследуемыми частицами.

3. Установлены коэффициенты пропорциональности зависимостей накопления эффективного заряда и плотности состояний на границе раздела Si/SiO₂ от дозы ионизирующего γ -облучения в диапазоне 10⁵-10⁷ рад в нелегированных и ионно-легированных бором или фосфором структурах КНИ. Полученные коэффициенты могут быть использованы для оптимизации конструктивно-технологических параметров и прогнозирования радиационной стойкости приборов на основе структур КНИ.
4. Результаты исследований свойств структур Si/SiO₂ позволили определить условия, при которых достигается низкая плотность дефектов в наноразмерных системах. Полученные результаты необходимы для изготовления нано-приборов со стабильными границами Si/диэлектрик.
5. Низкая плотность электрически-активных центров в структурах кремний на изоляторе показывает перспективность используемого метода формирования наноразмерных систем Si/SiO₂ для 3-х мерной интеграции – формирования многослойных p(Si/SiO₂) структур и приборов на их основе.

На основе исследований перечисленных выше проблем сформулированы основные **положения, выносимые на защиту.**

1. Структуры Si/SiO₂, полученные методом водородно-индуцированного переноса Si и бондинга с окисленной подложкой, не подвергавшиеся ионному облучению, обеспечивают высокую стабильность параметров систем Si/SiO₂ (низкую плотность дефектов) для наноразмерных приборов на их основе, благодаря следующим факторам:
 - около 90% дефектов в слое SiO₂ вблизи границы с рабочим слоем Si являются электрически неактивными, плотность ловушек носителей заряда не превышает 10¹¹ см⁻², что определяется структурой слоя SiO₂ вблизи границы бондинга;
 - свойства слоя Si, прилежащего к слою SiO₂, соответствуют свойствам объемного кремния.
2. Предложен и реализован низкотемпературный метод формирования Si нанопроволочных структур на слоях SiO₂, который позволяет реализовать КНИ-НП транзисторы с чувствительностью к белкам на уровне 10⁻¹⁵ моль/литр при использовании их в качестве биохимических сенсоров. Метод совместим со стандартной КМОП-технологией.
3. КНИ - транзисторы на обедняемых слоях Si со свободной поверхностью (без фронтального затвора) являются одновременно и объектом, и инструментом исследований, который позволяет разрабатывать новые методы подготовки поверхности кремния для управления и

оптимизации зарядовым состоянием поверхности:

обработка в хингидрон/метаноле, пассивация в HF и метаноле, нанесение нитрированных в NO_2 нанослоев SiO_2 позволяют получать три основных состояния - инверсии, обеднения и обогащения на поверхности n-Si, соответственно.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: Международная конференция по поверхности, покрытиям и наноструктурированным материалам (Nanosmat-2012, Прага 2012), Международная конференция «Постгеномные технологии для биомедицины» (PTB2012, Новосибирск 2012), Международном конгрессе "Нанонаука и нанотехнология" (Napo-S&T, Китай 2011), Международное совещание по разработкам материалов, процессов и применениям новых технологий (Португалия 2010); Международная конференция по наноструктурным материалам (Киев 2010); "Международные конференции по структурам КНИ (Киев, NATO ARW 2010, 2004); Международное совещание электрохимического общества, ECS (Австрия 2009); Международная конференция по структурам КНИ (EuroSOI-2009, Göteborg, Sweden 2009); Международный форум по нанотехнологиям, (Rusnanotech II, Москва 2009); Международный симпозиум "Наноструктуры: физика и технология" (Минск 2009, Санкт-Петербург, 2006, 2004, 2003); Международная конференция по ионно-лучевой модификации материалов, IBM (Германия 2008); Международная конференция по микро- и нанoeлектронике, нанотехнологиям и МЭМС (Греция 2007); Международная конференция по физике полупроводников (Австрия 2006); Международный симпозиум "КНИ технологии и приборы" (Канада 2005), Международная конференция "Микро- и нанoeлектроника" (Москва-Звенигород 2003); Международный симпозиум NGCM (Nano and Giga Challenges in Microelectronics, Москва 2002); Всероссийская конференция по физическим и физико-химическим основам ионной имплантации (Новосибирск, 2012), Российская конференция "Кремний" (Санкт-Петербург 2012, Новосибирск 2009, Красноярск 2006, Москва 2003); Российская конференция по фундаментальным проблемам бионанотехнологий (Новосибирск 2009), Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск-Томск 2009, Екатеринбург 2007, Москва 2005, Новосибирск 2001); Всероссийская конференция "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Казань 2008, Нижний Новгород 2004).

По материалам, изложенным в диссертации, опубликовано 23 работы в отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях, в том числе 2 патента РФ, а также многочисленные тезисы в трудах различных конференций.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в определении цели, постановке задач, выборе способов решения и методов исследования, интерпретации полученных результатов и их анализе. Электрические измерения, их автоматизация, обработка и интерпретация были проведены либо лично автором, либо под его научным руководством.

Результаты, полученные другими методами и используемыми для интерпретации результатов, разработка методов формирования приборных структур были проведены и получены совместно с сотрудниками ИФП СО РАН. Электрические измерения по адсорбции белков AFP и HBsAg на КНИ-НП сенсоры проведены в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательском институте биомедицинской химии имени В.Н.Ореховича» Российской академии медицинских наук (ИБМХ РАМН).

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, двух приложений и выводов. Во введении сформулированы цели и основные задачи работы, обоснована актуальность тематики исследований, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены защищаемые положения.

Глава 1. Закономерности формирования дефектов в слоях Si структур Si/SiO₂ полученных методом водородно-индуцированного переноса Si на окисленную подложку

В первой главе анализируются особенности формирования структур Si/SiO₂, полученных методом водородно-индуцированного переноса и бондинга. Описываются особенности и ограничения методов электрической характеристики структур с нанометровыми слоями кремния. Приводятся оригинальные результаты по исследованию основных закономерностей формирования дефектов в наноразмерных структурах Si/SiO₂ и разработке подходов, позволяющих уменьшить их плотность.

Для систем Si/SiO₂, полученных методом водородно-индуцированного переноса слоя Si на окисленную подложку, прежде всего, встает вопрос о структурном совершенстве и электрических свойствах слоя Si вблизи границы бондинга, являющимся рабочим слоем для наноразмерных приборов.

Проблемой для таких систем остаются: 1) изменение кинетики и отжига дефектов за счет наличия скрытого слоя SiO₂, как барьера для диффузии дефектов в подложку, 2) сопоставимость размеров формирующихся структурных дефектов и толщины нанослоя Si, 3) возможность внесения, “запечатывания” различного вида загрязнений и примесей, формирования макро- и микро-пустот на границе соединения диэлектрика с рабочим слоем кремния. Результатом могут быть увеличение

заряда в слое SiO_2 , накопление структурных дефектов и деградации подвижности носителей заряда в нанослоях Si вблизи границы со скрытым диэлектриком.

К моменту выполнения данной работы на структурах КНИ-Smart-Cut [18] и КНИ-SIMOX [19] было показано, что переход от исходных субмикронных к нанометровым слоям Si, который осуществляется с использованием цикла операций – термическое окисление - удаление жертвенного окисла в плавиковой кислоте, сопровождается увеличением концентрации структурных HF-дефектов³. В качестве HF-дефектов могут быть кислородные преципитаты, силициды металлов и скопления вакансий [18-20].

Для исследуемых структур КНИ место формирования (граница прямого соединения или граница отсеченного слоя Si с жертвенным слоем SiO_2 на поверхности), природа и способы управления концентрацией HF-дефектов оставались открытым вопросом. Поэтому были проанализированы следующие возможные причины увеличения концентрации HF-дефектов при переходе к нанослоям КНИ исследуемых структур:

- 1) дефекты сформированы в процессе бондинга слоев Si и SiO_2 , представляют собой микропустоты и выявляются в процессе утончения, когда размер дефекта становится сопоставим с толщиной отсеченного слоя Si;
- 2) дефекты образуются в процессе высокотемпературного термического окисления, граница бондинга Si/ SiO_2 является их эффективным стоком;
- 3) дефекты образуются в процессе высокотемпературного термического окисления вблизи/от внешней границы раздела и с утончением слоя Si достигают скрытый слой SiO_2 (их размер становится сопоставим с толщиной отсеченного слоя Si).

Экспериментальная проверка осуществлялась с использованием различных видов окислений: высокотемпературного термического, низкотемпературного химического и их комбинации, а также с использованием различного исходного материала - Si-Чохральского (Cz-Si) или зонной плавки (Fz-Si) – рис.1 [A3].

Анализ результатов позволил заключить, что

- плотность структурных (HF-) дефектов вблизи границы бондинга после изготовления структур КНИ не превышает 10^3 см^{-2} ;
- основными дефектами, ответственными за формирование HF-дефектов при высокотемпературных (900-1100 °C) окислительных операциях, в нанослоях Si являются кислородные преципитаты; доминируют преципитаты пластинчатой формы - линейные размеры преципитатов составляют менее 100 нм по высоте и от десятков нанометров до единиц микрометров в диаметре;

³ Все типы дефектов, выявляемые в виде микроканалов в слоях Si при обработках в плавиковой кислоте. Плотность HF-дефектов является параметром, входящим в спецификацию пластин КНИ

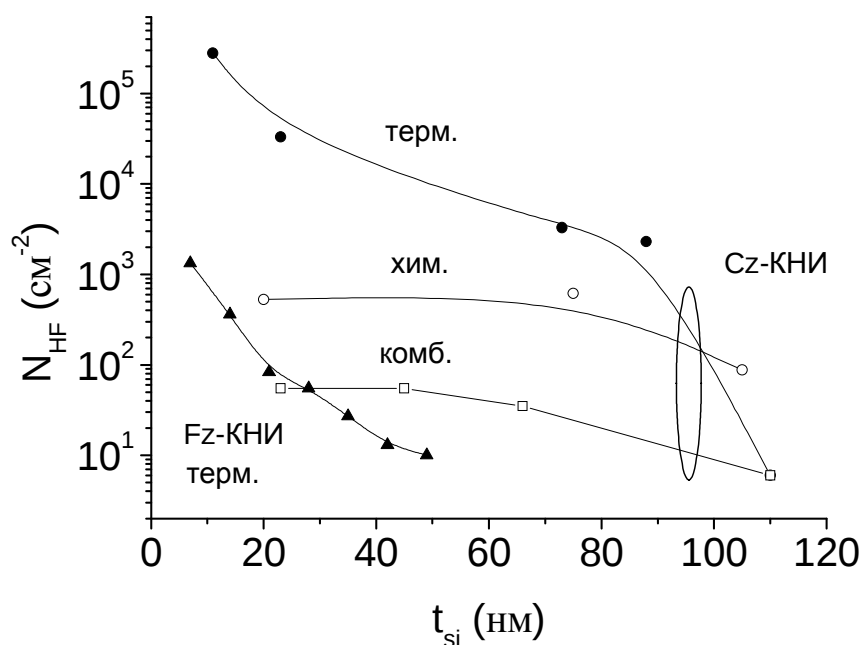


Рис.1. Зависимость концентрации HF-дефектов от толщины отсеченного слоя кремния в структурах Cz-КНИ и Fz-КНИ после термического, химического и комбинированного (термическое до 110 нм и химическое утончение до 23 нм) утончения [А3].

- образование дефектов в процессе высокотемпературных окислительных обработках идет вблизи/от поверхности отсеченного слоя кремния.

Предложен метод диффузионной очистки субмикронных слоев КНИ, который основан на создании условий для геттерирования фоновых примесей/дефектов на внешней поверхности слоев Si. Показано, что предварительный процесс по диффузионной очистке отсеченного слоя кремния в исходных (400-600 мкм) слоях КНИ на основе Si-Чохральского позволяет достигать не критичную для изготовления наноразмерных приборов плотность HF-дефектов (меньше 10^3 см^{-2} при толщине отсеченного слоя кремния 10-20 нм).

В качестве комплексного параметра систем Si/SiO₂, отражающего качество и границы раздела Si/SiO₂, и прилежащего к ней слоя кремния использованы полевые зависимости подвижности носителей заряда⁴ или зависимости подвижности от избытка носителей заряда в индуцированных каналах проводимости КНИ-транзисторов.

Использование КНИ-МОП транзисторов с двумя независимо управляемыми затворами, позволяло сравнивать параметры систем Si/SiO₂ с границей раздела, полученной бондингом (ГР-1)

⁴ Подвижность носителей заряда в индуцированных каналах проводимости определяется разными механизмами рассеяния при различных значениях эффективной поперечной составляющей напряженности электрического поля, $E_{\text{эфф}}$. В области слабых полей доминирует кулоновское рассеяние (в частности, на состояниях границы раздела Si/SiO₂), в области средних $E_{\text{эфф}}$ - рассеяние на фононах, при сильных - рассеяние на микрорельефе границы раздела [21].

и термическим окислением (ГР-2) на одном и том же слое Si.

Показано [A8, A9], что для 100-400 нм структур Si/SiO₂, сформированных методом водородно-индуцированного переноса Si на окисленную подложку, вблизи границы бондинга полевые зависимости подвижности дырок и электронов в инверсии соответствуют аналогичным универсальным зависимостям в системах Si/SiO₂ на объемном кремнии. В области электрических полей $(1-4) \times 10^5$ В/см наблюдается зависимость $\mu \sim E_{\text{эфф}}^{-0.3}$, характерная для рассеяния носителей заряда на фононах (рис.2).

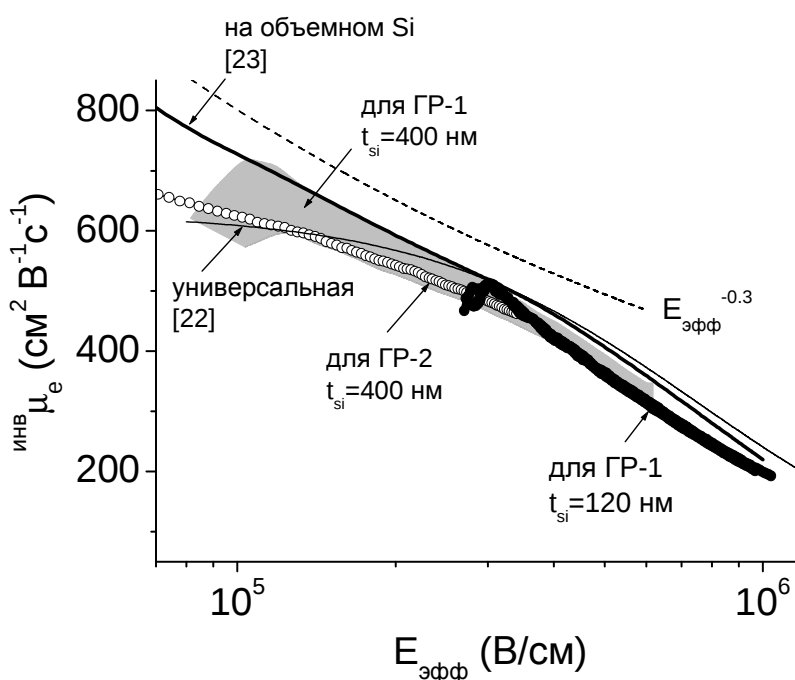


Рис.2. Зависимости эффективной подвижности электронов в инверсионном слое от эффективной поперечной составляющей напряженности электрического поля вблизи границы бондинга (ГР-1) и границы Si с термически выращенным слоем SiO₂ (ГР-2) для структур КНИ с разной толщиной слоя Si. Для сравнения приведены $\mu_e(E_{\text{эфф}})$ зависимости для систем Si/SiO₂ на объемном Si, полученные в работах [22] (универсальная) и [23]. Пунктиром показана степенная зависимость $\mu(E_{\text{эфф}}^{-n})$ с показателем $n=0.3$.

Полевые зависимости подвижности электронов в обогащении соответствуют аналогичным зависимостям в системах Si/SiO₂ на объемном Si, однако с различным уровнем легирования вблизи термической ГР и вблизи границы сращивания.

Сделан вывод, что структурное совершенство субмикронных слоев Si на SiO₂ (в том числе вблизи границы бондинга) соответствует объемному.

Установлено, что среднее значение концентрации носителей заряда вблизи границы бондинга

для исследуемых структур составляет $\sim 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (вблизи термической - $\sim 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при субмикронной толщине слоя Si), плотность эффективного заряда в скрытом окисле систем Si/SiO₂ $Q_{\text{eff}}/q = (1-3) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, плотность состояний на границе раздела - до $D_{\text{it}} \sim (1.4-3.5) \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ вблизи середины запрещенной зоны кремния.

Показано, что электрические параметры структур Si/SiO₂ с нанослоями кремния определяются свойствами исходного материала (Cz-Si или Fz-Si).

Установлено, что для систем отсеченный слой Cz-Si /скрытый слой SiO₂ при переходе от субмикронных к (100-9) нм слоям Si наблюдается увеличение эффективного (отрицательного) заряда плотностью до $\sim 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [A10]. Для 10 нм Fz-Si/ SiO₂ систем плотность эффективного заряда составляет $\sim 3-4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, заряд положительный. Увеличение эффективного заряда в диэлектрике структур Cz-КНИ связано с увеличением плотности состояний на ГР (до $\sim 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ в 15-20 нм и $\sim 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ в 9 нм структурах КНИ). Увеличение плотности состояний с уменьшением толщины слоя КНИ наблюдается на обоих ГР отсеченного слоя Si. Предварительная диффузионная очистка субмикронных слоев Cz-КНИ позволяет снизить плотность состояний до $\sim (2-6) \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ в 15-20 нм слоях Cz-КНИ.

Установлено, что при условии обогащения на поверхности нанометровых слоев Cz-Si подвижность электронов в обогащении ${}^{\text{об}}\mu_e$: 1) составляет в максимуме $1000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$; 2) подчиняется степенному закону ${}^{\text{об}}\mu_e \sim N_e^{-n}$ (где N_e - избыток электронов в канале проводимости) с показателем $n=0.3$ в диапазоне $N_e = 4 \times (10^{11}-10^{12}) \text{ см}^{-2}$; и 3) слабо зависит от толщины отсеченного слоя кремния в диапазоне (20 – 400 нм). При переходе к 9 нм слоям Cz-Si наблюдается резкая деградация подвижности носителей заряда (аналогично поведению подвижности электронов в инверсионных слоях КНИ-Smart-Cut [24] - значения ${}^{\text{об}}\mu_e$ не превышает $100 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, при этом сохраняется зависимость ${}^{\text{об}}\mu_e \sim N_e^{-n}$ с $n=0.3$, характерная для рассеяния на фононах.

Установлено, что для 10 нм Fz-Si/SiO₂ систем при условии обогащения на поверхности Si максимальные значения ${}^{\text{об}}\mu_e$ составляют $1500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ и $2700 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при комнатной и азотной температурах, соответственно. Наблюдается степенная зависимость подвижности электронов от избытка носителей заряда в каналах проводимости с показателем $n=0.60-0.65$ в диапазоне $N_e = 4 \times (10^{11}-10^{12}) \text{ см}^{-2}$. Анализ зависимостей позволил заключить, что работают два механизма рассеяния – на фононах (с $n=0.3$) и кулоновское (с $n=1$, характерное для электрон-электронного рассеяния). Кулоновское рассеяние с $n=1$ является доминирующим при условии обеднения на поверхности 10 нм Fz-Si при азотной температуре. При условии инверсии на поверхности Fz-КНИ и значениях $N_e > 10^{12} \text{ см}^{-2}$ доминирует рассеяние на микрорельефе границы раздела ($n=2.6$).

Установлено, что при условии инверсии на поверхности нанослоев КНИ ${}^{\text{об}}\mu_e(N_e) \sim \text{const}$ ($n=0$), что характерно для кулоновского рассеяния (в частности, на зарядах на ГР).

Обнаружены центры с уровнем $E_c-(0.21-0.23)$ эВ в запрещенной зоне кремния, неравномерно распределенные по площади структур КНИ с нанослоями Cz-Si. По энергетическому положению центры $E_c-(0.21-0.23)$ эВ можно идентифицировать с дислокациями [25, 26], локализованными на/вблизи границы бондинга Si/SiO₂.

В **Приложении 1** для сравнения приведены результаты исследований электрических свойств нанопроволочных структур, выращенных методом МЛЭ. Установлено наличие 4-х перезаряжающихся центров с неравномерным распределением концентрации по длине нанопроволок [A11], что показывает возможность введения дефектов на разных стадиях роста НП.

Эффекты плавающего потенциала островка КНИ (“плавающего тела” КНИ-транзистора, ФВ-эффекты⁵) были использованы для выявления дефектов, вводимых имплантацией бора или фосфора в структуры Si/SiO₂.

Обнаружено, что пост-имплантационные отжиги при 950 °C/1050 °C, используемые для активации примеси в МОП-транзисторах на объемном кремнии недостаточны для полного устранения дефектов, вводимых имплантацией бора.

Можно различить два типа пост-имплантационных дефектов, вводимых бором.

Первые являются центрами рекомбинации дырок (введение их приводит к подавлению ФВ-эффектов и эквивалентно наличию стока – контакта к островку КНИ). Данные центры могут быть пассивированы отжигом в водороде при 420 °C. Второй тип дефектов – метастабильные центры рекомбинации электронов. Данные центры формируются при отжиге в водороде. Следствием их формирования является резкое уменьшение тока в n-канальных КНИ-МОПТ, работающих в ФВ-режиме.

Для нанометровых слоев Si, имплантированных бором, обнаружены квазипериодические осцилляции проводимости при комнатной температуре для одного типа носителей заряда – дырок [A12]. Эффект объясняется формированием туннельных барьеров для дырок за счет флуктуаций заряда из-за неравномерного распределения бора в системах Si/SiO₂ или связанных с бором пост-имплантационных дефектов.

Результаты численного моделирования характеристик двухзатворных КНИ-транзисторов [A13] в режиме заземленного и плавающего потенциала КНИ позволили заключить, что материал затвора, состояние слоя КНИ (наличие/отсутствие заземляющего контакта, центров рекомбинации основных носителей заряда), толщина отсеченного слоя кремния, напряжение на противоположном затворе, длина канала - являются основными (перечисленными по степени уменьшения их воздействия) управляющими параметрами КНИ-нанотранзисторов с двумя независимыми затворами.

⁵ увеличение тока КНИ-МОП транзистора с увеличением тянущего напряжения или напряжения на затворе при отсутствии заземляющего контакта к островку КНИ (телу транзистора)

Полученные закономерности в накоплении структурных (HF-) дефектов, изменении подвижности носителей заряда, изменении заряда в скрытом диэлектрике от толщины слоя кремния в структурах Si/SiO₂ позволили сделать вывод, что деградация параметров наноразмерных систем Si/SiO₂ связана с перестройкой примесно-дефектной структуры в слоях КНИ в процессе термоокислительных операций и определяется свойствами исходного материала кремния.

Предложенный метод диффузионной очистки субмикронных слоев КНИ при создании условий для стока дефектов на внешнюю поверхность слоя Si или переход на материал марки Fz предотвращает деградацию структурных и электрических параметров и позволяет обеспечить в 9-400 нм структурах КНИ:

- плотность HF-дефектов меньше 10^3 см^{-2} ,
- значение эффективного заряда в скрытом слое SiO₂ – $3\text{-}4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$,
- значение подвижности электронов – $1000\text{-}1500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Глава 2. Свойства диэлектриков в структурах Si/SiO₂ и их модификация при ионной имплантации

Для наноразмерных структур Si/SiO₂ с большим аспектным отношением поверхность/объем, особенно важными являются вопросы о плотности дефектов в системах Si/SiO₂ и энергетическом положении центров, ответственных за ток утечки через нанометровые слои диэлектрика. Электрические свойства слоев SiO₂ и их деградация в системах Si/SiO₂ определяются как исходными (после изготовления) структурными и электрическими свойствами систем, так и их модификацией при изготовлении приборов. В частности, ионная имплантация, которая широко используется для введения легирующей примеси в слои Si, может вводить радиационные дефекты (прекурсоры дефектов) в нижележащий слой диэлектрика. Поэтому в данной главе приводятся оригинальные результаты исследований закономерностей накопления дефектов в скрытых слоях SiO₂ структур КНИ, изготовленных методом водородно-индуцированного переноса Si и бондинга с окисленной подложкой, и в нанометровых нитрированных слоях SiO₂. Воздействие ионизирующего γ -облучения и выдержка структур под напряжением использовались как методы выявления электрически активных дефектов в слоях SiO₂ и их прекурсоров⁶ в исходных структурах Si/SiO₂, полученных бондингом и имплантированных бором или фосфором. Для сравнения приводятся данные по накоплению заряда в системах Si/SiO₂ для структур КНИ-Unibond (технология Smart-Cut) и SIMOX [A14, A15]. Приводятся также результаты исследования проводимости нитрированных нанометровых слоев SiO₂ после электрических воздействий в режиме Фаулера-

⁶ Прекурсоры - электрически нейтральные центры, способные проявляться как электрически активные при стрессовых (радиационных, электрических) воздействиях

Нордгейма и пробы диэлектрика.

Установлено, что для исходных (не подвергавшихся ионной имплантации) структур Si/SiO₂ с границей раздела, полученной бондингом, плотность электрически активных центров, выявляемая при стрессовых электрических воздействиях в диапазоне электрических полей до 6×10^6 В/см не превышает 10^{11} см⁻², плотность ловушек носителей заряда и их прекурсоров, выявляемая при γ -облучении дозой 10^7 рад, составляет $(10-12) \times 10^{11}$ см⁻² [A16].

Показано, что в интервале доз $D=(10^5-10^7)$ рад при γ -облучении плотность эффективного заряда $Q_{эфф}$ и плотность заряда на поверхностных состояниях D_{it} для системы Si/SiO₂ (скрытый) аппроксимируются логарифмическими зависимостями $k_i \ln D$. Определены соответствующие значения k_i для исходных систем КНИ/SiO₂ и систем, подвергавшихся ионной имплантации (табл.2). Полученные данные позволяют прогнозировать радиационное поведение КНИ-транзисторов с используемым типом подложек КНИ.

Табл.2. Зависимость коэффициентов k_1 и k_2 (характеризующих изменение заряда на ГР и в диэлектрике от $\ln D$, соответственно) от типа и концентрации имплантированной примеси в структурах Si/SiO₂ с границей раздела, полученной бондингом [A17].

Тип и концентрация имплантированной примеси, см ⁻³	$k_1, 10^{11}$ (для D_{it}), эВ ⁻¹ см ⁻²	$k_2, 10^{11}$ (для $Q_{эфф}$), см ⁻²
Исходные (не имплантированные)	0.62	2.43
слои КНИ (n-Si, 6×10^{16} см ⁻²)		
В, 5×10^{16}	0.47	2.57
В, 4.5×10^{17}	0.62	3.20
В, 2×10^{18}	0.56	4.70
Р, 1×10^{18}	1.71	4.46

Установлено, что предварительная имплантация бора или фосфора, используемая при изготовлении КНИ-МОП-транзисторов, несмотря на активационные отжиги при 950 °C/1050 °C, увеличивает концентрацию дефектов в скрытом окисле структур КНИ (в 2-2.5 раза при уровне легирования отсеченного слоя кремния $(1-2) \times 10^{18}$ см⁻³). Имплантация фосфора, в отличие от имплантации бора, приводит к увеличению плотности состояний на границе раздела КНИ/SiO₂ (до 20% от плотности накапливаемого фиксированного заряда в SiO₂ при дозе 10^7 рад). Деграция границы раздела Si/SiO₂ происходит при дозах γ -облучения больше 10^7 рад независимо от типа и дозы имплантированной примеси.

Показана низкая плотность накопленного заряда (повышенная радиационная стойкость) для

скрытого слоя SiO_2 исходных (нелегированных) или низколегированных структур КНИ-DeleCut в сравнении со слоями SiO_2 в структурах КНИ-Smart-Cut и SIMOX [A17, A18].

Показана слабая зависимость накопленного заряда от толщины (80-350 нм) скрытого диэлектрика, полярности/величины внутреннего электрического поля в исходных слоях SiO_2 при γ -облучении в интервале доз $D=(10^5\text{-}10^7)$ рад [A15, A16]. Результаты исследований позволили заключить, что генерация ловушек из прекурсоров в скрытом слое SiO_2 исходных структур КНИ является лимитирующим фактором и причиной низкой скорости накопления заряда в диэлектрике при последующем γ -облучении в интервале доз $D=(10^5\text{-}10^7)$ рад.

Предложена качественная модель, объясняющая полученные закономерности накопления дефектов в скрытом слое SiO_2 структур КНИ при стрессовых воздействиях. Модель основана на следующих особенностях формирования слоев КНИ методом водородно-индуцированного переноса и бондинга Si с окисленной подложкой (по сравнению с системами Si/ SiO_2 , полученных термическим окислением Si): 1) формирование нестехиометрического слоя SiO_x происходит после соединения слоев Si и SiO_2 и ограничено концентрацией кислорода (источник - несколько монослоев воды, адсорбированных на поверхности слоев SiO_2 и Si перед бондингом и кислород в субмикронном слое Si), и 2) следующий за SiO_x слой имеет структуру объемного слоя SiO_2 , где доминируют шестичленные кольца тетраэдров $[\text{SiO}_4]^4$ с энергетически выгодным углом мостиковой связи Si-O-Si, в отличие от четырехчленных колец за SiO_x слоем для систем Si/ SiO_2 , полученных термическим окислением кремния [17].

Ограничение по концентрации кислорода, соответственно, по толщине нестехиометрического слоя SiO_x вблизи границы бондинга и “объемные” свойства следующего за ним слоя SiO_2 (с релаксированными Si-O-Si связями и низкой концентрацией избыточного недоокисленного кремния) обеспечивают низкую плотность дефектов в скрытом слое SiO_2 для исходных структур КНИ и их повышенную стойкость при ионизирующем радиационном облучении или электрическом воздействии.

Установлено, что плотность ловушек носителей заряда и их прекурсоров в нитрированных системах Si/ SiO_2 , ионно-имплантированных бором или фосфором, не превышает значения $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Экспериментально показано, что изготовленные КНИ МОП-транзисторы с подзатворными нитрированными 5-6 нм слоями SiO_2 обладают повышенной радиационной стойкостью (рис.3) - сдвиг порогового напряжения транзисторов при дозе 10 Мрад не превышает 50 мВ [A17].

Установлен ряд центров (при использовании температурных зависимостей тока и TAT- (trap assistant tunneling) модели туннелирования по ловушкам [27, 28], ответственных за проводимость нитрированных слоев SiO_2 после стрессовых воздействий в режиме Фаулера-Нордгейма и жесткого пробоя диэлектрика - $(0.53 \pm 0.04 \text{ эВ}, 0.73 \pm 0.04 \text{ эВ}, 0.95 \pm 0.5 \text{ эВ}$ и $2.67 \pm 0.4 \text{ эВ}$ относительно зоны

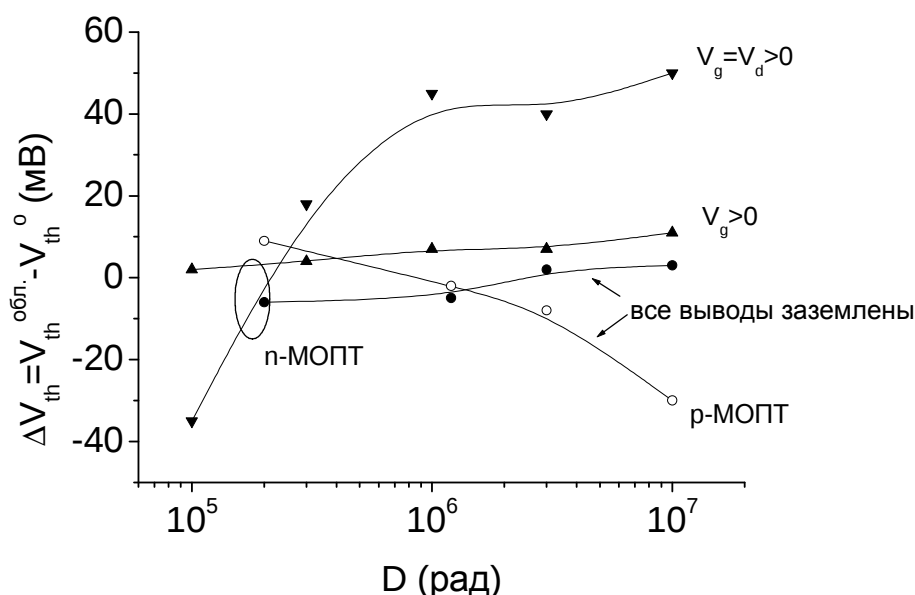


Рис.3. Зависимости сдвига порогового напряжения n-канальных и p-канальных КНИ МОП транзисторов от дозы γ - облучения. Облучение проводилось при различных напряжениях на выводах транзисторов [A17].

проводимости SiO_2).

Обнаружено, что центры $E_c-0.53$ эВ генерируются как при напряженностях электрических полей, характерных для режима Фаулера-Нордгейма, так и после пробоя диэлектрика. Эти центры могут определять перенос носителей заряда 1) по механизму ТАТ и 2) по механизму Пула-Френкеля (после пробоя диэлектрика) [A18].

Глава 3 Свойства систем Si/SiO_2 со свободной поверхностью. КНИ-нанопроволочные транзисторы.

В данной главе приводится анализ различных видов загрязнений поверхности пластин кремния после их хранения и механизмов химической очистки поверхности. Приводятся оригинальные экспериментальные результаты по определению зарядового состояния свободной (покрытой естественным окислом) поверхности наноразмерных структур Si/SiO_2 после длительного хранения и различных видов химических обработок, стабилизирующих состояние поверхности.

Одной из основных проблем при определении электрических свойств 2D и 1D структур является стабилизация зарядового состояния поверхности. Анализ литературных данных показывает, что даже после хранения в условиях чистых комнат и в пластиковых коробках на поверхности Si пластин адсорбируется целый ряд металлических и органических загрязнений (одной из основных причин адсорбции органических загрязнений на поверхность Si считается

формирование водородных связей между полярными группами органических молекул и группами на поверхности естественного окисла на Si). Для удаления различных загрязнений химическим способом в технологии современной микроэлектроники используется стандартная обработка RCA [29], включающая в себя обработки в перекисно-аммиачных (SC-1) и перекисно-кислотных (SC-2) растворах. С целью формирования неполярных групп на поверхности Si используются такие способы химической пассивации поверхности, как обработка в HF, метаноле [30], йодистом метаноле [31] и хингидроном в метаноле [32, 33]. Поскольку RCA обработка включает ряд операций, применение которых к приборным структурам, содержащим слои Si, SiO₂, металла становится проблематичным, то требуется новый стандарт обработок (с измененным составом растворов, длительностью и температурным режимом). С другой стороны, для определения параметров наноразмерных структур Si/SiO₂ необходимо уметь управлять зарядовым состоянием поверхности – создавать контролируемые стабильные состояния обогащения, обеднения, инверсии вблизи поверхности слоя кремния. Поэтому работа была направлена на поиск условий химической очистки после хранения и стабилизации открытой поверхности структур Si/SiO₂ (КНИ-транзисторов), позволяющих создавать одно из трех необходимых состояний (обогащения, обеднения и инверсии) со стороны поверхности Si.

КНИ-транзисторы на нанометровых слоях n-Si с омическими контактами на концах и открытой поверхностью использовались как объект и как инструмент исследований в качестве высокочувствительных сенсорных элементов. Для сравнения использовались транзисторы с верхним (фронтальным) затвором, позволяющим контролируемо управлять слоя Si со стороны поверхности.

Показано, что со временем после изготовления на поверхности КНИ-транзисторов накапливается отрицательный заряд. Плотность адсорбируемого заряда в насыщении составляет $Q_{\text{eff}}/q = (2-4) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и достигается в течение 1-2 месяцев после изготовления структур, в то время как перестройка поверхностных состояний является более медленным процессом и достигается в течение 10-14 месяцев [A19].

Обнаружена частотная зависимости диэлектрической проницаемости для 5-6 нм нитрированных слоев SiO₂ в системах SiO₂/Si-объемный, хранящихся с открытой поверхностью и отсутствие $\epsilon(\omega)$ зависимости на структурах, защищенных слоем поли-кремния или с относительно толстым (45 нм) открытым слоем SiO₂. Результаты позволяют заключить, что деградация поверхностных состояний в нанометровых системах с открытой поверхностью обусловлена изменением химического состава слоя SiO₂ и ограничена диффузией с поверхности (наиболее вероятно, молекул воды, гидроксильных групп).

Установлено, что обработки SC-1 при комнатной температуре с последующей пассивацией

поверхности Si в HF и метаноле могут быть использованы для очистки и стабилизации поверхностных состояний КНИ-транзисторов.

Установлено, что обработка в метаноле (дополнительно к HF) не влияет на кинетику роста естественного окисла на поверхности нанослоев КНИ, практически не вносит дополнительный заряд в системы Si/SiO₂, однако 1) приводит к увеличению амплитуды полос ИК-поглощения на частотах 1200-1470 см⁻¹ и 3200-3400 см⁻¹, связанных, в частности, с карбоксилатными группами, и 2) стабилизирует (по сравнению с HF-обработкой) зарядовые состояния поверхности Si в течение 2-3 часов после обработок [A2].

Установлено, что используемые для пассивации поверхности пластин Si обработки (после предварительной SC-1 очистки при 300 K), создают отрицательный эффективный заряд на поверхности КНИ-транзисторов. Стабильные зарядовые состояния поверхности дают обработки в HF и метаноле (сразу после обработки) или хингидрон в метаноле (спустя 30 мин после обработки).

Установлено, что эффективный отрицательный заряд на поверхности структур Si/SiO₂ после обработок в HF и метаноле достаточен для создания на поверхности нанослоев n-Si состояния обеднения. Обработки хингидрон/метанол создают состояние инверсии (рис.4). Формирование термических нитрированных слоев SiO₂ создает вблизи поверхности Si состояние, близкое к

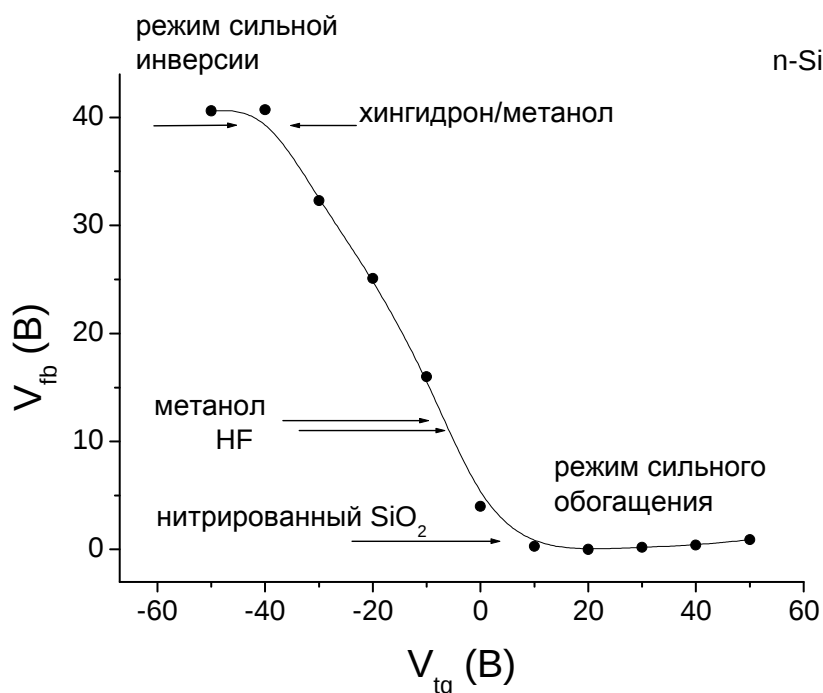


Рис. 4. Зависимости напряжения плоских зон от напряжения на фронтальном затворе для КНИ-транзистора. Стрелками показаны средние значения V_{fb} для транзисторов со свободной (без затвора) поверхностью после обработок в хингидрон/метанол, HF или метанол и для транзисторов с нитрированными 7 нм слоем SiO₂ на поверхности.

обогащению. Данные способы подготовки поверхности могут быть использованы для электрической характеристики и контроля состояния систем Si/SiO₂ с нанометровыми слоями кремния и приборов на их основе.

Глава 4. Формирование и свойства нанопроволочных биохимических сенсоров.

В данной главе описывается назначение и принцип действия биохимических сенсоров. Анализируются методы изготовления НП, их преимущества и недостатки в качестве сенсорных элементов, преимущества разработанного метода изготовления КНИ-НП транзисторов, как универсальной платформы для электронных детекторов. Приводятся оригинальные результаты по основным параметрам НП-сенсоров на основе структур КНИ, разработанных и изготовленных в ИФП СО РАН в качестве прототипа электронных биохимических детекторов. Приводятся результаты анализа по оптимизации конструктивно-технологических параметров системы КНИ-НП сенсор/электролит, алгоритм выбора рабочей точки КНИ-НП сенсоров, позволяющий достигать максимальную чувствительность сенсоров.

Методы изготовления и свойства НП сенсоров определяются: 1) типом технологии (“снизу - вверх” или “сверху-вниз”), 2) материалом НП, 3) методом формирования структур полупроводник на изоляторе (в случае выбора технологии “сверху-вниз”), 4) методом формирования НП, 5) методом изготовления контактов, 6) типом проводимости (легированием) НП.

Выбор Si (структур кремний на изоляторе) в качестве базового материала для изготовления сенсорного элемента обеспечивает совместимость со стандартной Si технологией (соответственно, возможность широкомасштабного производства). Тип процесса изготовления сенсорного элемента – “сверху-вниз” (наноструктурирование слоя полупроводника на изоляторе) определяет относительную простоту изготовления нанопроволоки, малочислящих контактов к ней, и возможность управляемого выбора режима работы НП-сенсора.

Показаны основные преимущества, вытекающие из конструкции НП-сенсоров на изоляторе. Принцип работы КНИ-НП сенсора основан на эффекте поля. Наличие скрытого слоя SiO₂ структур КНИ превращает КНИ-НП в полевой МОП-транзистор с двойным затвором. Подложка структур КНИ используется в качестве управляющего электрода (затвора BG), напряжением на котором, V_{bg} , формируется канал проводимости вблизи границы раздела скрытый окисел/Si-НП (рис.5).

Частица, адсорбируемая на поверхность КНИ-НП транзистора, действует как локальный затвор (TG), вызывая, из-за взаимосвязи потенциалов границ раздела слоя КНИ изменение проводимости в индуцированном напряжением V_{bg} канале - сдвиг затворных I_{ds} - V_{bg} характеристик транзистора по оси напряжений (вправо или влево, при адсорбции отрицательно или положительно заряженных частиц, соответственно). Из схематичного представления затворных характеристик

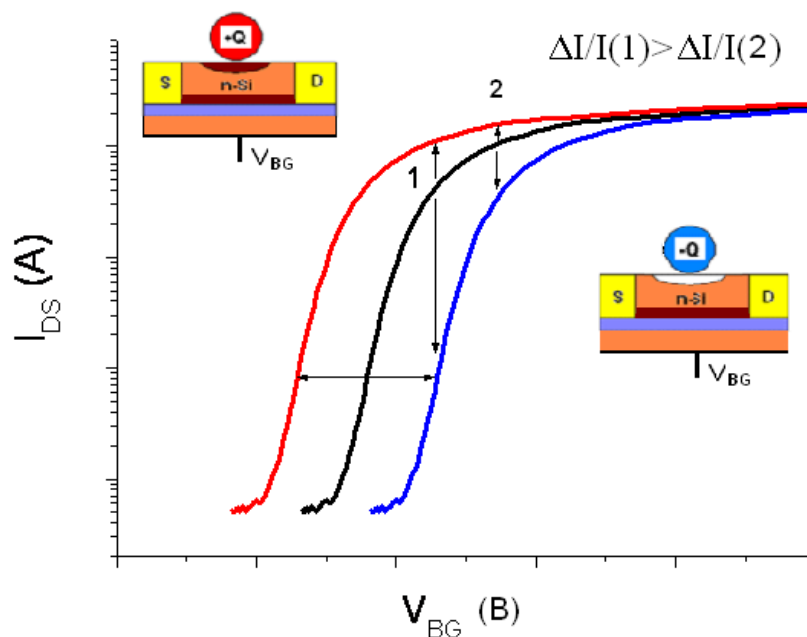


Рис.5. Схематичные изображения I_{ds} - V_{bg} зависимостей КНИ-НП сенсора (транзистора), до и после адсорбции положительного или отрицательного заряда на поверхности, иллюстрирующие изменение проводимости сенсора при различных значениях рабочего напряжения V_{bg} (в точках 1 и 2) [A2].

КНИ-транзистора (рис.5) видно, что в подпороговой области (режиме обеднения НП): 1) имеет место экспоненциальная зависимость тока от поверхностного потенциала, благодаря чему достигается максимальный отклик сенсора к адсорбируемой частице (ср. изменение тока в точке 1 и точке 2, рис.5), 2) величина отклика может быть настраиваема выбором напряжения на подложке V_{bg} , и 3) НП сенсор может быть использован для детектирования как положительно, так и отрицательно заряженных частиц [A2, 34]. Выбор рабочей точки КНИ-НПТ также обеспечивает возможность многократного использования его в качестве сенсорного элемента (при условии свободных мест связи на поверхности и до режима экранирования поверхности).

Приводятся результаты исследований электрических свойств КНИ-нанопроволочных транзисторов, изготовленных на основе разработанного метода наноструктурирования слоев КНИ.

Работы по наноструктурированию слоев КНИ, проводимые в ИФП СО РАН в 2002-2003 гг. показали, что использование реактивно-ионного травления является наиболее простым методом переноса нанометрового изображения на нанометровые слои КНИ при формировании многозатворных, многоканальных конструкций транзисторов [A1, A9, A20]. Однако, были выявлены также флуктуации проводимости в КНИ-НП транзисторах, связанные с остаточными дефектами, несмотря на высокотемпературные отжиги.

Так как основной тенденцией современной микро- и нанoeлектроники является развитие низкотемпературных процессов, то одним из основных требований к методу наноструктурирования

слоев КНИ при изготовлении прототипа НП - сенсоров на основе КНИ-НП транзисторов являлось требование формирования нанопроволок без использования высокотемпературных операций. Особо важным поэтому был вопрос о параметрах систем Si/SiO₂ после операций наноструктурирования слоев КНИ. Наноструктурирование слоев кремния на изоляторе (центральной части КНИ транзисторов) проводилось сочетанием методов электронной литографии (в электронном литографе Raith-150) и сухого травления - газового в XeF₂ [A7] или плазмохимического травления в SF₆:CFCl₃ смеси [A2, A8, A21]. Учитывая результаты исследований свойств систем Si/SiO₂ структур КНИ-DeleCut (гл.1 и гл.2), транзисторы изготавливались на нанослоях кремния на изоляторе, не подвергавшихся ионному легированию.

Установлено, что наноструктурирование слоев КНИ используемыми в работе методами не приводит к деградации свойств систем отсеченный слой Si/ скрытый слой SiO₂. Значения подвижности электронов в обогащении не зависят от ширины проволок и составляют 400-200 см²В⁻¹с⁻¹ при плотности избыточных носителей 10¹²-10¹³ см⁻² и условии обеднения со стороны поверхности.

Показано, что при стрессовых воздействиях электрического поля в скрытом слое SiO₂ структур КНИ напряженностью до 6х10⁶ В/см ток нанопроволочного транзистора I_{ds} не изменяется во времени. При пассивации состояний на поверхности отношение среднего значения к стандартному отклонению тока составляет $\bar{I}_{ds}/\langle\sigma_x\rangle$ больше 10 при значениях проводимости транзисторов больше 30 нС.

В **Приложении 2** получено соотношение для модельной системы КНИ-транзистор/электролит, позволяющее рассчитывать заряд, адсорбируемый на поверхность сенсорного элемента по сдвигу напряжения на затворе транзистора (подложке структур КНИ).

Показано, что R_{max} (ΔV_{bg}) зависимость (где R_{max} – максимальный отклик к адсорбируемому заряду, и ΔV_{bg} – сдвиг затворных характеристик сенсора, выраженный в единицах подпорогового наклона S) представляет универсальную кривую, которая подходит для анализа сенсора с любыми конструктивными параметрами. При заданных значениях отклика эта зависимость позволяет рассчитать минимальный заряд, детектируемый сенсором с известными конструктивными параметрами и условиями измерений.

Приведены оценки минимального (вызывающего 10% модуляцию проводимости), заряда, детектируемого сенсором.

Показано, что изменение толщины скрытого окисла t_{box} в пределах 10-200 нм и отсеченного слоя кремния t_{si} в пределах 100-10 нм позволяют уменьшить Q_{ad}^{min} до 3 раз; изменение толщины окисла на поверхности сенсорного элемента t_{ox} в пределах 50-2 нм и двойного слоя электролита t_{dl} в пределах 1-10 нм позволяют уменьшить Q_{ad}^{min} до 2 раз. Для минимизации ΔQ_{ad}^{min} необходимо

стремиться к плотности поверхностных состояний меньше 10^{12} см^{-2} , значениям толщины Si-НП - 10-40 нм, толщине скрытого диэлектрика структур КНИ - больше 100 нм и выполнению условий $t_{\text{box}}/t_{\text{si}} > 3$, $t_{\text{si}}/t_{\text{ox}} > 10$. Значение $\Delta Q_{\text{ad}}^{\text{min}}$ для КНИ-НП сенсора с такими параметрами, используемого в (1-100) мМ растворах, составляет $(2-4) \times 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$.

Предложен алгоритм выбора рабочей точки (напряжения на затворе КНИ-транзистора), обеспечивающий максимальный отклик сенсора при мониторинге модуляции его проводимости в процессе последующей адсорбции частиц на поверхность.

Используемые в работе подходы при расчете соотношения по определению адсорбированного заряда, алгоритма выбора оптимального режима работы действительны для любого типа НП сенсоров на подложках изолятор-полупроводник при условии, что ширина НП больше области обеднения, индуцируемой адсорбированной частицей.

Для экспериментальной проверки КНИ-НП-транзисторов в качестве биохимических сенсоров были использованы водные растворы соляной кислоты [A22], буферные растворы с молекулами бычьего сывороточного альбумина (Bovine Serum Albumin, BSA) [A2], поверхностного антигена вируса гепатита В (HBsAg) и альфа-фетопротейна (AFP) [A23].

Показано, что изготовленные КНИ-НПТ обеспечивают: 1) стабильность сигнала после установления равновесного состояния при изменении окружающей среды/раствора с аналитом (тестируемыми частицами), 2) время отклика сенсора – 0.2-4 мин. (в зависимости от типа аналита), 3) время установления равновесного состояния - 3-7 мин, 4) фемто-мольный предел обнаружения, 5) отклик сенсора $\Delta I_{\text{ds}}/I_{\text{ds}}$ больше 8% при 6) отношении сигнал/шум - больше 10.

Показано, что используемые в работе пары AFP - анти-AFP, HBsAg - анти-HBsAg обеспечивают селективное обнаружение частиц [A21].

Показана возможность очистки НП элемента от молекул BSA в растворе перекиси водорода с последующей обработкой в HF [A19]. Многократность использования КНИ-НПТ также обеспечивается управляемым выбором рабочей точки КНИ-НПТ (рис. 5).

Разработанный метод изготовления, выбор конструктивно-технологических параметров и режима работы КНИ - НП транзисторов, позволяют получать одни из лучших результатов по пределу обнаружения частиц аналита (рис.6) в режиме реального времени при использовании КНИ-НПТ в качестве сенсорных элементов. Фактически, это первые полученные в России результаты по НП сенсорам с чувствительностью на уровне 10^{-14} - 10^{-15} М к тестовым молекулам белка и ионов хлора.

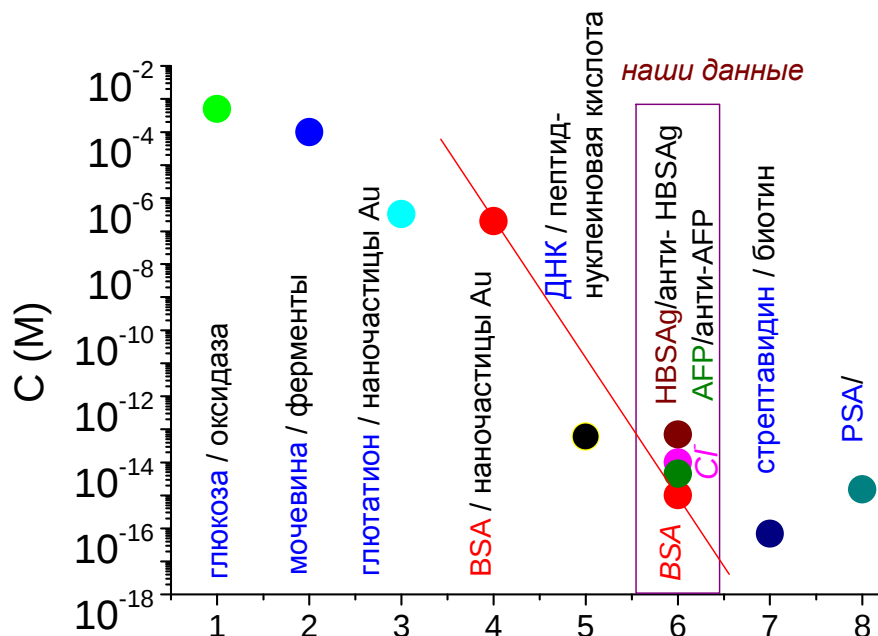


Рис.6. – Экспериментальный предел обнаружения кремниевых нанопроволочных сенсоров к различным аналитическим частицам. По оси X - данные работ: 1 – [35], 2 – [36], 3 [37], 4 – [38], 5 – [39], 6 – [A2, A22, A23], 7 - [40] , 8 - [41]. Подписи на рисунке означают тип частиц, детектируемых / предварительно иммобилизованных на нанопроволоку.

Основные результаты и выводы

1. Установлены закономерности накопления структурных (HF-) дефектов, изменения подвижности носителей заряда в слоях КНИ и эффективного заряда в скрытом диэлектрике от толщины слоя Si. Анализ результатов позволяет заключить, что деградация параметров наноразмерных структур Si/SiO₂ связана с перестройкой примесно-дефектной системы в слоях КНИ в процессе термоокислительных операций и определяется свойствами исходного материала Si. Предложен метод, предотвращающий деградацию структурных и электрических параметров слоев КНИ. Метод основан на диффузионной очистке субмикронных слоев КНИ при создании условий для стока дефектов на внешнюю поверхность слоя Si. Использование данного метода для структур КНИ-Чохральского или переход на Si, полученный методом бестигельной зонной плавки, позволяет обеспечить следующие параметры в 10-400 нм структурах Si/SiO₂: плотность HF-дефектов меньше 10^3 см^{-2} , значение эффективного заряда в скрытом слое SiO₂ – $(3-4) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, значение подвижности электронов – $1000-1500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.
2. Установлены закономерности накопления заряда в слоях SiO₂ от величин стрессовых радиационных и электрических воздействий для исходных и ионно-легированных (бором или

фосфором) структур КНИ. Показано, что зависимости изменения плотности эффективного заряда $\Delta Q_{\text{eff}}/q$ в слое SiO_2 структур КНИ и состояний на границе раздела ΔD_{it} от дозы γ -облучения в интервале $D=(10^5\text{-}10^7)$ рад аппроксимируются логарифмическими зависимостями $k_i \ln D$. Установлены значения коэффициентов k_i для неимплантированных и ионно-имплантированных (бором или фосфором) структур КНИ.

Анализ результатов позволяет заключить, что:

- стабильность не подвергавшихся ионной имплантации структур КНИ к стрессовым воздействиям обусловлена методом их формирования - слой SiO_2 вблизи границы раздела с отсеченным слоем Si (границы бондинга) сохраняет низкую плотность дефектов, характерную для объемного слоя SiO_2 ,
 - лимитирующей стадией в накоплении дефектов в слоях SiO_2 вблизи границы бондинга является генерация дефектов из прекурсоров, в отличие от систем Si/ SiO_2 , полученных термическим окислением Si, где доминирует заполнение уже существующих ловушек в слоях SiO_2 .
3. Установлено, что стабильность наноразмерных структур Si/ SiO_2 с 5-6 нм слоями нитрированного SiO_2 к стрессовым радиационным и электрическим воздействиям обусловлена:
- низкой плотностью ловушек носителей заряда (меньше $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и
 - глубоким энергетическим положением центров, ответственных за стресс-индуцированный ток утечки через слои SiO_2 (0.53 ± 0.04 эВ, 0.73 ± 0.04 эВ, 0.95 ± 0.5 эВ и 2.67 ± 0.4 эВ относительно зоны проводимости SiO_2).
4. Определены типы подготовки поверхности нанослоев КНИ, которые позволяют получить три основные состояния на поверхности Si – инверсии, обеднения и обогащения:
- пассивация слоев КНИ в HF и метаноле или хингидрон/метаноле позволяют получить стабильные (в течение 2-3 часов после обработок) зарядовые состояния обеднения или инверсии, соответственно,
 - формирование термических нитрированных слоев SiO_2 создает состояние обогащения вблизи поверхности n-Si.
5. Разработан низкотемпературный метод формирования нанопроволочных структур на основе слоев КНИ с использованием электронной литографии, газового травления в XeF_2 или плазмохимического травления в смеси $\text{CF}_6:\text{CFCl}_3$ при смещениях, исключаяющих генерацию радиационных нарушений. Показано, что предложенный метод не приводит к деградации свойств наноразмерных структур КНИ (нанослоев Si и SiO_2).

6. Показано, что КНИ-нанопроволочные транзисторы при использовании их в качестве биохимических сенсоров обеспечивают:
- предел обнаружения 10^{-14} - 10^{-15} моль/литр при использовании в качестве определяемых ионов хлора или тестовых молекул белка (бычьего сывороточного альбумина (BSA), поверхностного антигена вируса гепатита В (HBsAg) и альфа-фетопротеина (AFP)),
 - время отклика сенсора: 20 - 200 с (в зависимости от типа определяемых частиц),
 - время установления равновесного состояния - 3-7 мин,
 - отклик сенсора более 8% при отношении сигнал/шум - больше 10
 - стабильность сигнала после установления равновесного состояния при изменении окружающей среды/исследуемого раствора.

Цитируемая литература

1. Veloso A., Hoffmann T., Lauwers A., Yu H., Severi S., Augendre E., Kubicek S., Verheyen P., Collaert N., Absil P., Jurczak M., Biesemans S. Advanced CMOS device technologies for 45nm node and below. // Science and Technology of Advanced Materials, 2007, v.8, p. 214–218.
2. Palacios T. Nanowire electronics comes of age. // Nature, 2012, v. 481, p.153-153.
3. Ferain I., Colinge C. A., Colinge J.-P. Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors. // Nature, 2011, v. 479, p. 310-316.
4. Celler G.K., Cristoloveanu S. Frontiers of silicon-on-insulator. // Appl. Phys. Rev., 2003. v. 93, p. 4955-4978.
5. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В-2-х частях. Часть 1. - М.: Техносфера, 2002 . - 416 с.
6. Park J.-T., Colinge J.-P. Multiple-Gate SOI MOSFETs: Device Design Guideline. // IEEE Trans. Electron. Dev., 2002, v. 49, p. 2222-2229.
7. Road Map “Russian Human Proteome Project”, 2010 // www.ibmc.msc.ru
8. Archakov A., Lisitsa A. Human Proteome Project: Russian Roadmap for Chromosome 18 // <http://www.hupo.org/research/hpp/soc/>
9. Engel Y., Elnathan R., Pevzner A., Davidi G., Flaxer E., Patolsky F. Supersensitive Detection of Explosives by Silicon Nanowire Arrays. // Angew. Chem. Int. Ed. 2010, v. 49, p. 6830 –6835.
10. Lazcka O., Campob F. J. D., Munoz F. X. Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors. // Biosensors and Bioelectronics, 2007, v. 22, p. 1205–1217.
11. Kim J., Junkin M., Kim D.-H., Kwon S., Shin Y.S., Wong P.K., Gale B.K. Applications, techniques, and microfluidic interacting for nanoscale biosensors. //- Microfluid Nanofluid, 2009, v. 7, N2, p. 149-167.
12. Naumova O. V., Popov V. P., Aseev A. L., Ivanov Yu. D., Archakov A. I. Silicon-on insulator nanowire transistors for medical biosensors. // EuroSOI International Conference, Göteborg, Sweden, 19-21 January, 2009, p. 69-70.

13. Mordkovich V. N., Pazhin D. M. Peculiarities of radiation defects formation in Si layers of SOI structures. // NATO ARW Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment. - Kyiv, 2005, p. 60-61.
14. Попов В. А., Антонова И. В., Стась В. Ф., Миронова Л. В. Способ изготовления структур кремний-на-изоляторе // Патент РФ №2164719, 2001, БИ №9.
15. Bruel M. The History, Physics, and Applications of the Smart-Cut Process. // MRS Bulletin, 1998, N12, p. 35-39.
16. Izumi K. History of SIMOX material. // MRS Bulletin, 1998, v.12, p.20-24.
17. Г.Я. Красников, Н.А.Зайцев. Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: Техносфера, 2003.- 384 с.
18. Aga H., Nakano M., Mitani K. Study of HF Defects in Thin, Bonded Silicon-on-Insulator Dependent on Original Wafers. // Jpn. J. Appl. Phys. 1999, v. 38, p. 2694-2698.
19. Park J.-G., Kim S.-G., Lee G.-S., Shim T.H. Nature of Surface and Bulk Defect Induced by Low Dose Oxygen Implantation in Separation by Implanted Oxygen Wafers. // Jpn. J. Appl. Phys. 2001, v. 40, p. 2178-2185
20. Papakonstantinou P., Somasundram K., Cao X., Nevin W.A. Crystal Surface Defects and Oxygen Gettering in Thermally Oxidized Bonded SOI Wafers. // J. Electrochem. Soc., 2001, v. 148, N2, p. G36-G42.
21. Tagaki S., Toriumi A., Iwase M., Tango H. On the Universality of Inversion Layer Mobility in Si MOSFET's: Part I – Effects of Substrate Impurity Concentration. // IEEE Trans.Electron.Dev. 1994, v. 41, N212, p.2357-2362.
22. Chen K., Wann H. C., Dunster J., Ko Pi. K., Hu C., Yoshida M. MOSFET carrier mobility model based on gate oxide thickness, threshold and gate voltages. // Solid-State Electronics, 1996, v. 39, N 10, p.1515-1518.
23. Koga J., Takagi S., Toriumi A. Influences of Buried-Oxide Interface on Inversion-Layer Mobility in Ultra-Thin SOI MOSFETs. // IEEE Trans. Nucl. Electron. Dev., 2002., v. 49, N6, p.1042-1048.
24. Choi J.-H., Park Y.-J., Min H.-S. Electron Mobility Behavior in Extremely Thin SOI MOSFET's. // IEEE Electron Dev. Lett., 1995, v. 16, N11, p. 527-529.
25. L.C. Kimerling. In: Point and Extended Defects in Semiconductors, ed. by G. Benedek, A. Cavallini, and W. Schroter. NATO ASI Series (N.Y., 1988) v. 202.
26. Tajima M, Ogura A., Karasawa T., Mizoguchi A. Defect analysis in Bonded and H⁺ split silicon-on-insulator wafers by photoluminescence spectroscopy and transmission electron microscopy. // Jpn. J. Appl. Phys., 1998, v. 37, p.L1199-1201.
27. Yang B.L., Lai P.T., Wong H. Conduction mechanisms in MOS gate dielectric films. // Microelectronics Reliability, 2004, v.44, p. 709-718.

28. Houngh M.P., Wang Y. H., Chang W. J. Current transport mechanism in trapped oxides: A generalized trap-assisted tunneling model. // J. Appl. Phys., 1999, v. 86, p. 1488-1491.
29. Kern W., Puotinen D.A. Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology. // RCA Review, 1970, v. 31, N2, p. 187-206.
30. Mirji S.A., Halligudi S.B., Mathew N., Ravi V., Jacob N. E., Patil K.R. Adsorption of methanol on Si(100)/SiO₂ and mesoporous SBA-15. // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 2006, v. 287, p. 51–58.
31. M'saad H., Michel J., Lappe J. J., Kimerling L. C. Electronic passivation of silicon surfaces by halogens. // J. of Electronic Materials, 1994, v. 23, N5, p. 487-491.
32. Takato H., Sakata I., Shimokawa R. Quinhydrone/methanol treatment for Measurement of Carrier Lifetime in Silicone Substrates. // Jpn. J. Appl. Phys., 2002, v. 41, p. L870-L872.
33. Chhabra B., Bowden S., Opila R. L., Honsberg C. B. High effective minority carrier lifetime on silicon substrates using quinhydrone-methanol passivation. // Appl. Phys. Lett. 2010, v. 96, 063502 (3).
34. Naumova O.V., Popov V.P., Aseev A.L., Ivanov Yu.D., Archakov A.I. Silicon-on insulator nanowire transistors for medical biosensors. // EuroSOI International Conference, Göteborg, Sweden, 2009, p. 69-70.
35. Wang X., Chen Y., Gibney K. A., Erramilli S., Mohanty P. Silicon-based Nanochannel Glucose Sensor. // Appl. Phys. Lett.: Appl. Biophys. 2008, v.92, p.013903-013905.
36. Chen Y., Wang X., Hong M., Erramilli S., Mohanty P. Surface-modified silicon nano-channel for urea sensing. // Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, v. 133, p. 593-598.
37. Yang K., Wang H., Zou K., Zhang X. Gold nanoparticle modified silicon nanowires as biosensors. // Nanotechnology, 2006, v.17, N276, p. S276-S279.
38. Shao M.-W., Yao H., Zhang M.-L., Wong N.-B., Shan Y.-Y., Lee S.-T. Fabrication and application of long strands of silicon nanowires as sensors for bovine serum albumin detection. // Appl. Phys. Lett., 2005, v. 87, p. 183106(3).
39. Patolsky F., Zheng G., Lieber C. M. Nanowire-based biosensors. // Analytical Chemistry, 2006, v.78, N13, p. 4261-4269.
40. Stern E., Klemic J. F., Routenberg D.A., Wyrembak P.N., Turner-Evans D.B., Hamilton A. D., LaVan D. A., Fahmy T.M., Mark A. Label-free immunodetection with CMOS-compatible semiconducting nanowires. // Nature, 2007, v. 445, p. 519-522.
41. Gao X.P.A., Zheng G., Lieber C.M. Subthreshold Regime has the Optimal Sensitivity for Nanowire FET Biosensors. // NanoLetters, 2010, v. 10, p. 547-552.

Список работ, включенных в диссертацию

- A1. Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П., Настаушев Ю. В., Гаврилова Т. А., Литвин Л. В., Асеев А. Л. КНИ нанотранзисторы: перспективы и проблемы реализации. // ФТП, 2003, т. 37, N10, с. 1253-1259.
- A2. Naumova O. V., Fomin B. I., Nasimov D. A., Dudchenko N. V., Devyatova S. F., Zhanaev E. D., Popov V. P., Latyshev A. V., Aseev A. L., Ivanov Yu. D., Archakov A. I. SOI nanowires as sensors for charge detection. // Sem. Sci. Technol. 2010, v. 25, p. 055004(7).
- A3. Naumova O. V., Vohmina E. V., Gavrilova T. A., Dudchenko N. V., Nikolaev D. V., Spesivtsev E. V., Popov V. P. Properties of silicon nanolayers on insulator. // Materials Science and Engineering B, 2006, v. 135, N3, p. 238-241.
- A4. Попов В. П., Антонова И. В., Французов А. А., Сафронов Л. Н., Феофанов Г. Н., Наумова О. В., Киранов Д. В. Свойства структур и приборов на кремний-на-изоляторе. // ФТП, 2001, т.35, в.9, с.1075-1083.
- A5. Антонова И. В., Стано Й., Николаев Д. В., Наумова О. В., Попов В. П., Скуратов В. А. Состояния на границах и центры с глубокими уровнями в структурах Кремний на изоляторе. // ФТП, 2001, т. 35, в.8, с. 948-953.
- A6. Nastaushev Y.V., Gavrilova T.A., Kachanova M., Nenasheva L., Kolosanov V.A., Naumova O.V., Popov V.P., Aseev A.L. 20-nm Resolution of electron lithography for the nano-devices on ultrathin SOI film. // Materials Science and Engineering C, 2002, v. 19, p. 189-192.
- A7. Настаушев Ю. В. Наумова О. В. Девятова С. Ф. Попов В. П. Способ изготовления наносенсора. // Патент РФ № 2359359, 2009. Приоритет от 15.11.2007, БИ N17.
- A8. Наумова О. В., Фомин Б. И., Сафронов Л. Н., Насимов Д. А., Ильницкий М. А., Дудченко Н. В., Девятова С. Ф., Жанаев Э. Д., Попов В. П., Латышев А. В., Асеев А. Л. Кремниевые нанопроволочные транзисторы для электронных биосенсоров. // Автометрия, 2009, т. 45, N4, с. 6-11.
- A9. Naumova O. V., Antonova I. V., Popov V. P., Nastaushev Y. V., Gavrilova T. A., Kachanova M. M., Litvin L. V., Aseev A. L. FET on Ultrathin SOI (Fabrication and Research) // Proceedings of SPIE, Micro- and Nanoelectronics, 2003, K.A.Valiev, A.A.Orlikovsky (eds), v. 5401, p.323-331.
- A10. Naumova O. V., Antonova I. V., Popov V. P., Nastaushev Yu. V., Gavrilova T. A., Litvin L. V., Aseev A. L. Modification of silicon-on-insulator structures under nano-scale Device fabrication. // Microelectronic Engineering, 2003, v. 69 (Issues 2-4), p.168-172.
- A11. Naumova O. V., Nastaushev Yu. V., Svitashcheva S. N., Sokolov L.V., Zakharov N. D., Werner P., Gavrilova T. A., Dultsev F. N., Aseev A. L. MBE-grown Si whisker structures: morphological, optical and electrical properties. // Nanotechnology, 2008, v. 19, p. 225708 (5).

- A12. Naumova O. V., Antonova I. V., Popov V. P., Sapognikova N. V., Nastaushv Yu. V., Spesivtsev E. V., Aseev A. L. Conductance oscillations near bonded interface in the ultra thin silicon-on-insulator layers at the room temperature. // *Microelectronic Engineering*, 2003, v. 66, p. 457-462.
- A13. Наумова О. В., Ильницкий М. А., Сафронов Л. Н., Попов В. П. КНИ-нанотранзисторы с двумя независимо управляемыми затворами. // *ФТП*, 2007, т.1, с. 104-111.
- A14. Naumova O. V., Frantsuzov A. A., Popov V. P. Gamma radiation tolerance of 0.5 μm SOI MOSFETs. // *Proceedings of SPIE, Micro- and Nanoelectronics K.A.Valiev, A.A.Orlikovsky (eds)*, 2003, v. 5401, p. 332-336.
- A15. Naumova O. V., Frantuzov A. A., Antonova I. V., Popov V. P. Total Dose Behavior of Partially Depleted DeleCut SOI MOSFETs. // In: *Science and Technology of Semiconductor-on-insulator Structures and Devices Operating in a harsh environment*, D.Flandre, A.Nazarov (eds), Kluwer Academic Publisher, Netherlands, NATO Science Series, II Materials, Physics and Chemistry, 2005, v. 185, p. 227-232.
- A16. Naumova O. V., Fomin B. I., Ilitsky M. A., Popov V. P. Charge accumulation in the buried oxide of SOI structures with bonded Si/SiO₂ interface under γ -irradiation: effect of preliminary ion implantation. // *Sem. Sci. Technol.* 2012, v. 27, p. 065014(6).
- A17. Naumova O. V., Frantuzov A. A., Nikolaev D. V., Popov V. P. Charge accumulation on oxides of SOI wafers fabricated by hydrogen slicing. // In: *Silicon-on-Insulator Technology and Devices XII*, PV-2005-03, Editors: G.K.Celler, S.Cristoloveanu, J.G.Fossum, F.Ganiz, K.Izumi, Y.W.Kim, 2005, p. 255-260.
- A18. Naumova O. V., Fomin B. I., Sakharova N. V., Ilitsky M. A., Popov V. P. Impact of implantation on the properties of N₂O-nitrided oxides of p⁺- and n⁺-gate MOS devices. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 2009, v. 267, Issues 8-9, p. 1564-1567.
- A19. Naumova O. V., Fomin B. I., Malyarenko N. F., Popov V. P. Modification and characterization of the surface of SOI nanowire sensors. // *J. NanoRes.*, 2012, v.18-19, p.139-147.
- A20. Настаушев Ю. В., Наумова О. В., Попов В. П. Полевой нанотранзистор. // Патент РФ № RU 2250535, 2005, Приоритет от 14.08.2003. БИ N4.
- A21. Popov V. P., Naumova O. V., Ivanov Yu. D. Universal sensing platform of SOI nanowire transistor matrix for femtomole electronic bio and chemical sensors. // In: *Semiconductor-On-Insulator Materials for NanoElectronics Applications*. Eds. J.-P. Colinge, A.N. Nazarov, F. Balestra and others: Springer, 2010, p.352-363.
- A22. Naumova O. V., Popov V. P., Safronov L. N., Fomin B. I., Nasimov D. A., Latyshev A. V., Aseev A. L., Ivanov Yu. D., Archakov A. I. Ultra-Thin SOI Layer Nanostructuring and Nanowire Transistor Formation for FemtoMole Electronic Biosensors. // *ESC Transactions*, 2009, v. 25, N10, p. 83-87.

- A23. Ivanov Yu. D., Pleshakova T. O., Kozlov A. F., Malsagova K. A., Krohin N. V., Shumyantseva V. V., Shumov I. D., Popov V. P., Naumova O. V., Fomin B. I., Nasimov D. A., Aseev A. L., Archakov A. I. Nanowire biosensor for detection of HBsAg and α -fetoprotein. // Lab on a Chip, 2012, v. 12, p. 5104-5111.