

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 621.319.44-034.294

ПЕТЛИЦКАЯ ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

**МОП - КОНДЕНСАТОРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ  
НА ОСНОВЕ ПЕНТАОКСИДА ТАНТАЛА**

Специальность **05.27.01** - твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро - и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2003

Работа выполнена в Учреждении образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" и УП "Белмикросистемы" НПО "Интеграл".

Научные руководители:

д.т.н., профессор

*Баранов Валентин Владимирович*

(БГУИР, кафедра электронной техники и технологий)

к.ф.-м.н.

*Пономарь Владимир Николаевич*

(УП "Белмикросистемы"  
НПО "Интеграл")

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор

*Квасов Николай Трофимович*

(БГУИР, кафедра общей физики)

к.т.н., с.н.с.

*Мальшиев Сергей Александрович*

(Институт Электроники НАН Беларуси,  
лаборатория полупроводниковой  
оптоэлектроники)

Оппонирующая организация:

*Белорусский государственный  
университет*

Защита диссертации состоится 9 октября 2003 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при Учреждения образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (220013, Минск, ул. П.Бровки, 6. ауд.232, тел. 239 89 89).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Современные тенденции развития микро - и нанoeлектроники, повышение степени интеграции, создание СБИС с субмикронными нормами проектирования требуют интенсивного развития исследований в области создания запоминающих элементов для интегральных схем памяти, в состав которых входят конденсаторы. В свою очередь реализация новых конструкций конденсаторов неразрывно связана с разработкой и исследованием новых диэлектрических материалов. С целью сохранения емкостных характеристик конденсаторов при уменьшении их геометрических размеров остро встает задача получения высокотехнологичных диэлектрических структур с высокой диэлектрической проницаемостью, малым встроенным зарядом, низкими значениями токов утечки и совместимых с базовыми технологиями. Поиск таких материалов привел к исследованию многослойных диэлектриков, в состав которых входит  $\text{SiO}_2$ , как наиболее технологичный материал, и диэлектрик с диэлектрической проницаемостью значительно выше, чем у  $\text{SiO}_2$ . Особый интерес в качестве конденсаторного диэлектрика представляет структура  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ . Кроме высокой диэлектрической проницаемости  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  обладает свойством компенсировать встроенный положительный заряд  $\text{SiO}_2$ .

Актуальность темы обусловлена тем, что недостаточно изучены электрофизические, механические, структурно – морфологические характеристики нового комбинированного диэлектрика. В связи с этим встает задача исследования взаимного влияния каждого из диэлектриков на зарядовое состояние, остаточное механическое напряжение, суммарную емкость формируемых конденсаторов.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Исследования проводились в рамках тематического плана УП "Белмикросистемы" НПО "Интеграл". Результаты исследований были получены в процессе проведения четырех НИР.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы - установление закономерностей изменения электрофизических параметров и упруго - механических свойств комбинированного диэлектрика на основе системы  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  и создание с его использованием конденсаторов для интегральных схем памяти.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать спектрофотометрическую методику контроля степени окисления Ta при формировании слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  на поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ ;
- исследовать методами электронной микроскопии и электронографии структурно-морфологические особенности пленок  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ;
- провести адаптацию методики измерения вольтамперных характеристик для раздельного контроля зарядовых состояний в слоях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и разработать методику контроля токов утечки диэлектрических структур с использованием индиевого зонда;

- исследовать методами вольт - фарадных и вольт - амперных характеристик изменение диэлектрической проницаемости, встроенного заряда, порогового и пробивного напряжений конденсаторных структур на основе  $Ta_2O_5 / SiO_2$ ;

- методом рентгеновской дифракции определить остаточные механические напряжения в структуре  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$ ;

- разработать модель деформации двухслойных диэлектрических систем на кремнии и исследовать зависимость упругих напряжений в системе  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  от толщины диэлектрических пленок;

- разработать конструкцию и технологию создания тестовых конденсаторов, обеспечивающие контроль качества двухслойного диэлектрика.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются пленки двухслойного диэлектрика  $Ta_2O_5 / SiO_2$  и конденсаторы на их основе. Предметом исследования являются электрофизические параметры и остаточные механические напряжения получаемых конденсаторных структур.

**Методология и методы проведенного исследования.** Для измерения емкости конденсаторов, токов утечки, пробивных и пороговых напряжений конденсаторных структур были использованы метод вольт-фарадных характеристик, метод вольт – амперных характеристик, тестовый контроль. Для определения остаточных механических напряжений в структуре  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  - метод рентгеновской дифракции. Для измерения толщины и оптических констант двухслойной диэлектрической пленки  $Ta_2O_5 / SiO_2$  микроспектрофотометрия, эллипсометрия. Для исследования структурно-морфологических особенностей пленок  $Ta_2O_5$  - просвечивающая электронная микроскопия, электронография, Оже - спектрометрия.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.**

1. Предложена физико-математическая модель на основе теории упругости с уточненными упругими постоянными пленок  $Ta_2O_5$ , устанавливающая количественную взаимосвязь механических напряжений от условий формирования двухслойного диэлектрика  $Ta_2O_5 / SiO_2$ .

2. Теоретически обосновано и экспериментально определено соотношение толщины диэлектрических пленок ( $d_{SiO_2} : d_{Ta_2O_5} = 9,8 : 1$ ) в двухслойной структуре МОП - конденсаторов, при котором обеспечивается минимальный изгиб кремниевой пластины вследствие взаимной компенсации величины остаточных механических напряжений в структуре.

3. Впервые экспериментально установлена взаимосвязь между механическим напряжением в структуре двухслойного диэлектрика на кремнии для МОП-конденсатора и возникающим в нем связанным зарядом.

4. Определены закономерности изменения диэлектрической проницаемости, эффективного встроенного заряда, пороговых напряжений и токов утечки от толщины диэлектрических пленок и технологических условий окисления. Установлено, что одним из важных механизмов, приводящим к появлению и росту связанного отрицательного заряда при формировании диэлектрических пленок термического  $Ta_2O_5$ , сопровождающегося увеличением остаточных механических напряжений в пленке, является ионизация приме-

сей анионного типа при сжатии окружающей их матрицей в результате охлаждения образцов от температуры окисления до комнатной.

*Практическая значимость полученных результатов.*

1. Предложен новый двухслойный конденсаторный диэлектрик на основе оксидов кремния и тантала, позволяющий повысить емкость МОП-конденсаторов в 1,5 - 5 раза. Показано, что при получении диэлектрика МОП - конденсаторов в субмикронных СБИС с повышенной емкостью и технологичностью толщина пленки  $Ta_2O_5$  должна составлять 20 – 40% от общей толщины двухслойного диэлектрика  $Ta_2O_5 / SiO_2$ .

2. Разработан неразрушающий экспрессный спектрофотометрический метод контроля степени окисления Ta при формировании слоя  $Ta_2O_5$  термическим окислением на поверхности пленки  $SiO_2$  в условиях серийного производства.

3. Разработан технологический процесс формирования диэлектрика МОП-конденсаторов, в которых толщина пленки  $Ta_2O_5$  составляет 20 – 40% от общей толщины двухслойного диэлектрика  $Ta_2O_5 / SiO_2$ , позволяющий уменьшить площадь кристалла до 40% и открывающий широкие возможности по дальнейшему увеличению степени интеграции ИМС.

4. Результаты диссертационной работы использованы на НПО "Интеграл" при разработке и модернизации интегральных микросхем 78L05, в которых традиционный диэлектрик  $SiO_2$  МОП - конденсатора был заменен на разработанный двухслойный диэлектрик  $Ta_2O_5 / SiO_2$ , что позволило уменьшить площадь кристалла на 25 %.

*Основные положения диссертации, выносимые на защиту.*

1. Методика неразрушающего контроля процесса термического окисления пленки тантала, основанная на установленных отличиях в спектрах отражения в видимой области от пленок различного фазового состава в видимой области и обеспечивающая локальность до  $25 \text{ мкм}^2$ .

2. Экспериментально установленные закономерности изменения диэлектрической проницаемости, встроенного заряда, порогового напряжения от условий формирования и толщины пленок в МОП-структурах конденсаторов  $Al / Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$ .

3. Физико-математическая модель, учитывающая влияние толщины диэлектрических слоев в структуре  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  на величину механических напряжений, в которой допускается, что слои прочно связаны друг с другом, деформация каждого слоя определяется термическими напряжениями и является упругой. Модель позволяет рассчитать соотношения толщины диэлектрических слоев для получения минимальных механических напряжений в структуре МОП-конденсаторов, определяющих воспроизводимость и стабильность параметров микросхем.

4. Обоснованные рекомендации по выбору соотношений толщины слоев в составе двухслойного диэлектрика и условий их формирования, позволяющие управлять электрофизическими параметрами конденсаторных МОП - структур в составе интегральных микросхем.

### *Личный вклад соискателя.*

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в построении физико-математической модели и ее практическом использовании для расчета соотношений толщины пленок пентаоксида тантала и оксида кремния в двухслойном диэлектрике  $Ta_2O_5 / SiO_2$  для получения минимальных механических напряжений, в подготовке и постановке исследований морфологической структуры и измерений электрофизических параметров пленок  $Ta_2O_5$  и двухслойных пленок  $Ta_2O_5 / SiO_2$ , а также полученных с их использованием тестовых и интегральных МОП-конденсаторов. Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научными руководителями д.т.н., профессором Валентином Владимировичем Барановым и к.ф.-м.н. Пономарем Владимиром Николаевичем.

### *Апробация результатов диссертации.*

Основные результаты диссертационной работы представлялись на научно – технической конференции "Современные проблемы выходного контроля БИС, СБИС и создания программных и аппаратных средств контрольно – измерительного оборудования для микроэлектроники" (Москва, 1989г.), научно – технической конференции "Новые материалы и технологии" (Минск, 1994г.), 3 – й Международной научно – практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" (Одесса, 2002г.), 4 – й Международной научно – практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" (Одесса, 2003г.), 7 – ой Международной научно – технической конференции "Современные средства связи" (Нарочь, 2002г.) и опубликованы в 12 печатных работах.

*Опубликованность результатов.* Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 12 печатных работах общим объемом 222 страницы, в том числе: 2 монографии, 5 статей в научных журналах, 1 статья в научно-техническом сборнике, 4 тезиса докладов в сборниках тезисов конференций.

*Структура и объем диссертации.* Диссертация состоит из общей характеристики, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и приложений. Она включает 118 страниц, в том числе: 78 страниц машинописного текста, включая 24 страницы с иллюстрациями, 5 страниц с таблицами и 2 страницы приложений. Список использованных источников включает 136 наименований на 9 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В общей характеристике работы* обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту, охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов.

*В первой главе* проведен анализ путей и способов повышения емкости конденсаторов СБИС. Рассмотрены современные конструкции конденсаторов. Несмотря на перспективность всевозможных вертикально - интегрированных структур, задача увеличения емкости конденсаторного диэлектрика по-прежнему остается актуальной.

Одним из путей повышения емкости конденсатора является уменьшение толщины конденсаторного диэлектрика. Однако, снижение толщины конденсаторного диэлектрика возможно до определенного предела, ибо при использовании пленок с предельно малой толщиной существенно возрастает дефектность пленок, а также изменяются диэлектрические характеристики используемого материала, например,  $\epsilon$ .

Другим способом повышения емкости накопительного конденсатора является использование диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью. Однако материалы с высокой диэлектрической проницаемостью имеют тенденцию к уменьшению ширины запрещенной зоны и необходимо принимать определенные меры по ограничению токов утечки.

Анализ литературных данных по разработанным диэлектрикам для конденсаторов позволяет сделать ряд выводов относительно использования этих материалов в конденсаторах для запоминающих конденсаторов ячеек памяти.

Композиционные оксидные керамические диэлектрики имеют высокий показатель диэлектрических потерь, связанный с высокой гигроскопичностью, и невысокие значения диэлектрической проницаемости, вследствие чего невозможно получение конденсаторов с высокой удельной емкостью.

Композиционные стеклообразные диэлектрики из-за невысокой диэлектрической проницаемости также не могут использоваться при создании надежных конденсаторов с высокой удельной емкостью.

Из группы диэлектриков - оксидов металлов наиболее перспективным можно считать  $Ta_2O_5$ , поскольку при использовании его вместо  $SiO_2$ , величина удельной емкости конденсатора может быть увеличена примерно в 5 раз при неизменной площади. Следовательно, при равной емкости, площадь, занятая конденсатором, может быть уменьшена в 5 раз, что позволяет создавать высокоемкостные элементы малой площади.

*Во второй главе* изложены методики подготовки образцов и исследования структуры и электрофизических параметров трехслойной системы  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$ .

Двухслойную диэлектрическую систему формировали в несколько этапов. На первом этапе на подложках КДБ 12 различными методами окисления

создавался слой  $\text{SiO}_2$  различной толщины. На следующем этапе на созданные пленки  $\text{SiO}_2$  методом магнетронного распыления наносились пленки тантала толщиной от 30 до 90 нм. Затем для получения пленок  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  проводили последующее окисление тантала в атмосфере сухого кислорода при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течении 60 мин., с расходом кислорода - 400л/час.

На полученных таким образом трехслойных структурах изучались такие параметры, как напряжение плоских зон, пороговое напряжение, толщина и емкость окисла, приповерхностная концентрация носителей заряда в подложке, заряд окисла. Исследования проводились на основе измерений и анализа высокочастотных вольт - фарадных характеристик (ВЧ ВФХ). Для исследования морфологии структуры пленок  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  использовалась просвечивающая электронная микроскопия. Толщину как отдельных пленок оксида тантала и оксида кремния, так и комбинированного диэлектрика  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  измеряли с помощью эллипсометрии и микроспектрофотометрии, величину механических напряжений в трехслойной структуре  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  определяли с использованием метода рентгеновского дифракционного анализа.

Статистическая информация по качеству созданных конденсаторов на основе двухслойного диэлектрика  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  набиралась при измерениях специализированных тестовых модулей и использовалась для оптимизации соотношения толщины отдельных пленок и оценки результатов.

*Третья глава* диссертации посвящена разработке методик контроля параметров двухслойных диэлектрических структур и качества полученных на их основе конденсаторов.

Проведенная адаптация методики измерения вольтамперных характеристик для раздельного контроля зарядовых состояний в слоях  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  позволила оценить вклад каждого из диэлектриков на зарядовую стабильность системы при различных сочетаниях толщины слоев.

Разработанная методика контроля токов утечки диэлектрических структур с использованием индиевого зонда позволяла проводить измерения до создания металлизированных контактов, которые по форме ВАХ и абсолютным значениям токов и напряжений предоставляет возможность судить о степени воздействия физических и технологических факторов на параметры полупроводниковых структур.

Предложенная спектрофотометрическая методика контроля степени окисления тантала при формировании слоя  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  на поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ , учитывающая различный характер спектров отражения однослойных и двухслойных структур, позволяла оперативно фиксировать завершение процесса окисления пленки тантала, что давало возможность сократить сроки технологических процессов и экономить материальные ресурсы.

Разработанные конструкция и технология создания тестовых конденсаторов, входящие в состав тестового модуля обеспечивали контроль качества как отдельных однослойных конденсаторных структур –  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , так и двухслойной конденсаторной системы  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  в процессе изготовления интегральных микросхем.



*Четвертая глава* посвящена изучению закономерностей изменения электрофизических и упруго-механических свойств тройной системы  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  и созданию конденсаторов с диэлектриком на основе пленок оксидов тантала и кремния.

Наряду с анализом изменения электрофизических свойств трехслойной системы в зависимости от толщины входящих в систему пленок, было изучено также влияние деформации такой системы на электрофизические свойства. В частности, представлял большой интерес фактор влияния остаточных механических напряжений на изменение зарядовых состояний как в двухслойном диэлектрике  $Ta_2O_5 / SiO_2$ , так и непосредственно в пленке  $Ta_2O_5$ . Исследования показали, что положительный заряд в комбинированном диэлектрике  $Ta_2O_5 / SiO_2$  с ростом механических напряжений не только остается постоянным, но и имеет тенденцию к уменьшению; в пленке  $Ta_2O_5$  с ростом механических напряжений увеличивается встроенный отрицательный заряд, именно увеличение встроенного отрицательного заряда в пленке  $Ta_2O_5$  способствует компенсации и снижению встроенного положительного заряда во всей системе в целом при возникновении механических напряжений, токи утечек с ростом механических напряжений возрастают.

Сопоставленные изменения электрических и механических свойств в системе  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  в зависимости от величины остаточных механических напряжений позволили предположить о существенном влиянии механической деформации на свойства, как отдельных диэлектрических пленок, так и на свойства системы комбинированных диэлектриков в целом. Для подтверждения данного предположения и установления механизма воздействия механических напряжений на свойства комбинированного конденсаторного диэлектрика была разработана модель упругих внутренних напряжений в системе  $Si - SiO_2 - Ta_2O_5$ , на основании которой определены упругие постоянные пленки оксида тантала, а также рассчитано соотношение толщин  $SiO_2$  и  $Ta_2O_5$ , при которых пластина имеет минимальную деформацию.

При выводе уравнения изгиба принималось во внимание, что основной вклад в изгиб вносят процессы осаждения  $SiO_2$  и  $Ta_2O_5$ , что позволяет применять к кремниевым структурам теорию изгиба трехслойных структур. Вывод выражения изгиба проводился при следующих предположениях:

1. каждый слой хорошо связан с другими слоями системы;
2. толщины слоев и всей трехслойной системы гораздо меньше линейных размеров образца;
3. пластина деформируется по сфере, сечения остаются плоскими;
4. деформации в монокристаллическом кремнии, двуокиси кремния и оксида тантала в основном определяются термическими и структурными напряжениями;
5. деформация каждого слоя является упругой, т.е. релаксация напряжений отсутствует.

На основании этих предположений получено выражение для расчета радиуса кривизны подложки:

$$0 = 6/h_1 (E_2 h_2 (1-\nu_1)(\Delta_1 - \Delta_2) / E_1 h_1 (1-\nu_2) + E_3 h_3 (1-\nu_1)(\Delta_1 - \Delta_3) / E_1 h_1 (1-\nu_3)) (1).$$

где:

$h_1$  – толщина кремниевой подложки;

$h_2$  – толщина пленки  $\text{SiO}_2$ ;

$h_3$  – толщина пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ;

$E_1, E_2, E_3$ , - модули Юнга кремния,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ;

$\nu_1, \nu_2, \nu_3$  – коэффициенты Пуассона кремния,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ;

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  - температурная усадка слоя кремния,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

Для проверки достоверности модели вначале определили упругие постоянные пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . Поскольку из справочных данных известны упругие постоянные, модуль Юнга и коэффициент Пуассона для кремния ( $E_1, \nu_1$ ) и оксида кремния ( $E_2, \nu_2$ ), а справочные значения модуля Юнга ( $E_3$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu_3$ ) для пленок  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  не были обнаружены, то был проведен их расчет, а точнее отношение  $E_3 / (1 - \nu_3)$ . Для этих целей было использовано выражение (1) и экспериментальные данные. В результате было получено среднее значение отношения  $E_3 / (1 - \nu_3)$ , которое составило  $5,9 \cdot 10^{11}$  МПа.

Поскольку знаки возникающих напряжений в системах  $\text{Si} / \text{SiO}_2$  и  $\text{Si} / \text{Ta}_2\text{O}_5$  имеют противоположные значения, можно предположить, что имеется некоторое оптимальное соотношение толщин слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , при которых радиус кривизны стремится к бесконечности, а кривизна системы становится равной нулю, т.е. система будет находиться в ненапряженном состоянии. Для установления оптимального соотношения воспользуемся ранее созданной моделью, описывающей зависимость радиуса кривизны от толщины и свойств, участвующих в системе пленок, т.е. выражением (1).

Для этого левую часть выражения (1) приравняем к нулю. В результате преобразований получаем следующее соотношение толщин пленок, при котором система находится в ненапряженном состоянии:  $h_{\text{SiO}_2} : h_{\text{Ta}_2\text{O}_5} = 9,8$ .

Сопоставленные изменения электрических и механических свойств в системе  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  в зависимости от величины остаточных механических напряжений позволяют предположить о существенном влиянии механической деформации на свойства, как отдельных диэлектрических пленок, так и на свойства системы комбинированных диэлектриков в целом. Для подтверждения данного предположения и установления механизма воздействия механических напряжений на свойства комбинированного конденсаторного диэлектрика были рассмотрены более подробно деформационные явления, возникающие в системе  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  и установлено, что рост заряда в диэлектрической пленке  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  обусловлен ионизацией примеси анионного типа, например, кислорода, при сжатии их окружающими атомами матрицы в результате кристаллизации окислов в микрообъемах при охлаждении образцов от температуры окисления до комнатной. Факт присутствия в пленках оксида тантала избыточных атомов кислорода подтверждают исследования методом Оже-спектроскопии. В пленках  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с высоким значением плотности заряда  $1,4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> избыточных атомов кислорода зафиксировано примерно на 10% больше, чем в пленках с плотностью заряда  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Для проведения исследований электрофизических параметров конденсаторных диэлектриков использовались тестовые конденсаторы с диэлектриками на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ . Конденсаторы обоих типов имели одинаковые геометрические размеры, а именно, площадь обкладок составляла  $0,09 \text{ мм}^2$ , суммарная толщина конденсаторного диэлектрика –  $100 \text{ нм}$ . Варианты соотношений толщин в комбинированном диэлектрике  $\text{Ta}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$  составляли:  $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5} : h_{\text{SiO}_2} = 10 : 90 \text{ нм}$ ;  $50 : 50 \text{ нм}$ ;  $80 : 20 \text{ нм}$ . Выбор толщин пленок в указанных вариантах определялся с учетом рассчитанных ранее с помощью модели пропорций, при которой напряжение в структуре  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  минимально. Как было показано в разделе 4.2, минимальное напряжение наблюдается при соотношении  $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5} : h_{\text{SiO}_2} = 1 : 9,8$ . Именно таким был выбран первый вариант тестового конденсатора. Два других варианта выбраны для изучения поведения параметров конденсаторов с отклонениями толщин от тех значений, при которых напряжения минимальны.

Анализ параметров разработанных конденсаторов указывает на то, что отличие в значениях механических напряжений пленок при содержании  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  порядка  $20 - 40 \%$  в общей толщине комбинированного диэлектрика и пленок, при которых механические напряжения практически отсутствуют, не является значительной. В этом случае можно говорить о целесообразности использования комбинированного диэлектрика с пропорцией  $\text{Ta}_2\text{O}_5$   $20 - 40 \%$  в структуры ячейки памяти. Именно такие диэлектрики позволяют увеличить емкость конденсатора примерно в  $1,5$  раза при сохранении геометрических размеров.

Одним из вариантов опробования МОП-конденсатора с разработанным конденсаторным диэлектриком  $\text{TaO}_5 / \text{SiO}_2$  и верхней алюминиевой обкладкой в серийном производстве явилась замена конденсатора с традиционным диэлектриком  $\text{SiO}_2$  на экспериментальных партиях изделия ИМС 78L05.

Площадь конденсатора в базовом варианте составляла  $2,3 \cdot 10^6 \text{ мкм}^2$ , емкость равнялась  $6,76 \text{ пФ}$ . Использование конденсаторного диэлектрика  $\text{TaO}_5 / \text{SiO}_2$  позволило сократить площадь конденсатора, не меняя его емкостных характеристик, до значения  $1,6 \cdot 10^6 \text{ мкм}^2$ . Уменьшение площади конденсатор привело к существенному изменению размера кристалла ИМС 78L05. В базовом варианте размер кристалла составлял  $1,0 \times 1,2 \text{ мм}^2$ , а с использованием нового конденсатора размер микросхемы уже составил  $0,9 \times 1,0 \text{ мм}^2$ . Таким образом, достигнуто сокращение площади на  $25\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены закономерности изменения диэлектрической проницаемости, эффективного встроенного заряда, пороговых напряжений и токов утечки от толщин диэлектрических пленок и технологических условий окисления. Диэлектрическая проницаемость с ростом толщины пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  уве-

личивается от 3,8 до 26,1, положительный эффективный встроенный заряд уменьшается от  $6,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  до  $1,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Показано, что при получении диэлектрика МОП - конденсаторов в субмикронных СБИС с проектными нормами 0,8 мкм толщина пленки  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  должна составлять 20 – 40% от общей толщины двухслойного диэлектрика  $\text{SiO}_2 / \text{Ta}_2\text{O}_5$  [4, 7, 9, 10].

2. На основании теоретического обобщения и экспериментальных данных, полученных при проведении исследований, предложена физико-математическая модель, устанавливающая количественную взаимосвязь между толщиной и условиями формирования отдельных слоев и механическими напряжениями в двухслойном диэлектрике  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ . При создании модели использовались теория упругости и теория малых прогибов. Учитывалась разница в коэффициентах термического расширения пленок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , а также то, что пленка  $\text{SiO}_2$  формировалась при температуре  $1100^\circ\text{C}$ , а пленка  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  при  $450^\circ\text{C}$ . Определено соотношение толщины диэлектрических пленок ( $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5} : h_{\text{SiO}_2} = 9,8 : 1$ ) в двухслойной структуре МОП - конденсаторов с  $C_{\text{уд.}} = 3\text{фФ}$ , при которой обеспечивается минимальный изгиб кремниевой пластины вследствие взаимной компенсации величины остаточных механических напряжений в структуре [3, 8, 9].

3. Впервые экспериментально установлена взаимная связь между механическим напряжением в интервале значений  $\sigma = 80 - 300 \text{ МПа}$  в структуре двухслойного диэлектрика  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  на кремнии для МОП-конденсатора и возникающим в нем связанным зарядом [4, 6, 11].

4. Установлено, что основным фактором, приводящим к росту связанного отрицательного заряда в диэлектрических пленках на основе  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  до значений  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при увеличении остаточных механических напряжений до  $\sigma = 300 \text{ МПа}$  является ионизация примесей анионного типа, например, кислорода, при сжатии окружающей их матрицей в результате охлаждения образцов от температуры окисления ( $450^\circ\text{C}$ ) до комнатной [5, 9].

5. Разработан неразрушающий экспрессный спектроскометрический метод контроля степени окисления Ta при формировании термическим окислением слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  в интервале толщины 50 - 100 нм на поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ , реализованный на основе прибора микроспектрофотометра MPV-SP ф. Leica (Германия) в условиях серийного производства. Прибор работает в диапазоне длин волн  $\lambda = 400 \div 800 \text{ нм}$  с локальностью до  $(5 \times 5) \text{ мкм}^2$ . Погрешность прибора составляет 5% [1, 2].

6. Предложены рекомендации по управлению электрофизическими параметрами конденсаторных МОП - структур, заключающиеся в выборе соответствующих соотношений толщины и условий формирования диэлектрических пленок, входящих в состав двухслойного конденсаторного диэлектрика. Разработанный диэлектрик использован при выполнении НИР по созданию схем памяти и модернизации ИМС 78L05. Имеется акт внедрения [3, 9, 12].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

## Монографии

1. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур в производстве СБИС / В.А.Емельянов, В.В.Баранов, Т.В.Петлицкая и др.; Под ред. А.П.Достанко.- Минск: НПО "Интеграл", 1997.-91с.
2. Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС / В.А.Емельянов, В.В.Баранов, Л.Д.Буйко, Т.В.Петлицкая.- Минск: Бестпринт, 1998.-108с.

## Статьи в научных журналах

3. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Петлицкая Т. В. Зарядовые свойства конденсаторной системы на основе двухслойного диэлектрика  $\text{SiO}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5$  // Инженерно – физический журнал. 2003. - №2 – С. 30 - 33.
4. Пилипенко В.А., Пономарь В.Н., Петлицкая Т.В. Учет механических напряжений в комбинированных диэлектриках для конденсаторов СБИС // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. 2003. - №2 – С. 164-166.
5. Пилипенко В.А., Пономарь В. Н., Петлицкая Т.В. Влияние механических напряжений на зарядовые свойства двухслойного конденсаторного диэлектрика  $\text{SiO}_2 - \text{Ta}_2\text{O}_5$  // Вестник БГУ. – Серия 1, Физ., мат., инф., 2003. - №1 – С 37-41.
6. Дiodы Шоттки с многослойной пассивацией / В.В.Баранов, В.Н.Пономарь, Т.В. Петлицкая, Я.А.Соловьев // Известия Белорусской инженерной академии. - 2002. - №12(14)/2 – С. 23 – 25.
7. Петлицкая Т.В. МОП-конденсаторы повышенной емкости и технологичности для СБИС // Доклады БГУИР.-2003.- №1 - С. 23-27.

## Статьи в научно-технических сборниках

8. Андронов Б.Н., Андропова Р.Е., Борщ Т.В. Симплекс - решетчатое планирование эксперимента по исследованию свойств стекол в области, имеющей форму неправильной усеченной пирамиды // Сборник трудов МИЭТ; Материалы электронной техники. - 1985. - С. 66-71.

## Тезисы докладов в сборниках конференций

9. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Петлицкая Т. В. Механические напряжения в диэлектрической системе на основе оксида тантала // Современные информационные и электронные технологии. Тез. докл. конф. – Одесса, 2002г. – С. 175.
10. Буйко Л.Д., Чигирь Г.Г., Солонинко А.А., Петлицкая Т.В. Тестовый контроль качества технологических процессов СБИС. // Современные проблемы

выходного контроля БИС, СБИС и создания программных и аппаратных средств контрольно – измерительного оборудования для микроэлектроники. Тез. докл. конф. – Москва, 1989г. – С. 35.

11. Петлицкая Т.В., Сакович Е.Л. Определение плотности заряда в двухслойных диэлектриках на кремниевых пластинах // Новые материалы и технологии. Тез. докл. конф. – Минск, 1994г. – С. 149.

12. Пилипенко В.А., Пономарь В.Н., Петлицкая Т.В., Соловьев Я.А. Контроль качества окисления пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> методом микроспектрофотометрии // Современные информационные и электронные технологии. Тез. докл. конф. – Одесса, 2003г.



Библиотека БГУИР

## РЭЗІЮМЭ

Пятліцкая Таццяна Ўладзіміраўна  
 МВП-кандэсатары інтэгральных схем аснове  
 пентааксіда тантала

**Ключавыя словы:** кандэсатарны дыэлектрык, дыэлектрычная пранікальнасць, інтэгральны кандэсатар, схема памяці, зарад, механічнае напружанне, ток уцечкі, ёмістасць.

**Аб'ектам даследавання** з'яўляюцца пленкі двухслойнага дыэлектрыка  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  і кандэсатары на іх аснове.

**Мэтай даследавання** з'яўляецца вызначэнне заканамернасцяў змянення электрафізічных параметраў і пружка-механічных уласцівасцяў камбініраванага дыэлектрыка на аснове сістэмы  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  і стварэнне з іх выкарастаннем кандэсатараў для інтэгральных схем памяці.

Для правядзення даследаванняў выкарастоўваліся сучасныя метады аналіза матэрыялаў і электра-фізічных уласцівасцяў паўправадніковых структур: метады высокачастотных вольт-фарадных характэрыстык, тэставы кантроль, мікраспектрафатаметрыя, эліпсамэтрыя, электронная прасвечваючая мікраскапія, электранаграфія, рэнтгенаўскі дыфракцыйны аналіз і іншыя.

У выніку правядзеных даследаванняў устаноўлена залежнасць змянення дыэлектрычнай пранікальнасці, токаў уцечкі, парогавага напружання камбініраванай дыэлектрычнай пленкі  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  ад таўшчыні аксідаў тантала і крэмнія.

Паказана, што пад уздзеяннем механічнага напружання сумарны ўбудаваны дадальны зарад у сістэме  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$  змяняецца з прычыны росту адмоўнага зарада у пленцы  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

Распрацавана матэматычная мадэль пружкіх напружанняў у сістэме  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ , на падставе якой вызначаны пружкія пастаянныя пленкі аксіда тантала, а таксама разлічаны суадносіны таўшчынь  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , пры якіх пластына мае мінімальны прагіб.

Распрацаваны канструкцыя і тэхналогія стварэння тэставых кандэсатараў, уваходзячых у склад тэставага модуля, якія забяспечваюць кантроль якасці як асобных аднаслойных кандэсатарных структур  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , так і двухслойнай кандэсатарнай сістэмы  $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  у працэсе вытворчасці інтэгральных мікрасхем.

Устаноўлена, што рост зараду ў дыэлектрычнай пленцы  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  абумоўлены іанізацыяй прымясяў пры зжыманні іх навакольнымі атамамі матрыцы ў выніку крысталізацыі вокісла ў мікрааб'ёмах пры ахаладжэнні структураў ад тэмпературы акіслення да пакаевай.

Праведзена прамысловае выпрабаванне прапанаваных варыянтаў кандэсатараў і ўстаноўлена, што іх электрафізічныя характэрыстыкі задавальняюць патрабаванням па вытворчасці інтэгральных схем памяці.

## РЕЗЮМЕ

### Петлицкая Татьяна Владимировна МОП-конденсаторы интегральных схем на основе пентаоксида тантала

*Ключевые слова:* конденсаторный диэлектрик, диэлектрическая проницаемость, интегральный конденсатор, схема памяти, заряд, механическое напряжение, ток утечки, емкость.

*Объектом исследования* являются пленки двухслойного диэлектрика  $Ta_2O_5 / SiO_2$  и конденсаторы на их основе.

*Целью работы* является установление закономерностей изменения электрофизических параметров и упруго - механических свойств комбинированного диэлектрика на основе системы  $Ta_2O_5 / SiO_2$  и создание с его использованием конденсаторов для интегральных схем памяти.

Для проведения исследований использовались современные методы анализа материалов и электрофизических свойств полупроводниковых структур: метод высокочастотных вольт-фарадных характеристик, тестовый контроль, микроспектрофотометрия, эллипсометрия, электронная просвечивающая микроскопия, электронография, рентгеновский дифракционный анализ и другие.

В результате проведенных исследований установлена зависимость изменения диэлектрической проницаемости, токов утечки, порогового напряжения комбинированной диэлектрической пленки  $Ta_2O_5 / SiO_2$  от толщины оксидов тантала и кремния.

Показано, что под воздействием механического напряжения суммарный встроенный положительный заряд в системе  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  уменьшается вследствие роста отрицательного заряда в пленке  $Ta_2O_5$ .

Разработана математическая модель упругих напряжений в системе  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$ , на основании которой определены упругие постоянные пленки оксида тантала, а также рассчитано соотношение толщин  $SiO_2$  и  $Ta_2O_5$ , при котором пластина имеет минимальный прогиб.

Разработаны конструкция и технология создания тестовых конденсаторов, входящие в состав тестового модуля, которые обеспечивают контроль качества как отдельных однослойных конденсаторных структур  $SiO_2$  и  $Ta_2O_5$ , так и двухслойной конденсаторной системы  $Ta_2O_5 / SiO_2$  в процессе изготовления интегральных микросхем.

Установлено, что рост заряда в диэлектрической пленке  $Ta_2O_5$  обусловлен ионизация примесей при сжатии их окружающими атомами матрицы в результате кристаллизации окислов в микрообъемах при охлаждении образцов от температуры окисления до комнатной.

Проведено промышленное опробование предложенных вариантов конденсаторов показывают и установлено, что их электрофизические характеристики удовлетворяют требования по производству интегральных схем памяти.



## SUMMARY

Petlitskaya Tatyana Vladimirovna

**MOS - capacitors of integrated circuit  
on base of tantalum pentaoxide**

**Key words:** capacitor dielectrics, dielectrics permeability, integrated capacitor, memory circuit, charge, mechanical stress, leakage current, capacity.

**The principal goal:** determination of behavior of electro-physical and elastic mechanical properties of combination dielectric on base of system of  $Ta_2O_5 / SiO_2$  and formation of capacitors for memory IC.

For investigation have been used modern methods of analyses of materials and electrophysical properties of semiconductor structures: high frequency C-V method, test control, microspectrophotometry, ellipsometry, electron transmitted microscopy, electronography, X-ray diffraction analysis etc.

The performed studies resulted in relationship of dielectrics permeability, leakage currents, threshold voltage of combined dielectrics film  $Ta_2O_5 / SiO_2$  from thickness of tantalum and silicon oxides.

The study showed that mechanical stress decreases total built-in positive charge in  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  system because of increase negative charge in  $Ta_2O_5$  film.

Mathematical model of elastic stress in  $Ta_2O_5 / SiO_2 / Si$  system have been developed, on base of this model determine elastic constants of tantalum oxide films, calculate relationship between thickeners of  $SiO_2$  and  $Ta_2O_5$  films for minimal substrate bending.

Charge increasing in dielectrics film  $Ta_2O_5$  is caused by impurity ionization in microvolumes through compression of impurity by surrounding matrix atoms in result of oxide crystallization in microvolumes for sample cooling from oxidation to room temperature.

Construction and technology of formation test capacitors have been developed. These capacitors makes available quality control of monolayer and double-layer capacitor structures of  $Ta_2O_5 / SiO_2$  in process of IC production.

Proposed capacitor variants have been checked in industrial production, electrophysical properties of capacitor correspond to IC memory production requirement.

ПЕТЛИЦКАЯ ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

**МОП - КОНДЕНСАТОРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ  
НА ОСНОВЕ ПЕНТАОКСИДА ТАНТАЛА**

Специальность **05.27.01** - твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы  
на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 21.08.2003.	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,16.
Уч.- изд. л. 0,8.	Тираж 90 экз.	Заказ 429.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
“Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”  
Лицензия ЛП №156 от 30.12.2002.  
Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.  
220013, Минск, ул. П. Бровки, 6