

**Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.3.049.77: 621.793

**Вилья Пинеда
Номар Альберто**

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ
СЛОЕВ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МДП СТРУКТУР РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ
РАСПЫЛЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2020

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель: **Голосов Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Рогачев Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор, директор Государственного научного учреждения «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси»

Алексеев Александр Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЧ учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Оппонирующая организация: **Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»**

Защита диссертации состоится « 01 » октября 2020 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » августа 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



И. В. Дайняк

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы отмечены бурным развитием микроэлектроники, которое происходит в направлении повышения степени интеграции интегральных микросхем (ИМС) с целью достижения их максимального быстродействия и минимальной потребляемой мощности. До недавнего времени степень интеграции ИМС в основном повышалась за счет уменьшения топологических размеров элементов. Однако именно сейчас в развитии микроэлектроники наметились серьезные проблемы, которые связаны с принципиальными ограничениями конструктивно-технологических приемов, лежащих в основе планарной технологии. На протяжении пяти десятилетий ключевым диэлектриком в кремниевых ИМС был оксид кремния SiO_2 . Главной проблемой дальнейшего использования SiO_2 является его низкая диэлектрическая проницаемость. Согласно правилам масштабирования, уменьшение длины канала транзистора металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) сопровождается уменьшением толщины подзатворного диэлектрика, и при технологических нормах 60 нм толщину диэлектрика необходимо уменьшать до 1,2 нм. При дальнейшем уменьшении толщины слоя его изоляционные свойства значительно ухудшаются. Поэтому, для перехода к меньшим технологическим нормам необходимо использовать новые материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью, так называемые *high-k* диэлектрики. В качестве *high-k* диэлектриков в настоящее время рассматривается ряд материалов, имеющих сравнительно высокие значения диэлектрической проницаемости и малые потери токов утечки. Однако практическое использование этих материалов сталкивается с серьезными трудностями из-за отсутствия технологий воспроизводимого формирования данного класса пленок. Кроме того, появление в технологии микроэлектроники новых материалов с высокой реакционной способностью, чувствительных к воздействию многих стандартных процессов, усложняет технологический процесс, и ведет к необходимости разработки сопутствующих технологических операций. Таким образом, дальнейшее развитие микроэлектроники тесно связано с решением ряда задач в области физики материаловедения и технологии. Разработка методов ионно-плазменного нанесения тонких пленок *high-k* диэлектриков, методов контроля и управления их физическими свойствами является актуальной задачей, которая требует решения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с программами и темами

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов: ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 3.3.03

«Разработка методов ионно-плазменного формирования тонких пленок компонентных диэлектриков для использования в качестве функциональных слоев RFID меток и микроэлектронных магниторезистивных устройств хранения информации» (2016–2018 гг., № ГР 20163786), задание 3.3.07 «Разработка физико-технических основ формирования сверхтонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью для использования в качестве подзатворного диэлектрика КМОП структур» (2019–2020 гг., № ГР 20191719), хозяйственных договоров на выполнение НИР № 16-1045Б «Разработка и исследование технологических процессов нанесения многокомпонентных оксидных керамических материалов конденсаторных структур перспективной энергонезависимой памяти методом ВЧ-магнетронного напыления» (2016–2018 гг., № ГР 20163537), № 19-1016 «Исследование электрофизических характеристик пленок оксида ванадия, формируемых методом реактивного магнетронного напыления» (2019 г., № ГР 20191055) (заказчик – ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, РБ). Тема диссертационной работы соответствует п. 8 (многофункциональные материалы и технологии) приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190.

Цель и задачи исследований

Целью исследования является установление закономерностей и разработка методов реактивного магнетронного нанесения тонких пленок на основе диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, методов контроля и управления их физическими свойствами, которые определяют возможность использования данного класса пленок в качестве диэлектрических слоев современных МДП микросхем.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать комплекс экспериментального оборудования для нанесения МДП структур на основе *high-k* диэлектриков методами ионно-плазменного распыления;
- разработать методы определения диэлектрических характеристик тонких пленок *high-k* диэлектриков с помощью электрических и оптических измерений;
- разработать методику выбора и контроля режимов нанесения пленок *high-k* диэлектриков при реактивном магнетронном распылении;
- установить особенности процесса формирования тонких пленок *high-k* диэлектриков при реактивном магнетронном распылении и влияние на их свойства технологических параметров нанесения и последующего отжига;

– провести экспериментальные исследования процессов формирования МДП структур на основе пленок *high-k* диэлектриков, изучить их физические свойства и показать возможность применения данного класса пленок в качестве материалов и приборов микроэлектроники;

– исследовать особенности и разработать технологические рекомендации по реализации процессов нанесения сверхтонких пленок *high-k* диэлектриков на подложки диаметром 200 мм методом реактивного магнетронного распыления.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

– на основе исследований разрядных и эмиссионных характеристик магнетронной распылительной системы (МРС) и спектров оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) плазмы магнетронного разряда определены особенности физических процессов, происходящих при высоковакуумном реактивном распылении Ti, Zr, Ta, Hf мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов. Показано, что ОЭС плазмы является эффективным методом контроля процесса реактивного магнетронного распыления и позволяет точно поддерживать соотношение скоростей нанесения металла и кислорода за счет поддержания заданных интенсивностей линий оптического излучения материала мишени и O₂. Установлено, что при использовании высоковакуумного магнетронного распыления на зависимостях напряжения разряда и интенсивности контрольных эмиссионных линий плазмы практически отсутствует гистерезис характеристик. Это обеспечивает устойчивость процесса реактивного распыления без использования систем обратной связи. Установлено, что область концентраций кислорода Γ_{O_2} в Ar/O₂ смеси газов, при которой происходит формирование диэлектрических пленок оксидов, имеет связь с энтальпией образования оксида из исходного металла. Чем выше энтальпия образования оксида, тем большие концентрации кислорода требуются для формирования диэлектрических пленок. На основе полученных данных предложена методика формирования тонкопленочных слоев, основанная на использовании высоковакуумного магнетронного распыления в сочетании с ОЭС плазмы, позволяющая воспроизводимо наносить пленки оксидов;

– исследованы зависимости структуры, оптических и диэлектрических характеристик пленок оксидов титана, циркония, тантала, гафния от параметров процесса реактивного магнетронного распыления и последующего отжига. Установлено, что при реактивном распылении формируются аморфные пленки *high-k* диэлектриков. Сравнительный анализ диэлектрических характеристик пленок исследуемых оксидов показал, что наилучшим сочетанием характеристик, с точки зрения использования в качестве диэлектрических слоев МДП структур, обладают пленки оксида гафния. Без

нагрева подложек и последующего отжига получены пленки оксида гафния с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 17 - 22$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\varphi = 0,03 - 0,05$ и шириной запрещенной зоны $E_g = 5,7 - 5,8$ эВ. При этом токи утечки не превышали 10^{-3} А/см² при напряженности электрического поля $E = 5 \times 10^5$ В/см;

– установлено, что в процессе отжига при температурах 200 – 600 °С пленки *high-k* диэлектриков переходят из аморфного состояния в поликристаллическое. При этом наблюдается некоторое снижение ϵ и $\text{tg}\varphi$, особенно на высоких частотах. Так, при отжиге аморфных пленок оксида гафния при температуре 400 °С формируется поликристаллическая структура с моноклинной модификацией кристаллической решетки. При этом диэлектрическая проницаемость пленок снижается с 22 до 13. При температурах более 500 °С отмечено формирование смешанной моноклинной – тетрагональной фазы. При этом происходило увеличение диэлектрической проницаемости до 25 и снижение токов утечки до 10^{-5} А/см²;

– для повышения равномерности толщины наносимых слоев *high-k* диэлектриков на подложки \varnothing 200 мм предложена конфигурация системы нанесения пленок на вращающуюся подложку при смещении оси подложки относительно оси магнетрона. При расстоянии мишень – подложка 120 мм и смещении оси подложки 100 мм получены пленки оксида тантала с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4$ % и неравномерностью распределения емкости и диэлектрических потерь по площади подложки менее ± 18 %;

– установлено, что при уменьшении толщины пленок оксида гафния с 98,6 нм до 13,7 нм наблюдалось снижение ϵ с 20 до 6,5, увеличение плотности токов утечки и диэлектрических потерь, особенно на высоких частотах. Такое же поведение отмечено для пленок оксида тантала. При уменьшении толщины пленки до 6 нм ϵ оксида тантала уменьшалась с 28 до 4,5. При этом диэлектрические потери на высоких частотах увеличились до 0,28. Сделано предположение, что ухудшение диэлектрических характеристик пленок является следствием изменения структуры пленки и нарушением механизма ионной поляризации на границах с контактами, что приводит к уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости;

– с использованием полученных экспериментальных данных о диэлектрических характеристиках наносимых слоев проведено моделирование и сравнение электрических характеристик *n*-канальных МДП транзисторов при использовании в качестве подзатворного диэлектрика стандартного диоксида кремния и при его замене на оксиды тантала и гафния. При моделировании в качестве базовых использовались стандартная структура и технологический маршрут формирования *n*-канального МДП транзистора с поликремниевым затвором, выполненного по проектным нормам 0,35 мкм. На основе

результатов моделирования установлено, что замена оксида кремния на оксид гафния позволяет увеличить толщину подзатворного диэлектрика с 13 до 65 нм при сохранении основных электрических характеристик транзистора.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные закономерности процессов реактивного магнетронного распыления Ti, Ta, Hf и Zr мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов, включающие связь энтальпии образования оксида из исходного металла ΔH с концентрацией кислорода в газовой смеси Γ_{O_2} , при которой происходит переход в реактивный режим процесса распыления и формируется диэлектрическая пленка, показывающие, что для Ti, имеющего энтальпию образования оксида $\Delta H_{Ti} = -943,9$ кДж/моль, переход в реактивный режим процесса осуществляется при $\Gamma_{O_2} = 15$ %, а для Ta, имеющего $\Delta H_{Ta} = -2047,0$ кДж/моль, – при Γ_{O_2} более 50 %, что обеспечивает обоснованный выбор режимов нанесения диэлектрических пленок оксидов при реактивном распылении;

2. Методика формирования тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью реактивным магнетронным распылением, основанная на применении высоковакуумного распыления при давлениях менее 0,06 Па и скоростях откачки 1000 л/с и более в сочетании с контролем интенсивности линий оптической эмиссии плазмы, позволяющая при концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов от 0 до 100 % устранить гистерезис напряжения разряда и обеспечить воспроизводимость диэлектрических свойств пленок;

3. Результаты экспериментальных исследований зависимостей диэлектрических характеристик пленок оксидов титана, циркония, тантала и гафния от параметров процесса реактивного магнетронного распыления, показывающие, что наилучшим сочетанием диэлектрических характеристик обладают пленки аморфного оксида гафния с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 17 - 22$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\varphi = 0,03 - 0,05$, шириной запрещенной зоны 5,7 – 5,8 эВ и током утечки менее 10^{-3} А/см² при $E = 5 \times 10^5$ В/см, что обеспечивает возможность их использования в качестве диэлектрика в МДП структурах ИМС с низкими токами утечки;

4. Закономерности изменения диэлектрических характеристик в сверхтонких пленках оксидов тантала и гафния, показывающие, что при уменьшении толщины пленки, вследствие нарушения механизма ионной поляризации на границах с контактами конденсатора для оксида гафния наблюдается снижение ϵ с 20 до 6,5 при толщине пленки 13,7 нм, а для оксида тантала с 28 до 4,5 при толщине пленки 6 нм, учет которых позволил установить, что замена оксида кремния на оксид гафния в подзатворном

диэлектрике МДП транзистора дает возможность увеличить толщину диэлектрика с 13 до 65 нм при сохранении основных электрических характеристик транзистора.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в разработке и создании экспериментального технологического и диагностического оборудования, непосредственном участии в подготовке и проведении экспериментов, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов. Автором сформулированы научные проблемы, цель работы, осуществлена постановка задач, исследованы и разработаны выносимые на защиту модели, методики, и закономерности. Основными соавторами опубликованных работ являются научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Голосов Д. А., канд. техн. наук, доцент Завадский С. М., канд. техн. наук Мельников С. Н. В совместно опубликованных работах автор осуществлял постановку целей и задач исследований, принимал непосредственное участие в исследованиях, интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Соавторы оказывали помощь в изготовлении отдельных элементов оборудования, выполнении компьютерных расчетов, обсуждении результатов. Соавторам принадлежат результаты, не вошедшие в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Апробация работы проводилась в Центре 9.1 «Электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур» (г. Минск, РБ). Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на XIV международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики – 2017) (2017 г., С-Петербург, РФ), 12-ой и 13-ой международных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (2017 г., 2019 г., Минск, РБ), 1-ой международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ электроника – 2018» (2018 г., Минск, РБ), 8-ой международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники (Мокеровские чтения) (2017 г., Москва, РФ). Полученные в диссертационной работе результаты использованы ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, РБ).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах (2,7 авторского листа), 5 статей в материалах международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 156 страниц, из них 128 страниц основного текста, 125 рисунков и 8 таблиц на 89 страницах, библиографический список из 164 наименований, включая 10 работ соискателя, на 13 страницах, и 1 приложение на 1 странице.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен анализ свойств, методов получения и применения тонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью. На основе анализа состояния современного развития микроэлектроники показано, что переход к меньшим технологическим нормам требует использования новых материалов с более высокими по сравнению с SiO_2 значениями диэлектрической проницаемости (так называемые *high-k* диэлектрики). Применение *high-k* диэлектрика в качестве подзатворного диэлектрика МДП транзистора позволяет увеличить его толщину при сохранении порогового напряжения, обеспечивая снижение тока утечки. Анализ литературных данных показывает, что для использования в качестве *high-k* диэлектрика в кремниевых МДП приборах наиболее перспективными являются оксид гафния HfO_2 , оксид циркония ZrO_2 , оксид тантала Ta_2O_5 и оксид титана TiO_2 . При этом аморфные *high-k* диэлектрики обладают улучшенными диэлектрическими свойствами, по сравнению с сильной кристаллической фазой. Анализ методов формирования пленок *high-k* диэлектриков показал, что один из наиболее перспективных способов получения аморфных диэлектриков является реактивное магнетронное распыление. Однако, несмотря на большой научный и практический интерес, отсутствуют данные о диэлектрических свойствах пленок *high-k* диэлектриков, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. Также практически отсутствуют сведения о возможности формирования данным методом сверхтонких пленок *high-k* диэлектриков и их электрофизических характеристиках. Прежде всего, это связано с тем, что до настоящего времени отсутствуют методики, позволяющие обоснованно провести корректный выбор основных параметров процесса реактивного распыления из-за их сложной взаимосвязи. Сделано предположение, что использование процессов высоковакуумного распыления позволит значительно уменьшить гистерезис характеристик и сделать процесс реактивного распыления более контролируемым. Также контролируемость процесса может быть улучшена за счет использования метода ОЭС плазмы, который является эффективным

инструментом для исследования и контроля процессов реактивного распыления. На основе проведенного обзора определены проблемы и сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальному оборудованию для нанесения и диагностики характеристик тонкопленочных МДП структур на основе *high-k* диэлектриков. Для реализации процессов формирования МДП структур разработан комплекс экспериментального оборудования, который позволял наносить пленки металлов и их оксидов методами магнетронного, реактивного магнетронного и ионно-лучевого распыления (рисунок 1). Для нанесения пленок *high-k* диэлектриков при пониженных давлениях применена оригинальная высоковакуумная MPC MARS.011-80 с мишенью \varnothing 80 мм, которая способна работать при пониженных до 0,04 Па давлениях. Для анализа и контроля процессов реактивного распыления методом ОЭС плазмы применен оптический эмиссионный спектрометр видимого и ближнего ИК излучения *SL 40-2-2048 ISA* (Солар ТИИ, РБ). Использование оптического эмиссионного спектрометра позволило по спектрам излучения плазмы определять физические процессы и явления при реактивном распылении, что значительно облегчило выбор параметров процесса нанесения пленок.

Для измерения диэлектрических характеристик сформированных МДП структур разработан диагностический комплекс, в состав которого вошли модуль измерений диэлектрических характеристик и модуль контроля вольт-амперных характеристик. Разработанный комплекс позволял измерять такие характеристики конденсаторных структур как емкость, тангенс угла диэлектрических потерь, комплексное сопротивление на частотах от 25 Гц до 1,0 МГц, зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь от частоты, тока утечки, пробивного напряжения и

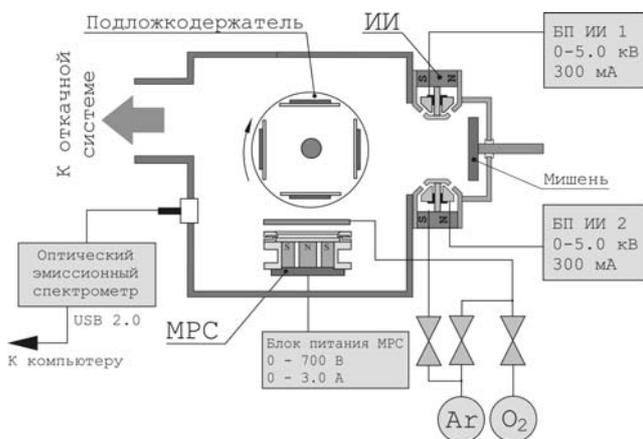


Рисунок 1. – Схема установки для нанесения тонкопленочных структур методами магнетронного и ионно-лучевого распыления

емкости конденсаторной структуры от напряжения постоянного смещения.

В **третьей главе** приведены результаты исследований разрядных характеристик MPC и спектров ОЭС плазмы при реактивном магнетроном распылении Ta, Ti, Hf, Zr мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов. На основе анализа спектров ОЭС плазмы, разрядных и эмиссионных характеристик MPC установлено, что при использовании высоковакуумного распыления и высоких скоростях

откачки на зависимостях напряжения разряда (рисунок 2) и интенсивности контрольных эмиссионных линий практически отсутствует гистерезис характеристик (рисунок 3). Это позволяет стабилизировать процесс реактивного распыления без использования систем обратной связи.

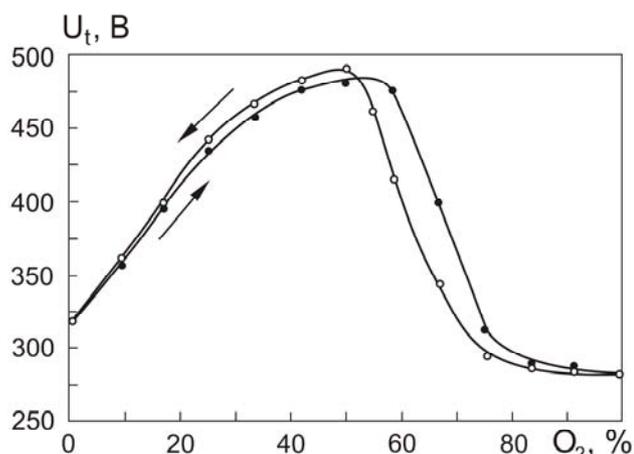


Рисунок 2. – Зависимость напряжения разряда от процентного содержания кислорода при распылении Ta мишени в Ar/O₂ смеси газов

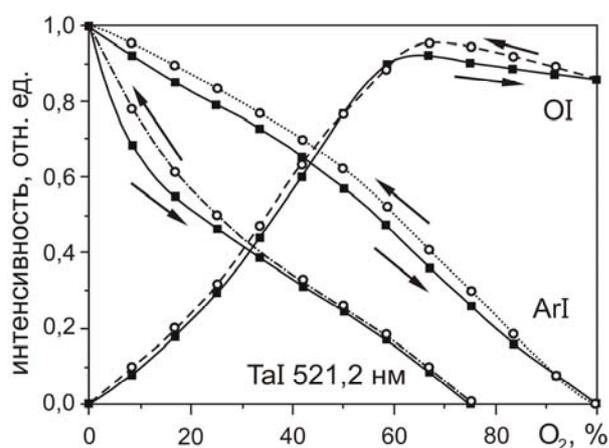


Рисунок 3. – Изменение интенсивности линий TaI (521,2 нм), ArI (811,5 нм) и OI (777,1 нм) при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Показано, что ОЭС плазмы магнетронного разряда является эффективным методом контроля процесса реактивного распыления и позволяет точно поддерживать соотношения скорости нанесения металла и кислорода за счет поддержания заданных интенсивностей линий оптического излучения материала мишени и кислорода. Область концентраций кислорода в Ar/O₂ смеси газов, при которой происходит переход в переходной и реактивный режимы процесса и формирование диэлектрических пленок оксидов, определяется энтальпией образования оксида из исходного металла. Чем выше энтальпия образования оксида, тем при большей концентрации кислорода происходит переход в переходной и реактивный режим процесса, и для формирования диэлектрических пленок оксидов требуются большие концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов (таблица 1). Так при реактивном распылении титана, имеющего энтальпию образования оксида $\Delta H = -943,9$ кДж/моль переход в реактивный режим процесса осуществляется при $\Gamma_{O_2} = 15$ %, тогда как для оксида тантала, имеющего энтальпию образования соединения $\Delta H = -2047,0$ кДж/моль осуществляется при концентрациях кислорода более 70 %. На основе полученных экспериментальных данных предложена методика контроля и управления процессом магнетронного распыления, основанная на использовании

высоковакуумного магнетронного распыления в сочетании с ОЭС плазмы, позволяющая воспроизводимо наносить пленки оксидов.

Таблица 1. – Энтальпия образования оксидов из исходных металлов и концентрация кислорода, при которой происходит переход в реактивный режим процесса

Оксид	Стандартная энтальпия образования (298 К), ΔH , кДж/моль	Γ_{O_2} (реактивный режим), %
HfO ₂	-1117,5	27,5
ZrO ₂	-1100,6	25
TiO ₂	-943,9	15
Ta ₂ O ₅	-2047,0	70

В четвертой главе представлены результаты исследований структурно-фазовых, оптических и диэлектрических свойств пленок оксидов Ti, Zr, Hf, Ta, полученных методом реактивного магнетронного распыления. Установлено, что при реактивном распылении формируются аморфные пленки *high-k* диэлектриков. Проведенные исследования показали, что оптические и диэлектрические характеристики пленок оксида титана имеют сильную зависимость от концентрации кислорода в смеси Ar/O₂ рабочих газов в процессе нанесения. При концентрациях кислорода 10 – 15 % формировались пленки с высокими значениями диэлектрической проницаемости более 80 (рисунок 4). Однако эти пленки имели высокие значения диэлектрических потерь и токов утечки. При концентрации кислорода 22 – 24 % получены пленки с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20 - 30$, $\text{tg}\phi = 0,02$, плотностью токов утечки менее 0,1 А/см² при $E = 2,0 \times 10^6$ В/см и $E_g = 3,82$ эВ.

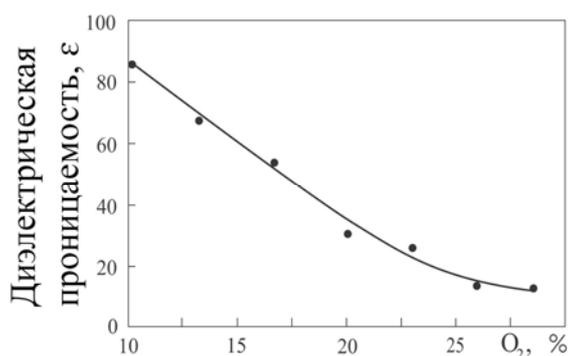


Рисунок 4. – Зависимость диэлектрической проницаемости пленок оксида титана от содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов

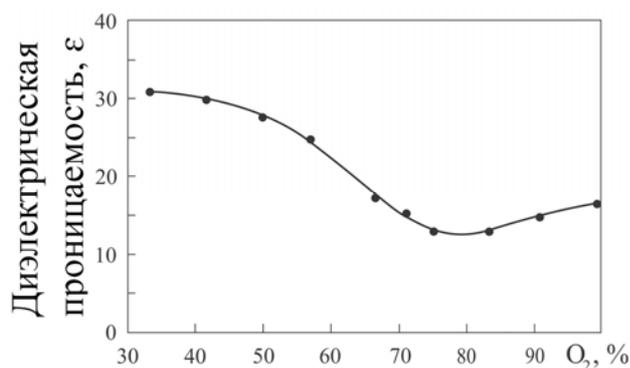


Рисунок 5. – Зависимость диэлектрической проницаемости пленок оксида тантала от содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Нанесенные пленки оксида циркония характеризовались сравнительно хорошими диэлектрическими характеристиками. При концентрации кислорода 14 – 20 % получены пленки оксида циркония с $\epsilon = 9 - 12$, $\text{tg}\phi = 0,05 - 0,08$ и $E_g = 5,67 - 5,87$ эВ. Формирование диэлектрических пленок оксида тантала,

в отличие от других исследуемых оксидов, происходило при концентрации кислорода более 50 %. При Γ_{O_2} 50 – 100 % получены пленки с $\varepsilon = 12 – 30$ (рисунок 5), $\text{tg}\varphi = 0,01 – 0,055$, плотностью токов утечки менее 5×10^{-3} А/см² при напряженности электрического поля 10^6 В/см и $E_g = 4,5 – 4,85$ эВ. При увеличении концентрации кислорода в Ar/O₂ наблюдалось снижение ε , и увеличение E_g . Установлено, что пленки оксида гафния с хорошими диэлектрическими характеристиками формировались в сравнительно широком диапазоне Γ_{O_2} (примерно 12 – 20 %). Получены пленки оксида гафния с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 17 – 22$, $\text{tg}\varphi = 0,03 – 0,05$ и шириной запрещенной зоны 5,7 – 5,8 эВ (рисунок 6). При этом токи утечки не превышали 10^{-3} А/см при $E = 5 \times 10^5$ В/см.

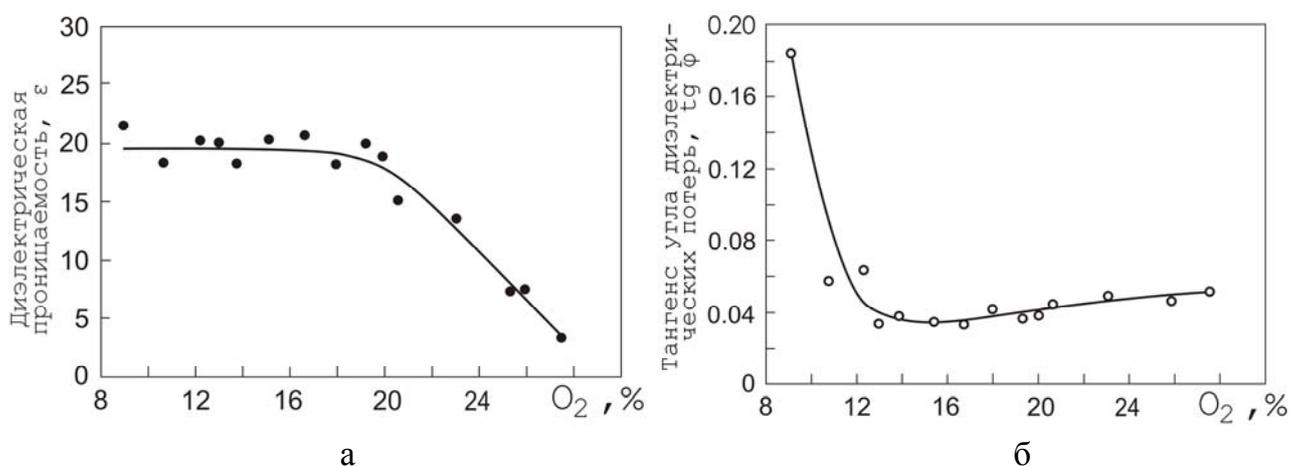


Рисунок 6. – Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок оксида гафния от процентного содержания кислорода в смеси Ar/O₂ рабочих газов

Установлены зависимости влияния параметров отжига на диэлектрические характеристики пленок *high-k* диэлектриков, показывающие, что при отжиге при температурах 200 – 600 °С пленки переходят из аморфного состояния в поликристаллическое. При этом наблюдается некоторое снижение ε и $\text{tg}\varphi$ особенно на высоких частотах. Так при отжиге аморфные пленки оксида гафния кристаллизуются, и формируется поликристаллическая пленка с моноклинной модификацией кристаллической структуры. При этом ε пленок снижается с 22 до 13. При температурах более 500 °С отмечено формирование смешанной моноклинной – тетрагональной фазы. При этом происходит увеличение диэлектрической проницаемости до 25 единиц и снижение токов утечки до 10^{-5} А/см² при напряженности электрического поля 2×10^6 В/см. Эти изменения диэлектрических характеристик необходимо учитывать при разработке технологических процессов изготовления МДП структур, поскольку после нанесения пленки *high-k* диэлектрика могут проводиться высокотемпературные процессы.

Сравнение диэлектрических свойств исследуемых оксидов (таблица 2) показывает, что сильная зависимость характеристик пленок оксида титана от параметров процесса нанесения, высокие токи утечки и низкие значения ширины запрещенной зоны ограничивают использование оксида титана в качестве единственного диэлектрика в МДП приборах. Оксиды циркония, тантала и гафния имеют примерно одинаковые диэлектрические свойства, и полученные характеристики позволяют использовать пленки этих оксидов в качестве диэлектрика в интегральных МДП транзисторах и конденсаторах. Однако из исследуемых *high-k* диэлектриков стоит выделить оксид гафния, который обладает наилучшим сочетанием диэлектрических свойств.

Таблица 2. – Сравнение характеристик наносимых методом реактивного магнетронного распыления пленок *high-k* диэлектриков

Материал	ϵ	$\text{tg}\varphi$	$J_L, \text{A}/\text{cm}^2$ (при $E = 10^6 \text{ В}/\text{см}$)	$E_g, \text{эВ}$	Скорость нанесения при $I_t = 1,5 \text{ А}$, нм/с
TiO_2	12 – 30 (80)	0,02 (1 кГц) 0,16 – 0,2 (1 МГц)	10^{-1}	3,82	0,05
ZrO_2	9 – 11	0,02 (1 кГц) 0,08 (1 МГц)	10^{-3}	5,82 – 5,87	0,2 – 0,4
Ta_2O_5	12 – 30	0,01 – 0,055	5×10^{-3}	4,5 – 4,85	0,12
HfO_2	17 – 22	0,02 – 0,04	10^{-3}	5,75 – 5,8	0,8

В пятой главе приведены результаты исследований процессов формирования сверхтонких пленок *high-k* диэлектриков на подложках диаметром 200 мм. Для повышения равномерности толщины слоев оксидов предложена конфигурация системы нанесения пленок на вращающуюся подложку при смещении оси подложки относительно оси магнетрона. На основе результатов моделирования, с использованием полученных данных об угловом распределении распыленных частиц и коэффициенте распыления оксидов гафния и тантала, установлено, что при расстоянии мишень – подложка 125 мм и смещении оси подложки 100 мм могут быть получены покрытия с неравномерностью толщины $\pm 0,93 \%$. На основе экспериментальных исследований установлено, что при нанесении пленок оксида тантала на вращающуюся Si подложку диаметром 200 мм, расстоянии мишень – подложка 120 мм и смещении оси подложки 100 мм получены пленки с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4 \%$ (рисунок 7). Некоторая неравномерность емкости и диэлектрических потерь, по-видимому, связаны с эффектами ионной бомбардировки растущей пленки. Методом реактивного магнетронного распыления получены сверхтонкие пленки оксидов гафния и

тантала. Установлено, что пленки имеют низкую шероховатость поверхности и высокую сплошность даже при малой толщине пленки (рисунок 8). Установлено, что при уменьшении толщины пленок оксида гафния с 98,6 нм до 13,7 нм наблюдается снижение их плотности с 9,44 до 9,26 г/см². При этом ϵ снижается с 20 до 6,5, и $\text{tg}\phi$ увеличивается, особенно на высоких частотах. Также при уменьшении толщины наблюдается увеличение плотности токов утечки при низкой напряженности электрического поля.

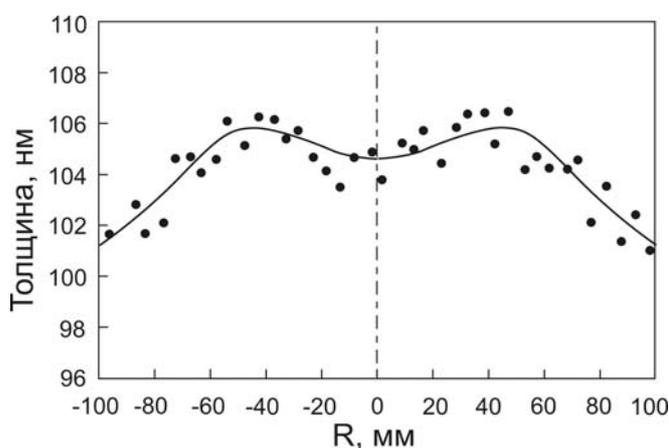


Рисунок 7. – Профиль распределения толщины пленки оксида тантала

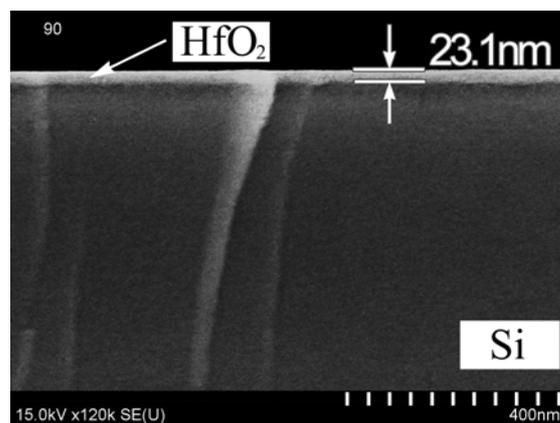


Рисунок 8. – СЭМ изображение поперечного среза пленки оксида гафния

При уменьшении толщины пленок оксида тантала, также как для пленок оксида гафния, отмечалось снижения значений ϵ , увеличение тока утечки и диэлектрических потерь на высоких частотах (рисунок 9). При толщине пленки 6 нм значения диэлектрической проницаемости уменьшались до 4,5. При этом $\text{tg}\phi$ на высоких частотах увеличился до 0,28. Сделано предположение, что уменьшение диэлектрической проницаемости пленок не связано со свойствами материала и является следствием размерных эффектов. В *high-k* диэлектриках доминирующим механизмом поляризации является ионная поляризация. Однако в конденсаторе на границах с контактами механизм ионной поляризации может нарушаться, что связано с изменением структуры пленки. Это приводит к уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости, и этот эффект особенно выражен в сверхтонких пленках. С использованием полученных экспериментальных данных о диэлектрических характеристиках наносимых слоев проведено моделирование и сравнение электрических характеристик *n*-канальных МДП транзисторов при использовании в качестве подзатворного диэлектрика стандартного диоксида кремния и при его замене на оксиды тантала и гафния. При моделировании в качестве базовых использовались стандартная структура и технологический маршрут

формирования *n*-канального МДП транзистора с поликремниевым затвором, выполненного по проектным нормам 0,35 мкм.

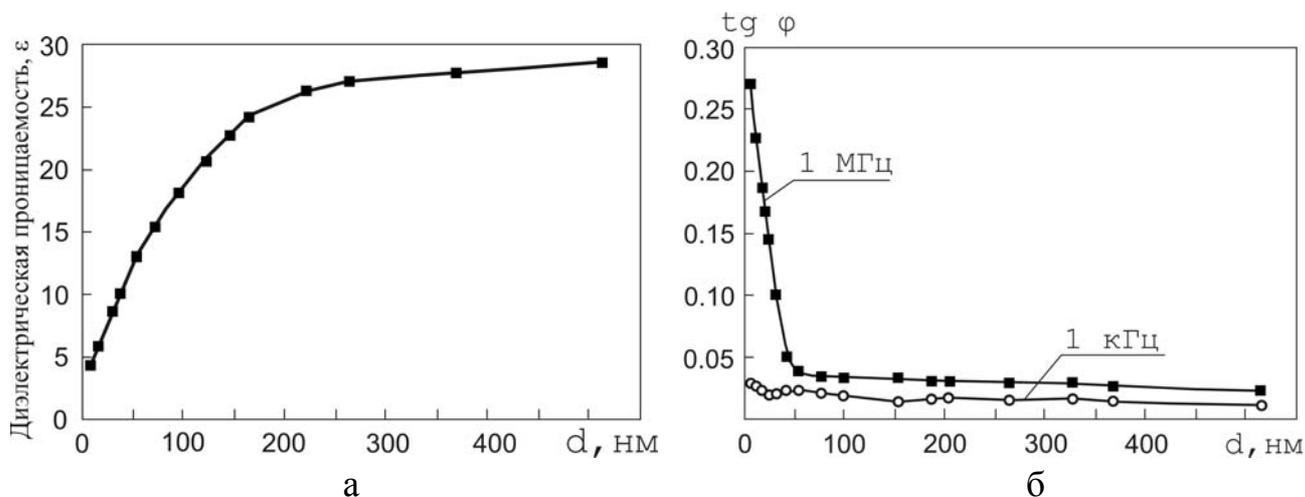


Рисунок 9. – Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок оксида тантала от толщины

На основе результатов моделирования установлено, что замена в подзатворном диэлектрике оксида кремния на оксид гафния позволяет увеличить толщину подзатворного диэлектрика с 13 до 65 нм при сохранении основных электрических характеристик МДП транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе анализа разрядных характеристик МРС и спектров ОЭС плазмы при реактивном распылении Ti, Zr, Ta, Hf мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов установлено, что при использовании высоковакуумного магнетронного распыления и высоких скоростях откачки на зависимостях напряжения разряда и интенсивности эмиссионных линий металлов и рабочих газов практически отсутствует гистерезис характеристик. Это позволяет стабилизировать процесс реактивного распыления без использования систем обратной связи. Установлено, что область концентраций кислорода в Ar/O₂ смеси газов, при которой происходит переход в переходной и реактивный режимы процесса и формирование диэлектрических пленок оксидов, определяется энтальпией образования оксида из исходного металла. Чем выше энтальпия образования оксида, тем при большей концентрации кислорода происходит переход в переходной и реактивный режимы процесса, и для формирования диэлектрических пленок оксидов требуются большие концентрации O₂. Так при реактивном распылении титана, имеющего энтальпию образования оксида $\Delta H = -943,9$ кДж/моль переход в реактивный режим процесса осуществляется при $\Gamma_{O_2} = 15\%$, тогда как для оксида

тантала, имеющего энтальпию образования соединения $\Delta H = -2047,0$ кДж/моль осуществляется при концентрациях кислорода более 70 % [1, 2, 3, 5, 6, 8].

2. Установлены зависимости структуры, оптических, физических и диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, токов утечки, ширины запрещенной зоны) пленок оксидов титана, циркония, тантала, гафния от параметров процесса реактивного магнетронного распыления. Установлено, метод реактивного магнетронного распыления металлических мишеней в Ar/O₂ смеси газов применим для получения аморфных пленок оксидов *high-k* диэлектриков. Сравнительный анализ полученных диэлектрических характеристик пленок исследуемых оксидов показал, что наилучшими характеристиками, с точки зрения использования в качестве диэлектрических слоев МДП ИС, обладают пленки аморфного оксида гафния. Без нагрева подложек и последующего отжига получены пленки оксида гафния с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 17 - 22$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\varphi = 0,03 - 0,05$ и шириной оптической запрещенной зоны нанесенных пленок составляла 5,7 – 5,8 эВ. При этом токи утечки не превышали 10^{-3} А/см при $E = 5 \times 10^5$ В/см [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8].

3. Установлены зависимости влияния параметров отжига на диэлектрические характеристики пленок *high-k* диэлектриков, показывающие, что при отжиге при температурах 200 – 600 °С пленки переходят из аморфного состояния в поликристаллическое. При этом наблюдается некоторое снижение диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь особенно на высоких частотах. Так при отжиге аморфные пленки оксида гафния кристаллизуются, и формируется поликристаллическая пленка с моноклинной модификацией кристаллической. При этом диэлектрическая проницаемость пленок снижается с 22 до 13 единиц. При температурах более 500 °С отмечено формирование смешанной моноклинной – тетрагональной фазы. При этом происходит увеличение диэлектрической проницаемости до 25 единиц и снижение токов утечки до 10^{-5} А/см² при напряженности электрического поля 2×10^6 В/см. Эти изменения диэлектрических характеристик необходимо учитывать при разработке технологических процессов изготовления МДП структур, поскольку после нанесения пленки *high-k* диэлектрика могут проводиться высокотемпературные процессы [9].

4. Для повышения равномерности толщины наносимых слоев *high-k* диэлектриков на подложки \varnothing 200 мм предложена конфигурация процесса нанесения пленок на вращающуюся подложку при смещении оси подложки относительно оси магнетрона. При расстоянии мишень – подложка 120 мм и смещении оси подложки 100 мм получены пленки оксида тантала с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4$ %. При этом неравномерность

распределения емкости и диэлектрических потерь по площади подложки составила менее $\pm 18\%$ [5].

5. Установлено, что нанесенные методом реактивного магнетронного распыления сверхтонкие пленки оксидов гафния и тантала имеют высокую сплошность и низкую шероховатость поверхности. Однако при уменьшении толщины пленок оксида гафния с 98 нм до 13 нм наблюдалось снижение диэлектрической проницаемости с 20 до 6,5 единиц, увеличение плотности токов утечки при низкой напряженности электрического поля и диэлектрических потерь, особенно на высоких частотах. Такое же поведение отмечено для пленок оксида тантала. При уменьшении толщины пленки до 6 нм диэлектрическая проницаемость оксида тантала уменьшалась с 28 до 4,5 единиц. При этом диэлектрические потери на высоких частотах увеличились до 0,28. Сделано предположение, что ухудшение характеристик пленок является следствием изменения структуры пленки и нарушения механизма ионной поляризации на границах с контактами конденсатора [4, 10].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты, и в частности, предложенные МДП структуры и технологические приемы нанесения аморфных сверхтонких пленок *high-k* диэлектриков методом реактивного магнетронного распыления, могут быть использованы при разработке технологий изготовления современных МДП ИМС. Предложенная методика контроля и управления процессом магнетронного распыления, основанная на использовании высоковакуумного магнетронного распыления в сочетании с оптической эмиссионной спектроскопией плазмы и конфигурация процесса нанесения тонких пленок на вращающуюся подложку при смещении оси подложки относительно оси магнетрона могут быть использована для воспроизводимого и контролируемого нанесения широкой гаммы тонких пленок оксидов и нитридов методом реактивного магнетронного распыления на Si подложки диаметром до 200 мм.

Разработанные в диссертационной работе методы стабилизации процессов реактивного магнетронного распыления путем использования высоковакуумного распыления в сочетании с оптической эмиссионной спектроскопией плазмы применены при выполнении хозяйственной работы в БГУИР по заказу ОАО «ИНТЕГРАЛ» для контролируемого нанесения пленок оксида ванадия. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы при разработке технологического процесса формирования активных слоев интегральных неохлаждаемых микроболометрических матриц. Копия справки о практическом использовании результатов диссертационной работы приведена в диссертации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Диэлектрические характеристики пленок оксида гафния / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Н. Вилья // Российские нанотехнологии. – 2017. – Т. 12, № 9–10. – С. 63–68.
2. Вилья, Н. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, Т. Д. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. – Т. 123, № 5. – С. 87–93.
3. Вилья, Н. Диэлектрические свойства пленок оксида тантала, нанесенных методам реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, Т. Д. Нгуен // Проблемы физики, математики и техники. – 2019. – Т. 39, № 2. – С. 15–20.
4. Influence of film thickness on the dielectric characteristics of hafnium oxide layers / D. A. Golosov, N. Vilya, S. M. Zavadski, S. N. Melnikov, A. V. Avramchuk, M. M. Grekhov, N. I. Kargin, I. V. Komissarov // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 690. – P. 137517 (6 Pages).
5. Формирование пленок оксида тантала на подложках диаметром 200 миллиметров / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, Т. Д. Нгуен, А. Д. Голосов, Э. Е. Литвин, Н. Н. Лам // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1. – С. 12–17.

Материалы конференций

6. Формирование пленок оксида гафния методом реактивного магнетронного распыления / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Н. Вилья // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017) : материалы XIV международной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая–02 июня 2017 г. / Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена ; ред.: В. Т. Аванесян [и др.]. – С-Петербург, 2017. – С. 328–330.
7. Исследование структуры и морфологии пленок оксида гафния, осажденных на кремнии методом реактивного магнетронного распыления / М. М. Грехов, Н. Вилья, А. В. Аврамчук, А. Б. Зимин, Д. А. Голосов, И. В. Комиссаров // Мокеровские чтения : материалы 8-й международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, Москва, 24 мая 2017 г. / Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ ; ред.: П. П. Мальцев [и др.]. – Москва, 2017. – С. 106–107.
8. Формирование пленок оксида циркония методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Д. Э. Окоджи // Взаимодействие излучений с твердым телом :

материалы 12-й международной конференции, Минск, 19–22 сентября 2017 г. / Изд. центр БГУ ; редкол.: В. В. Углов (отв.ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 438–440.

9. Влияние отжига на структуру и диэлектрические свойства пленок оксида гафния / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. М. Завадский, М. М. Грехов, В. В. Колос // Опто-, микро- и СВЧ электроника – 2018 : материалы 1-ой международной научно-технической конференции, Минск, 22–26 октября 2018 г. / Институт физики НАН Беларуси ; ред.: Н. С. Казака [и др.]. – Минск, 2018. – С. 296–299.

10. Влияние толщины на диэлектрические характеристики пленок оксида тантала на структурах метал-оксид-полупроводник / Н. Вилья, Д. А. Голосов, Х. Tian, Т. Д. Нгуен, С. Н. Мельников, С. М. Завадский // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-ой Международной конференции, Минск, 30 сентября–3 октября 2019 г. / Изд. центр БГУ ; редкол.: В. В. Углов (отв.ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 228–231.

Vella Donner

РЭЗІЮМЭ**Вілля Пінэда Номар Альберта****Фарміраванне тонкаплёнкавых ізалявальных
слаёў з высокай дыэлектрычнай пранікальнасцю для інтэгральных
МДП структур рэактыўным магнетронным распыленнем**

Ключавыя словы: тонкія плёнкі, high-k дыэлектрыкі, рэактыўнае магнетроннае распыленне, подзатворны дыэлектрык, МДП структуры

Мэта працы: усталяванне заканамернасцяў і распрацоўка метадаў рэактыўнага магнетроннага нанясення плёнак на аснове дыэлектрыкаў з высокай дыэлектрычнай пранікальнасцю, метадаў кантролю і кіравання іх фізічнымі ўласцівасцямі, якія вызначаюць магчымасць выкарыстання дадзеных плёнак у якасці дыэлектрычных слаёў сучасных МДП мікрасхем.

Метады даследванняў і апаратура: атамна-сілавая і сканавальная электронная мікраскапія, рэнтгенаўская дэфрактаметрыя, спектрафотаметрыя, эліпсаметрыя, стандартныя метадыкі даследавання ўласцівасцяў матэрыялаў.

Асноўныя вынікі: эксперыментальна ўсталяваны заканамернасці ўплыву параметраў працэсу рэактыўнага магнетроннага распылення і адпалу на ўласцівасці плёнак аксідаў Ti, Zr, Ta, Hf. Паказана, што выкарыстанне высоковакуумнага распылення дазваляе стабілізаваць працэс без выкарыстання сістэм зваротнай сувязі. Вобласць канцэнтрацый O₂, пры якой адбываецца фарміраванне дыэлектрычных плёнак, вызначаецца энталпіяй фарміравання аксіду з зыходнага металу. Найлепшымі характарыстыкамі, з пункту гледжання выкарыстання ў якасці дыэлектрыка МДП ІМС, валодаюць аморфныя плёнкі HfO₂ з $\epsilon = 17 - 22$, $\text{tg}\phi = 0,03 - 0,05$, $E_g = 5,7 - 5,8$ эВ і $J = 10^{-3}$ А/см². Пры адпале ў выніку крышталізацыі плёнак назіраецца зніжэнне ϵ і $\text{tg}\phi$, асабліва на высокіх частотах. Памяншэнне таўшчыні high-k дыэлектрыкаў прыводзіць да зніжэння ϵ , павелічэнню $\text{tg}\phi$ і токаў уцечкі, што з'яўляецца следствам парушэння механізму іённай палярызацыі на межах з кантактамі кандэнсатара. Пры нанясенні на вяртаемую падкладку $\varnothing 200$ мм атрыманы плёнкі аксіду тантала з нераўнамернасцю таўшчыні менш $\pm 2,4$ % і нераўнамернасцю размеркавання ёмістасці і дыэлектрычных страт менш ± 18 %. На аснове мадэлявання ўстаноўлена, што замена ў подзатворнага дыэлектрыку МДП транзістара аксіду крэмнія на аксід гафнія, дазваляе павялічыць таўшчыню дыэлектрыка з 13 да 65 нм пры захаванні асноўных электрычных характарыстык.

Ступень выкарыстання: вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы тэхналагічных працэсаў рэактыўнага магнетроннага нанясення плёнак аксідаў.

Галіна ўжывання: мікра- і нанаэлектроніка, мікраэлектрамеханічныя сыстэмы.

РЕЗЮМЕ**Вилья Пинедо Номар Альберто****Формирование тонкопленочных изолирующих слоев с высокой диэлектрической проницаемостью для интегральных МДП структур реактивным магнетронным распылением****Ключевые слова:** тонкие пленки, high-k диэлектрики, реактивное магнетронное распыление, подзатворный диэлектрик, МДП структуры**Цель работы:** установление закономерностей и разработка методов реактивного магнетронного нанесения пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, методов управления их физическими свойствами, которые определяют возможность использования данных пленок в качестве диэлектрических слоев современных МДП микросхем.**Методы исследования:** атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, спектрофотометрия, эллипсометрия, стандартные методики исследования свойств материалов.**Основные результаты:** экспериментально установлены закономерности влияния параметров процесса реактивного магнетронного распыления и отжига на свойства пленок оксидов Ti, Zr, Ta, Hf. Показано, что использование высоковакуумного распыления позволяет стабилизировать процесс без использования систем обратной связи. Область концентраций O₂, при которой происходит формирование диэлектрических пленок, определяется энтальпией образования оксида. Наилучшими характеристиками, с точки зрения использования в качестве диэлектрика МДП ИМС, обладают аморфные пленки HfO₂ с $\epsilon = 17 - 22$, $\text{tg}\phi = 0,03 - 0,05$, $E_g = 5,7 - 5,8$ эВ и $J = 10^{-3}$ А/см². При отжиге в результате кристаллизации пленок наблюдается снижение ϵ и $\text{tg}\phi$, особенно на высоких частотах. Уменьшение толщины high-k диэлектриков приводит к снижению ϵ , увеличению $\text{tg}\phi$ и J, что является следствием нарушения механизма ионной поляризации на границах с контактами конденсатора. При нанесении на вращающуюся подложку Ø 200 мм получены пленки оксида тантала с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4$ % и неравномерностью распределения емкости и $\text{tg}\phi$ менее ± 18 %. На основе моделирования установлено, что замена в подзатворном диэлектрике МДП транзистора SiO₂ на оксид гафния, позволяет увеличить толщину диэлектрика с 13 до 65 нм при сохранении основных электрических характеристик.**Степень использования:** результаты исследований использованы при разработке технологических процессов реактивного магнетронного нанесения пленок оксидов.**Область применения:** микро- и наноэлектроника, микроэлектромеханические системы.

SUMMARY

Villa Pineda Nomar Alberto

Formation of insulating thin films with high permittivity for MIS structures by reactive magnetron sputtering

Key words: thin films, high-k dielectrics, reactive magnetron sputtering, gate insulator, MIS structures

The aim of the work: to establish patterns and develop methods for reactive magnetron deposition of films based on dielectrics with high dielectric constant, methods for monitoring and controlling their physical properties that determine the possibility of using these films as dielectric layers of modern MIS chips.

Research method and equipment: atomic force and scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, spectrophotometry, ellipsometry, standard methods for studying the properties of materials.

Main results: The regularities of the influence of the parameters of the process of reactive magnetron sputtering and annealing on the properties of films of Ti, Zr, Ta, and Hf oxides are experimentally established. It is shown that the use of high-vacuum spraying makes it possible to stabilize the process without the use of feedback systems. The range of O₂ concentrations at which the formation of dielectric films occurs is determined by the enthalpy of oxide formation from the starting metal. Amorphous HfO₂ films with $\epsilon = 17 - 22$, $\text{tg}\phi = 0,03 - 0,05$, $E_g = 5,7 - 5,8$ eV and $J = 10^{-3}$ A/cm² possess the best characteristics from the point of view of using MIS ICs as an insulator. During annealing as a result of crystallization of the films, a decrease in ϵ and $\text{tg}\phi$ is observed, especially at high frequencies. A decrease in the thickness of high-k dielectrics leads to a decrease in ϵ , an increase in $\text{tg}\phi$ and leakage currents, which is a consequence of the violation of the ion polarization mechanism at the boundaries with the contacts of the capacitor. When applied to a rotating substrate of \varnothing 200 mm, tantalum oxide films were obtained with uneven thickness less than $\pm 2,4\%$ and uneven distribution of capacitance and dielectric loss less than $\pm 18\%$. Based on the simulation, it was found that replacing a silicon oxide transistor with a hafnium oxide in a gate dielectric of a MIS allows increasing the thickness of the dielectric from 13 to 65 nm while maintaining the basic electrical characteristics.

Degree of use: the research results were used in the development of technological processes of reactive magnetron deposition of oxide films.

Area of application: micro- and nanoelectronic, micro electrical mechanical systems.

Научное издание

ВИЛЬЯ ПИНЕДА
Номап Альберто

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ
СЛОЕВ С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ
ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МДП СТРУКТУР РЕАКТИВНЫМ
МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Подписано в печать 22.08.2018.	Формат 60×84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014
220013, Минск, П. Бровки, 6