

На правах рукописи

РОГОЖИН АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ЗАТВОРНЫХ СТРУКТУР МОП  
НАНОТРАНЗИСТОРОВ, НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ  
С ВЫСОКИМ  $\epsilon$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАГНЕТРОННОГО  
РАСПЫЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ

Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва-2009

Работа выполнена в Физико-технологическом институте  
Российской Академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

**Васильев Андрей Георгиевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

**Вяткин Анатолий Федорович**

кандидат физико-математических наук, доцент

**Зайцев Александр Александрович**

Ведущая организация:

**ФГУП Научно-исследовательский институт микроэлектронной  
аппаратуры «Прогресс»**

Защита состоится «17» декабря 2009 г. в 15.00 часов на заседании  
диссертационного совета Д.002.204.01 в Физико-технологическом институте  
РАН по адресу: 117218, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Физико-технологического института РАН

Автореферат разослан «17» ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



В.В. Вьюрков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Среди проблем с формированием КМОП ИС, возникающих при миниатюризации МДП транзисторов, одними из самых острых являются проблемы формирования наноразмерных затворных структур с необходимыми электрофизическими характеристиками. При переходе к технологическим нормам 45-55нм, из-за необходимости снижения токов утечки через тонкие слои подзатворного диэлектрика, оксинитрид кремния в затворных структурах был заменен материалом на основе гафния. В качестве основного метода формирования слоев подзатворного диэлектрика, как правило, используется послойное осаждение из газовой фазы. Этот метод обладает рядом недостатков. Известно, что при формировании диэлектрических слоев данным методом значения плотности зарядовых состояний на границе диэлектрик/полупроводник получаются не ниже  $10^{11}$ - $10^{12}$ см<sup>-2</sup> [1, 2], а диэлектрическая проницаемость не превышает 14-18 [3]. Также при формировании слоев диэлектриков с высоким  $\epsilon$  необходим промежуточный слой SiO<sub>x</sub>. При этом метод не обеспечивает возможность контроля роста этого промежуточного слоя, толщина которого может превышать 3-7нм [4]. Поэтому необходимы исследования возможностей перехода либо к другим методам формирования слоев подзатворного диэлектрика, либо к другим диэлектрическим материалам.

Известно, что физические методы осаждения, в особенности электронно-лучевое испарение, могут быть использованы для получения высококачественных диэлектрических пленок [5, 6]. В связи с этим, представляет интерес разработка технологии формирования затворных структур с помощью физических методов осаждения.

Другой подход к решению проблемы низкой диэлектрической проницаемости и высокой плотности дефектов – переход к другому

материалу с высокой диэлектрической проницаемостью, который может быть использован в сочетании с тонкими промежуточными слоями  $\text{SiO}_2$ . Особый интерес представляет формирование диэлектрических стеков на основе материалов с высоким  $\epsilon$  и диоксида кремния с помощью процессов самоорганизации, например, фазового расслоения. В этом случае возможно формирование затворной структуры в едином технологическом цикле, одновременно с формированием контактных систем к областям стока-истока наноразмерных МОП транзисторов [7].

Известно, что большинство материалов с высоким  $\epsilon$  не может выполнять функцию барьерного слоя для атомов легирующих примесей, в первую очередь, бора и фосфора. Поэтому использование поликремневых электродов в сочетании с такими материалами затруднительно. Кроме того, высокое сопротивление сильнолегированных слоев поликремния ( $>100\text{мкОм}\cdot\text{см}$ ) препятствует снижению временных задержек в КМОП схемах. В связи с этим, необходим переход к металлическим электродам затвора. При этом материал для электрода должен обладать низким сопротивлением, быть термостабильным на диэлектрике. Значение работы выхода этого материала должно находиться либо вблизи середины, либо у края запрещенной зоны кремния. В последнем случае необходима пара материалов для р- и n- канальных транзисторов. В компании Intel при переходе к технологии 45нм в качестве материала электрода затвора использовался нитрид титана. Известно, что этот материал обладает достаточно высоким сопротивлением 30-70мкОм·см. Применение силицидов, например, дисилицида кобальта, позволило бы снизить это сопротивление.

С другой стороны, уменьшение геометрических размеров затворной структуры сопряжено с применением прецизионной литографии, а именно иммерсионной фотолитографии с длиной волны 193нм или фотолитографии

крайнего ультрафиолетового диапазона (EUV). Широко исследуется возможность использования новых структур МОП транзистора, например, транзисторов на КНИ подложках, многозатворных, многоканальных и вертикально-ориентированных транзисторов. Тем не менее, большинство разработок направлено на улучшение электрофизических характеристик приборов, а подход к формированию структур остается прежним. Интерес представляет разработка структуры МОП нанотранзистора, реализация которого возможна с помощью широко распространенной фотолитографии с длиной волны менее 300нм.

**Целью настоящей работы** является:

- разработка технологии формирования слоев подзатворных диэлектриков на основе диоксидов гафния и циркония методом электронно-лучевого испарения;
- разработка технологии формирования металлического электрода затвора методом фазового расслоения;
- разработка технологии формирования затворной структуры на основе подзатворного диэлектрика с высоким  $\epsilon$  и металлического затвора в едином технологическом цикле;
- разработка структуры МОП транзистора с длиной канала менее 20нм, обладающего высокими электрофизическими характеристиками, которая может быть сформирована с помощью фотолитографии с длиной волны менее 300нм.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ существующих исследований в области использования новых перспективных материалов для МОП транзисторов, а также разработки новых структур МОП транзисторов.

2. Исследовать особенности формирования затворных структур методом электронно-лучевого испарения, оценить основные электрофизические параметры таких затворных структур, параметры диэлектрических слоев и границ раздела.

3. Сформировать методом электронно-лучевого испарения слой подзатворного диэлектрика с плотностью зарядовых состояний на границе раздела с Si не хуже  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и значением относительной диэлектрической проницаемости  $k > 20$ .

4. Построить модель формирования затворной структуры  $\text{CoSi}_2 \cdot \text{TiSi}_2 / \text{TiO}_2 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  при термообработке системы  $\text{Co/Ti}/\dots/\text{Co/Ti/SiO}_2/\text{Si}$ .

5. Исследовать процессы фазообразования в четырехкомпонентной системе  $\text{Co/Ti}/\dots/\text{Co/Ti/SiO}_2/\text{Si}$  в процессе быстрого отжига и определить основные особенности перераспределения компонентов и химических реакций в такой системе.

6. Разработать технологию формирования затворных структур диэлектриком с высоким  $\epsilon$  и металлическим электродом в едином цикле.

7. Разработать структуру МОП транзистора, отвечающую требованиям технологии изготовления МОП транзисторов с длиной канала менее 20 нм.

8. Построить модель для расчета предложенного прибора численными методами и рассчитать динамические характеристики транзистора.

**Научная новизна.**

1. Экспериментально определены условия формирования слоев подзатворных диэлектриков методом электронно-лучевого испарения, которые обеспечивает низкие значения плотности поверхностных состояний ( $4 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) на границах  $\text{ZrO}_2/\text{Si}$  и  $\text{HfO}_2/\text{Si}$ .

2. Разработана технология формирования металлических электродов для затворных структур методом фазового расслоения в четырехкомпонентной системе Ti-Co-Si-O.

3. Разработана технология формирования затворных структур  $\text{CoSi}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$  методом твердофазной диффузии, при этом диэлектрический стек  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и металлический электрод затвора формируются в едином технологическом цикле.

4. Разработана структура вертикального транзистора с управляемой глубиной переходов с длиной канала менее 20нм и технология его формирования с помощью фотолитографии с длиной волны менее 300нм.

5. Рассчитаны электрофизические характеристики вертикального транзистора с управляемой глубиной переходов, получены основные параметры (напряжение насыщения 400мВ, ток утечки  $I_{SD}=0,35\text{мкА/мкм}$ ), включая значения предельной частоты переключения прибора ( $f=5\text{ТГц}$ ).

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке затворных структур с металлическими электродами и материалами с высокой диэлектрической проницаемостью для МДП транзисторов с длиной канала менее 20нм. Продемонстрирована возможность формирования ультратонких слоев материалов с высокой диэлектрической проницаемостью с низкими значениями плотности зарядовых состояний на границе раздела с Si. Разработана технология, позволяющая существенно упростить процесс формирования затворных

структур современных транзисторов. Предложена многозатворная структура МОП транзистора с длиной канала менее 20нм, которая может быть сформирована с помощью фотолитографии с длиной волны менее 300нм.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. При электронно-лучевом испарении сверхтонких слоев (толщиной менее 2нм) диоксидов циркония ( $k=18-23$ ) и гафния ( $k=19-25$ ) в высоком вакууме на поверхности атомарно чистой или окисленной кремневой подложки можно формировать границы раздела диэлектрик/Si с низкой плотностью поверхностных состояний ( $4 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

2. В процессе быстрого температурного отжига в четырехкомпонентной системе Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si происходит фазовое расслоение с образованием TiO<sub>2</sub> и смеси CoSi<sub>2</sub>·TiSi<sub>2</sub>. В результате может быть сформирована затворная структура на основе высокопроводящих силицидов кобальта и титана и диэлектрического стека TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, обладающего высокой эффективной диэлектрической проницаемостью ( $k=25-30$ ).

3. Образование в системе Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si в процессе отжиге слоя TiO<sub>2</sub> на границе Ti/SiO<sub>2</sub> препятствует диффузии атомов кислорода в пленку Ti-Co, не позволяя толщине диэлектрического слоя увеличиваться, что позволяет точно контролировать емкость полученных МОП структур.

4. Применение многозатворной структуры, в которой дополнительные затворы контролируют динамические области стока и истока, и профиля распределения примесей с сильно легированными дельта слоями в канале позволяет в значительной степени подавить проявление короткоканальных эффектов в вертикальном МОП транзисторе, который



может быть сформирован с помощью фотолитографии с длиной волны менее 300нм.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 54-ой научно-технической конференции Московского института радиотехники, электроники и автоматики в 2005 г., Международной конференции «Микро- и нанoeлектроника-2005» (ICMNE-2005) в Звенигороде в 2005г., 49-ой научной конференции МФТИ (Всероссийская) в 2006 г. Международной конференции «Микро- и нанoeлектроника-2007» (ICMNE-2007) в Звенигороде в 2007г., Международной конференции «Микро- и нанoeлектроника-2009» (ICMNE-2009) в Звенигороде в 2009г.

**Публикации.** Результаты проведенных научных исследований представлены в 8 публикациях, включающих публикации в ведущих отечественных научных журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 130 страниц машинописного текста, включая 58 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 112 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, охарактеризованы научная новизна, основные защищаемые положения, практическая ценность работы, изложено содержание по главам.

**В первой главе** проведен анализ материалов для современных МОП транзисторов и новых вертикально- и горизонтально ориентированных транзисторных структур.

Технология изготовления интегральных схем развивается по пути увеличения частоты работы приборов и плотности их размещения на кристалле и, соответственно, уменьшения их характерных размеров.

Из-за высоких значений туннельного тока через диэлектрические слои толщиной менее 1-2нм необходимо применение материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Наиболее важными критериями отбора диэлектрических материалов являются высокое значение диэлектрической проницаемости ( $>15$ ), термостабильность в контакте с кремнием и устойчивость к нагреву до  $1000^{\circ}\text{C}$  в течение 5 сек., высокий потенциальный барьер для электронов и низкая плотность активных дефектов в объеме и на границах диэлектрика. Всем этим требованиям удовлетворяют диоксиды циркония и гафния, а также оксиды лантаноидов.

Одними из наиболее важных параметров диэлектрических слоев для затворных структур являются плотность зарядовых состояний на границе с кремнием и диэлектрическая проницаемость, так как они оказывают существенное влияние на электрофизические характеристики транзисторов. Исследования в этой области говорят о том, что при формировании слоев материалов с высоким  $\epsilon$  послойным осаждением из газовой фазы сложно достичь значения плотности зарядовых состояний ниже  $10^{11}$ - $10^{12}\text{см}^{-2}$ , а диэлектрическая проницаемость получается существенно ниже объемных значений. Поэтому необходима разработка технологии, которая позволит улучшить значения этих параметров.

Длина канала МОП транзистора на данный момент достигла 27нм и продолжает уменьшаться. В связи с этим возникает проблема, связанная с необходимостью применения прецизионной литографии: иммерсионной фотолитографии с длиной волны 193нм, фотолитографии крайнего ультрафиолетового диапазона (EUV), рентгеновской, ионно- или электронно-лучевой литографии. Структуры транзисторов с горизонтальным расположением канала, в том числе транзисторы на КНИ подложках, двухзатворные структуры, транзисторы на основе тонких кремневых балок, многозатворные транзисторы, демонстрируют высокие электрофизические характеристики, но технология их формирования, вне зависимости от особенностей структур, требует использования прецизионной литографии. С другой стороны, короткоканальные эффекты в приборах с вертикальным расположением канала существенно ухудшают электрофизические характеристики.

**Во второй главе** рассматриваются методические вопросы формирования тонких пленок методами электронно-лучевого соиспарения в высоком вакууме и реактивного магнетронного распыления, а также исследования структур методами CV- и IV-метрии, резерфордского обратного рассеяния (RQP), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и времяпролетной вторичной ионной масс-спектрометрией (ВИМС).

Экспериментальные структуры  $Me/ZrO_2/Si$  и  $Me/HfO_2/Si$  формировались методом электронно-лучевого испарения при комнатной температуре или на нагретые подложки в установке UMS-500 P (Balzers). В качестве тестовых подложек использовались пластины p-Si (100) диаметром 100мм. Давление в камере не превышало  $2 \cdot 10^{-8}$ Торр. Скорость осаждения поддерживалась постоянной и находилась в диапазоне от 0,2 до 1,5нм/с.

Толщины диэлектрических пленок, измеренные с помощью кварцевых микровесов, составляли от 3 до 20нм, верхнего металлического электрода – приблизительно 100нм.

Формирование образцов Si/Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si для исследования явления фазового расслоения в такой четырехкомпонентной системе осуществлялось методами термического окисления и реактивного магнетронного распыления. На поверхности Si (100) подложек диаметром 75мм с помощью отжигов при температуре 800-1200°C в атмосфере кислорода формировались слои SiO<sub>2</sub> толщиной ~10нм. Вслед за этим на поверхности слоя оксида кремния методом реактивного магнетронного распыления при комнатной температуре формировалась многослойная структура Co/Ti и слой Si. Давление в камере не превышало 1·10<sup>-6</sup>Торр. Распыление титана, кобальта и кремния осуществлялось из трех независимых мишеней. Титан распылялся на магнетроне постоянного тока, кобальт и кремний – на ВЧ-магнетронах.

Исследование образцов Me/ZrO<sub>2</sub>/Si и Me/HfO<sub>2</sub>/Si проводилось методами CV- и IV-метрии, ПЭМ и POP. Для исследования вольтфарадных характеристик МДП структур, сформированных на высокоомных подложках, была построена расчетная модель. Исследование образцов Si/Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si проводилось после быстрых высокотемпературных отжигов методом времяпролетной масс-спектрометрии.

**В третьей главе** представлены результаты исследования процесса формирования пленок диоксидов циркония и гафния на подложках Si(100) методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме.

Структуры Mo/ZrO<sub>2</sub> и W/ZrO<sub>2</sub> характеризуются сходными значениями работ выхода, близкими к середине запрещенной зоны кремния, и

особенностями границ диэлектрик/полупроводник. Анализ вольтфарадных характеристик показывает, что разница между электрофизическими свойствами затворов с электродом из молибдена (работа выхода 4,37эВ) и вольфрама (работа выхода 4,5эВ) незначительна и не должна оказывать существенное влияние на работу приборов на основе таких затворных структур.

Рассчитанные на основе вольтфарадных характеристик структур  $\text{Me}/\text{ZrO}_2/\text{Si}$  и  $\text{Me}/\text{HfO}_2/\text{Si}$  с разными толщинами диэлектрических слоев значения плотности зарядовых состояний на границе  $\text{ZrO}_2/\text{Si}$  и  $\text{HfO}_2/\text{Si}$  составляют  $3,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $9,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , соответственно. Исследование структур методом резерфордовского обратного рассеяния (рис. 1), а также анализ вольтфарадных характеристик, полученных для образцов, сформированных на подложках отожженных при разных температурах (рис.2), показали, что на границе диэлектрика с полупроводником образуется тонкий слой  $\text{SiO}_x$ .

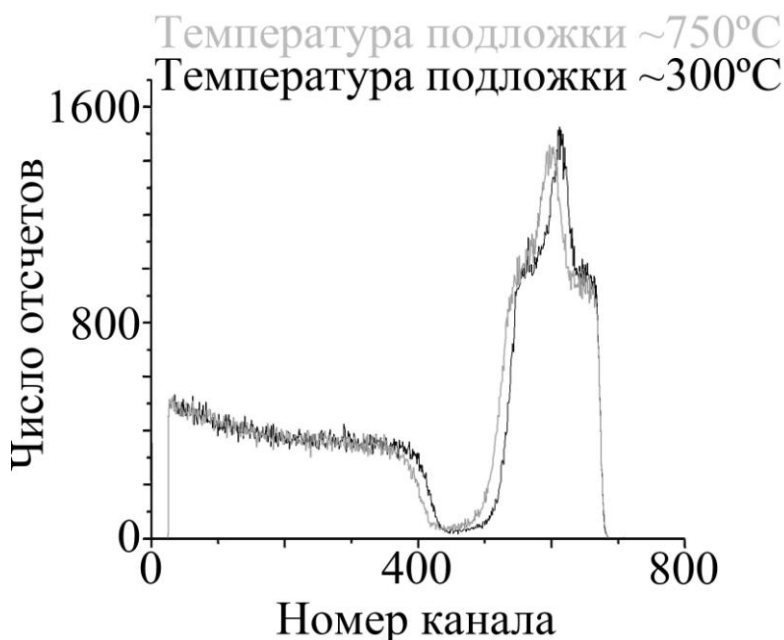


Рис. 1. Спектр РОР для структур  $\text{Mo}/\text{HfO}_2/\text{Si}$ , сформированных на подложках отожженных при разных температурах.

Установлено, что отжиг подложки при температуре 750°C позволяет существенно сократить толщину промежуточного слоя.

С другой стороны, полученные значения эффективной диэлектрической проницаемости стеков  $ZrO_2/SiO_x$  и  $HfO_2/SiO_x$ , составляющие 18-21 ( $1,6 \cdot 10^8 - 1,9 \cdot 10^8 \text{ Ф/см}$ ), говорят о том, что при электронно-лучевом испарении формируются тонкие пленки диоксидов циркония и гафния с диэлектрической проницаемостью близкой к объемным значениям. Анализ вольтамперных характеристик (рис.3), говорит о том, что при электронно-лучевом испарении основным механизмом утечки через диэлектрические пленки является прямое туннелирование. Значения токов утечки через пленки  $ZrO_2$  и  $HfO_2$  толщиной 3 и 5 нм, соответственно, при напряжении на затворе 1В составляют  $9 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$ .

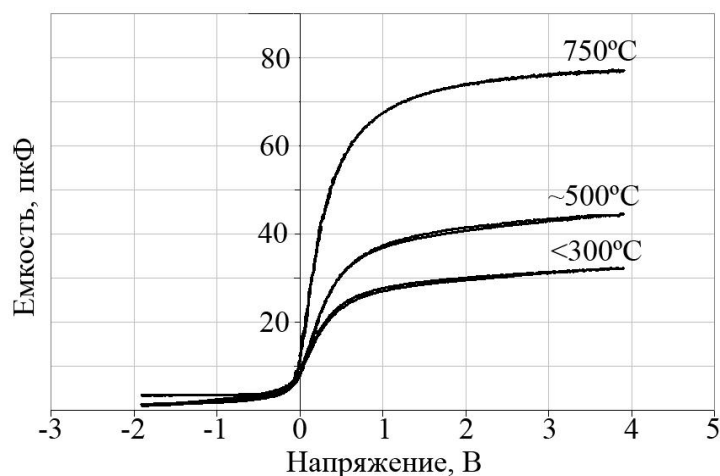


Рис. 2 Вольтфарадные характеристики МОП структур с толщиной диэлектрического слоя 16 нм при различных температурах отжига подложки.

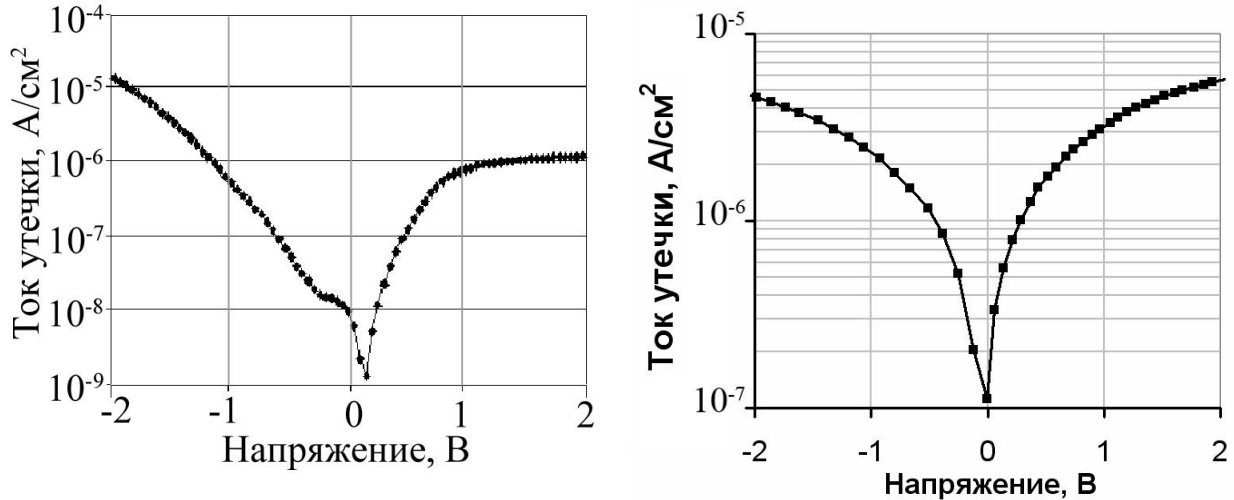


Рис. 3 Вольтамперные характеристики структур Mo/ZrO<sub>2</sub>(3нм)/Si (слева) и Mo/HfO<sub>2</sub>(5нм)/Si (справа).

**В четвертой главе** рассмотрены процессы фазообразования в системе Si/Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si при быстрых термических отжигах. Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования поведения системы Co/Ti/.../Co/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si во время отжигов при температурах 750-900°C в течение 1-5с.

Моделирование проводилось на основе уравнения диффузии, в предположении, что коэффициенты диффузии зависят от времени. Предполагалось, что температурная зависимость коэффициентов диффузии описывается уравнением Аррениуса. Начальные значения параметров в уравнении Аррениуса были взяты из результатов работ, посвященных исследованию диффузии в этих материалах. Для описания диффузии в оксидах использовалось соотношение Стокса-Эйнштейна. Предполагалось, что температурная зависимость вязкости описывается эмпирическим уравнением Вёгеля-Фулчера-Тамманна.

Направление и приоритет химических реакций, учитывавшихся при моделировании, определялись в соответствии с энергиями Гиббса при соответствующих температурах. Для учета ионизации молекул, предполагалось, что распределение энергий молекул описывается функцией Больцмана, а порогом ионизации служит также энергия Гиббса.

Результаты моделирования (рис.4) свидетельствуют о том, что в системе  $\text{Co/Ti}/\dots/\text{Co/Ti/SiO}_2/\text{Si}$  происходит фазовое расслоение с образование диоксида титана и силицидов титана и кобальта за счет диффузии титана в слой  $\text{SiO}_2$  и кремния, образовавшегося при распаде  $\text{SiO}_2$ , к поверхности. Согласно результатам моделирования, в процессе отжига при температуре  $750^\circ\text{C}$  в течение 1с, образуется слой  $\text{TiO}_2$ , толщиной несколько ангстрем.

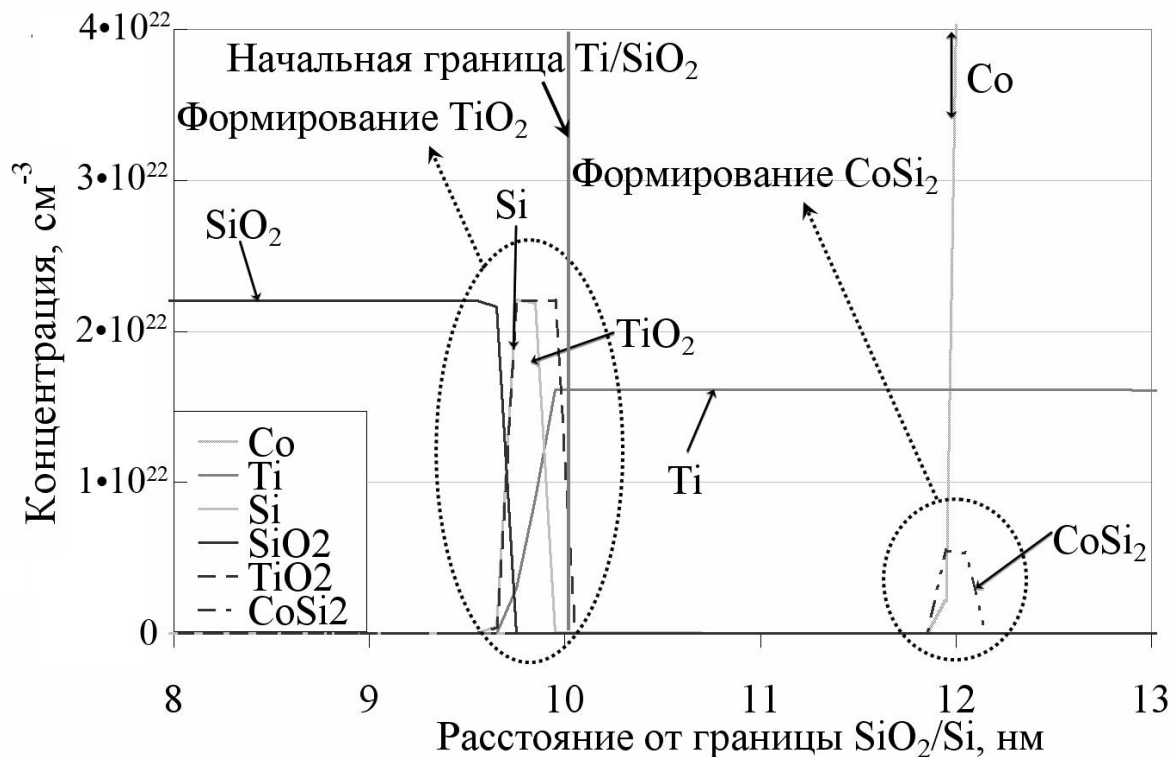


Рис. 4 Рассчитанные концентрации компонентов после отжига при  $750^\circ\text{C}$  в течение 1с.



Отсутствие диффузии кислорода к поверхности говорит о том, что образование  $TiO_2$  препятствует перераспределению атомов O. Результаты моделирования показывают, что для завершения процесса силицидообразования на поверхности оксида необходим дополнительный источник кремния. Также в этой главе представлены экспериментальные результаты, которые подтверждают основные выводы, сделанные на основе моделирования. Диффузия титана (рис.5, слева), согласно этим результатам, происходит на глубину порядка 4нм. Диффузии кислорода на поверхность в такой четырехкомпонентной системе не происходит (рис.5, справа). Дополнительный источник кремния – слой Si на поверхности, ускорил процесс силицидообразования.

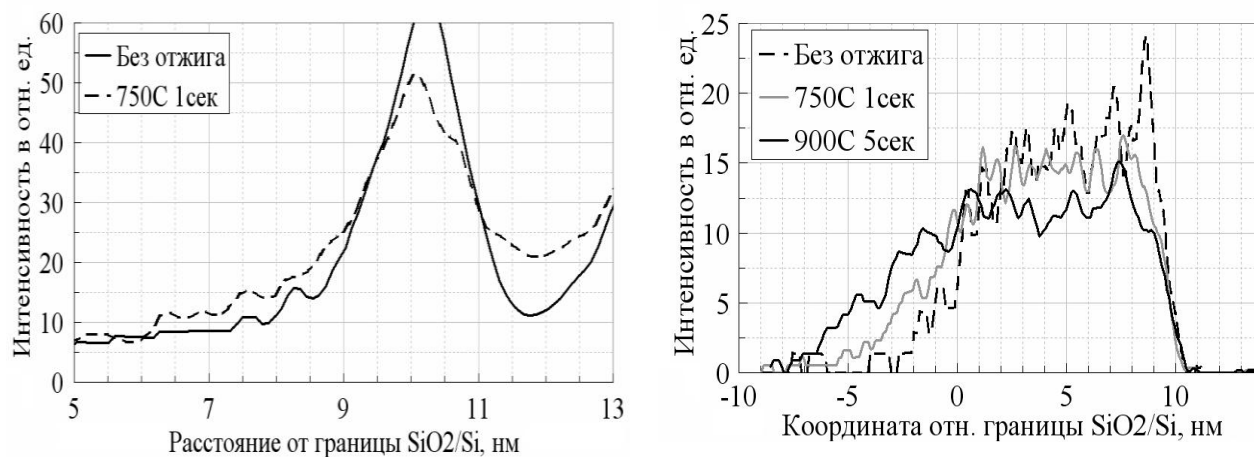


Рис.5 Зависимости интенсивности ВИМС для атомов титана (слева) и кислорода (справа) до и после отжигов.

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе быстрого температурного отжига в четырехкомпонентной системе  $Co/Ti/.../Co/Ti/SiO_2/Si$  происходит фазовое расслоение с образованием слоев  $TiO_2$  и смеси  $CoSi_2 \cdot TiSi_2$ . В результате может быть сформирована затворная

структура на основе диоксида титана, обладающего высокой диэлектрической проницаемостью ( $k=50-80$ ), и силицидов кобальта и титана.

В то же самое время, образование в системе  $\text{Co/Ti}/\dots/\text{Co/Ti/SiO}_2/\text{Si}$  в процессе отжига слоя  $\text{TiO}_2$  на границе  $\text{Ti/SiO}_2$  приводит к тому, что диффузии атомов кислорода в пленку  $\text{Ti-Co}$  не происходит. В результате толщина диэлектрического слоя не увеличивается. Поэтому технология формирования затворных структур  $\text{CoSi}_2\cdot\text{TiSi}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ , основанная на фазовом расслоении во время быстрого высокотемпературного отжига, позволяет точно контролировать толщину слоя подзатворного диэлектрика, то есть емкость полученных МОП структур.

**В пятой главе** предложена структура вертикального транзистора с управляемой глубиной переходов (рис.1).

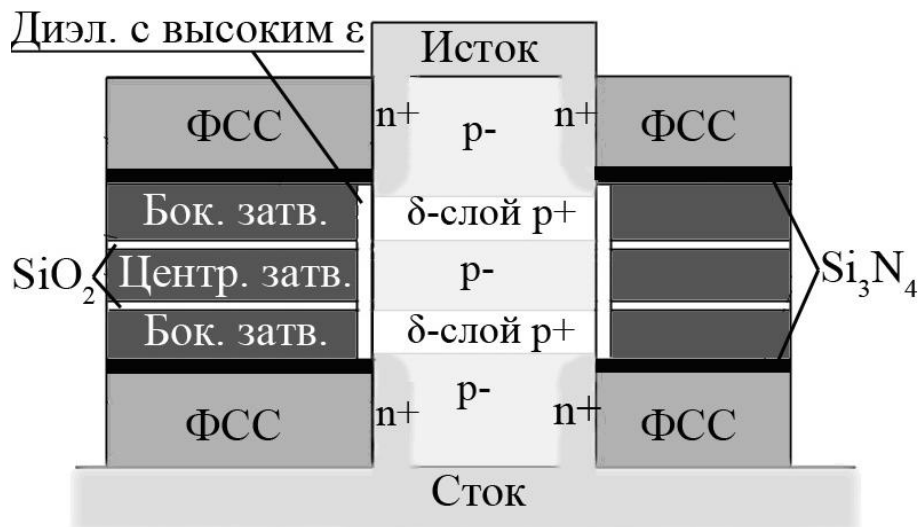


Рис. 6 Структура вертикального транзистора с управляемой глубиной переходов.

Вертикальное расположение позволяет формировать транзистор с помощью фотолитографии с длиной волны менее 300нм. Подавая напряжение на боковые затворы, можно формировать области с высокой

концентрацией основных носителей, которые играют роль динамических стока и истока. Если концентрация легирующей примеси в дельта-слоях в канале высокая, то эти области – достаточно узкие, и такой подход позволяет в значительной степени подавить короткоканальные эффекты.

Предложены две возможные технологии формирования: с проведением процесса твердофазной диффузии на ранней стадии формирования прибора или на последней стадии. Преимуществом первой технологии является самосовмещение элементов транзисторов относительно различных областей легирования канала, второй – то, что слой подзатворного диэлектрика не подвергается высокотемпературным отжигам. Обе технологии предполагают использование фотолитографии с длиной волны 248нм.

Моделирование работы предложенного прибора проводилось в специализированном программном пакете ISE TCAD (модули DESSIS и SPARTA). Использовался самосогласованный метод Монте-Карло с начальными распределениями плотности носителей и рассчитанными с помощью дрейфово-диффузионной модели. Предполагалось, что частота рассеяния носителей задается через обратное время релаксации. Модели и параметры, использовавшиеся в процессе моделирования, а также обоснование их выбора приводится в той же главе работы.

Отличие в значениях тока стока в открытом и закрытом состояниях (рис.3, слева) составляет приблизительно три порядка, что подтверждает эффективность примененного профиля легирования и динамических областей стока и истока. Полученные значения тока насыщения при напряжении 1В на затворе составили 0,8мА/мкм, напряжения насыщения – 0,4В. Значения тока утечки из истока в сток  $I_{SD}$  составили 0,3мкА/мкм. Исследование переходных характеристик (рис.3, справа) показало, что время

установления режима при переключении напряжения на центральном затворе составляет приблизительно 0,2 пкс. Это соответствует частоте переключения транзистора 5 ТГц.

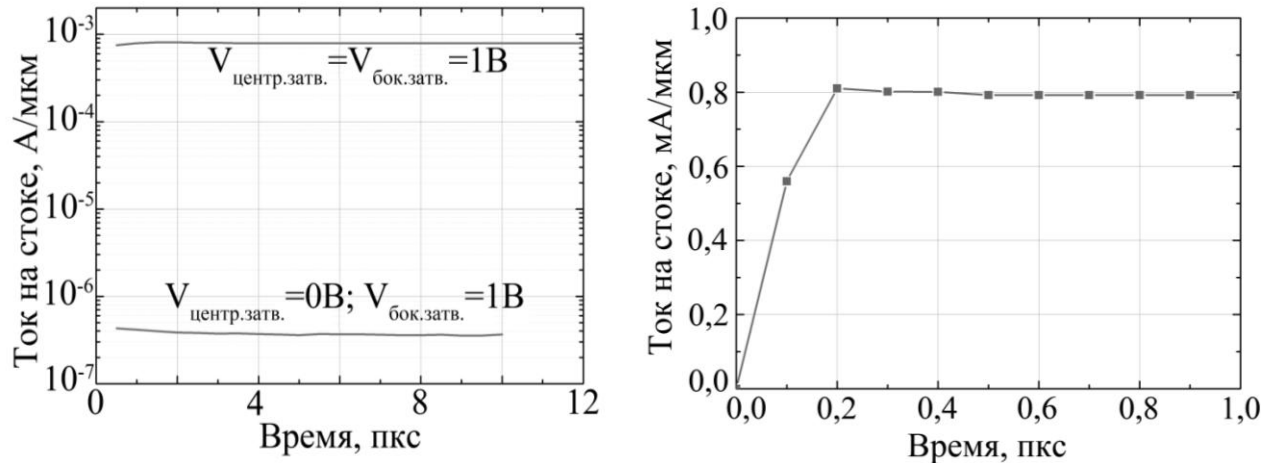


Рис.7 Зависимости тока в открытом и закрытом состояниях транзистора от времени.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследованы сверхтонкие слои диоксидов циркония и гафния, сформированные методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме ( $2 \cdot 10^{-8}$  Торр). Показано, что такой метод формирования позволяет получить значения зарядовых состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник  $3,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $9,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  для  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{HfO}_2$ , соответственно. При осаждении пленок диэлектриков с высоким  $\epsilon$  методом электронно-лучевого испарения толщина промежуточного слоя  $\text{SiO}_2$  не увеличивается, а сами диэлектрические пленки, в отличие от сформированных послойным осаждением из газовой фазы, получаются плотными с диэлектрической проницаемостью в диапазоне 20-25 ( $1,8 \cdot 10^8$ -

$2,3 \cdot 10^8 \text{ Ф/см}$ ). При этом токи утечки через выращенные диэлектрические слои и стеки при напряжении 1В составляют  $10^{-5}$ - $10^{-6} \text{ А/см}^2$ .

2. Быстрый высокотемпературный отжиг (при 750-900°C в течение 1-5с) четырехкомпонентной системы  $\text{Si/Co/Ti/.../Co/Ti/SiO}_2/\text{Si}$  приводит к фазовому расслоению. При этом образуются слои смеси  $\text{CoSi}_2 \cdot \text{TiSi}_2$  и  $\text{TiO}_2$ . При температуре отжига менее 800°C образование силицида титана не происходит. При более высоких температурах скорость диффузии атомов титана в верхний слой кремния резко возрастает. При этом происходит образование  $\text{TiSi}_2$ . Полученная в процессе отжига структура с силицидным электродом  $\text{CoSi}_2 \cdot \text{TiSi}_2$  и диэлектрическим стеклом  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  ( $k=40$ -50) может быть использована в качестве затвора МОП транзистора.

3. Показано, что образование слоя диоксида титана на границе  $\text{Ti/SiO}_2$  препятствует диффузии атомов кислорода из пленки диоксида кремния в металлические пленки. Атомы титана, диффундирующие из металлической пленки, связывают ионы кислорода, благодаря исключительно низкой энергии образования молекулы  $\text{TiO}_2$  ( $\Delta G_{обр} = -929,12 \text{ кДж/моль}$ ). Это явление позволяет точно контролировать емкость затворных структур, полученных в процессе отжига.

4. Показано, что применение в затворной структуре вертикального МОП транзистора дополнительных боковых электродов, контролирующих толщину динамических областей стока и истока, а также концентрацию носителей в них, и специального профиля легирования в виде стека из двух сильнолегированных ( $10^{18}$ - $10^{19} \text{ см}^{-2}$ ) дельта-слоев толщиной 7-10нм и почти нелегированного ( $10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) слоя между ними позволяет в значительной степени подавить проявление короткоканальных эффектов.

5. Установлено, что, благодаря низкой степени легирования в области центрального затвора прибор может работать в баллистическом режиме, в результате чего частота его переключения может достигать 5ТГц. За счет вертикального расположения канала, предложенный в работе прибор, может быть сформирован с помощью фотолитографии оптического или ультрафиолетового диапазонов.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) I.A.Horin, A.D.Krivospitsky, A.A.Orlikovsky, A.E.Rogozhin, A.G.Vasiliev “Silicide/high-k dielectric structures for nanotransistor gates”, Proceedings of SPIE V.6260, Micro- and Nanoelectronics, p.126-133, 2005.
- 2) I.A.Horin, A.A.Orlikovsky, A.E.Rogozhin, A.G.Vasiliev “Simulation of the vertical MOSFET with electrically variable source-drain junctions”, Proceedings of SPIE V.6260, Micro- and Nanoelectronics, p.542-549, 2005.
- 3) Васильев А.Г., Рогожин А.Е., Хорин И.А. «Использование силицидов и high-k подзатворных диэлектриков в затворных структурах вертикальных транзисторов с управляемой глубиной переходов», 49-ая научная конференция МФТИ, Тезисы докладов, Москва, МФТИ(ГУ), 2006.
- 4) D. G. Drozdov, I. A. Khorin, V. B. Kopylov, A.D.Krivospitsky, A.A.Orlikovsky, A.E.Rogozhin, A.G.Vasiliev “Formation of thin ZrO<sub>2</sub> layers for nanotransistor gate structures by electron beam evaporation”, Proceedings of SPIE V.7025, Micro- and Nanoelectronics, 2008.
- 5) A. E. Rogozhin, I. A. Khorin, D. G. Drozdov, A.G.Vasiliev “Modeling of vertical transistor with electrically variable junctions in ISE TCAD”, Proceedings of SPIE V.7025, Micro- and Nanoelectronics, 2008.

- 6) А. Г. Васильев, Р. А. Захаров, А. А. Орликовский, А. Е. Рогожин, М. С. Сонин, И. А. Хорин «Электрофизические характеристики затворных структур с  $\text{HfO}_2$ , сформированных методом электронно-лучевого испарения», Микроэлектроника, №5, 2009.
- 7) A.E. Rogozhin, I.A. Khorin, V.V. Naumov, A.A. Orlikovsky, V.V. Ovcharov, V.I. Rudakov, A.G. Vasiliev “CoSi<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si gate structure formation”, ICMNE-2009, Moscow, October 5th-9th, 2009, O1-23.
- 8) Denisenko Yu.I., Gusev V.N., Khorin A.I., Orlikovsky A.A., Rogozhin A.E., Rudakov V.I., Vasiliev A.G. “Hf-based barrier layers for Cu-metallization”, ICMNE-2009, Moscow, October 5th-9th, 2009, P2-20.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. Kim, S. Kim, H. Jeon, M. Cho, K. Chung, C. Bae. Characteristics of  $\text{HfO}_2$  thin films grown by plasma atomic layer deposition// Appl. Phys. Lett. V.87 (2005) P.053108.
- [2] R. Sreenivasan, P. McIntyre, H. Kim, K. Saraswat. Effect of impurities on the fixed charge of nanoscale  $\text{HfO}_2$  films grown by atomic layer deposition// Appl. Phys. Lett. V.89 (2006) P.112903.
- [3] J. Conley, Jr. Ono, Y. Ono, R. Solanki, G. Stecker, W. Zhuang. Electrical properties of  $\text{HfO}_2$  deposited via atomic layer deposition using  $\text{Hf}(\text{NO}_3)_4$  and  $\text{H}_2\text{O}$ // Appl. Phys. Lett. V.82 (2003) №.20 P.3508-3510.
- [4] D. McNeill, S. Bhattacharya, H. Wadsworth, F. Ruddell, S. Mitchell, B. Armstrong, H. Gamble. Atomic layer deposition of hafnium oxide on silicon and germanium substrates// J. Mater. Sci. V.19 (2008) P.119-123.
- [5] K. Cherkaoui, S. Monaghan, M. Negara, M. Modreanu, P. Hurley, D. O'Connell, S. McDonnell, G. Hughes, S. Wright, R. C. Barklie, P. Bailey, T.

Noakes. Electrical, structural, and chemical properties of HfO<sub>2</sub> films formed by electron beam evaporation// J. Appl. Phys. V.104 (2008), P.064113.

- [6] J. Robertson. High-dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors// Rep. Prog. Phys. V.69 (2006), P.327-396
- [7] А.Г. Васильев, Р.А. Захаров, В.В. Родатис, А.В. Лобинцов, А.А. Орликовский. Фазообразование в многокомпонентных системах Ti-Co-Si-N и Ti-Co-N при поверхностно-диффузионном механизме формирования тонких пленок на Si и SiO<sub>2</sub>// Микроэлектроника Т.30 (2001), № 5, С.345-352.