

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.2.049.77: 621.793

Нгуен Ван Ту Ань

Исследование влияния газовой среды при реактивном магнетронном
распылении на распределение электрофизических свойств и
толщины пленок оксидов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-36 80 08 «Инженерная геометрия и компьютерная графика»

Научный руководитель
Голосов Дмитрий Анатольевич
доцент кафедры ЭТТ
доцент, кандидат технических наук

Минск 2023

ВВЕДЕНИЕ

Технология материалов электронной техники родилась одновременно с появлением первых электронных приборов [1]. Тенденции развития мирового рынка электронной техники, а также экономические аспекты полупроводникового производства ведут к увеличению степени интеграции полупроводниковых приборов на поверхности подложек. Степень интеграции в свою очередь напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве пластин, так и с уменьшением геометрических размеров полупроводниковых приборов на их поверхности [2].

Чтобы преодолеть предел масштабирования размеров микроэлектронных устройств, диэлектрические материалы на основе кремния должны быть заменены передовыми материалами с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k). Поэтому произошло большое спрос в последнее время на альтернативные диэлектрики подзатвора [3–5]. Среди high-k такие материалы, как ZrO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 , Y_2O_3 , оксиды металлов TiO_2 , Ta_2O_5 является одним из наиболее перспективных кандидатов на замену SiO_2 в качестве памяти диэлектрик в накопительных конденсаторах, так как он имеет отличное ступенчатое покрытие характеристики, высокая диэлектрическая проницаемость более 20 (в зависимости от условия во время роста), высокое поле пробоя, относительно низкое токи утечки приводят к высоким аккумулирующим зарядам и химическим стабильная структура [4–9].

Уникальные свойства пленок оксидов находят все более широкое применение оптике, оптоэлектронике, фотовольтаике, устройствах хранения и преобразования энергии, катализаторах, датчиках и т.д. Улучшение функциональных свойств пленок оксидов в настоящее время в основном происходит за счет расширения их спектра и усложнения состава. Однако практика показывает, что свойства таких материалов крайне чувствительны к элементному составу и структурному устройству. Это предъявляет жесткие требования к процессу формирования пленок сложных оксидов.

Существует несколько способов получения оксидов, таких как химический методы осаждения из паровой фазы, напыление, испарение, золь-гель методы, атомно-слоевое осаждение, ионно-активированное осаждение, лазерное оксидирование слоя [8,9]. Метод изготовления сильно влияет на структуру и электрические свойства выращенных оксидных слоев [9].

Для формирования пленок оксидов большие перспективы имеет метод реактивного магнетронного распыления. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения пленок, их высокую химическую чистоту, плотность и адгезию к подложке. За прошедшее время с его помощью научились наносить пленки различных сплавов металлов, полупроводников и диэлектриков, используя сложные по составу или конструкции мишени. Следующим этапом развития этого способа стал способ реактивного магнетронного распыления (РМР) [10].

Использование магнетронных источников распыления для проведения реактивных процессов нанесения тонких пленок – самый популярный способ осуществления этих процессов. Техника реактивного магнетронного распыления в настоящее время настолько глубоко исследована и усовершенствована, что ее применение не требует высокого искусства от технолога и разработчика напылительного оборудования, позволяя следовать уже установленным рекомендациям.

Целью магистерской диссертации являлось установление влияния параметров процессов реактивного магнетронного распыления на электрофизические характеристики пленок оксидов и определение наиболее технологически эффективных режимов формирования пленок оксидов с точки зрения получения равномерных профилей распределения при максимальной скорости нанесения и минимальном затрата материалов для оптимизации процессов формирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации:

Одной из самых актуальных проблем современной микроэлектроники является внедрение в технологические процессы новых материалов. Одной из таких групп материалов являются сложные многокомпонентные оксиды, представляющие собой интересное семейство материалов, которые в зависимости от состава и структуры обладают уникальными свойствами. Примерами являются пленки с эффектом гигантского магнетосопротивления, высокотемпературные сверхпроводники, сегнетоэлектрики, магнитные пленки, твердые электролиты, и т.д. Такие материалы в настоящее время начинают применяться в современных интегральных схемах в качестве функциональных слоев элементов памяти, МОП транзисторов, конденсаторных и резистивных структур, интегральных датчиков (сенсоров) и источников питания, а также диффузионно-барьерных и покровных слоев.

Цель работы:

Целью работы является разработка методов реактивного магнетронного формирования пленок оксидов, изучение зависимости состава, электрофизических и оптических свойств пленок от условий синтеза.

Задачи исследования:

- исследовать процессы реактивного магнетронного нанесения пленок оксидов;
- исследовать влияние параметров процесса реактивного магнетронного распыления на распределение электрофизических свойств и толщины пленок оксидов;
- провести моделирование профилей распределения толщины наносимых покрытий для прогнозирования процесса нанесения пленок оксидов;
- разработать методику контролируемого нанесения тонких пленок оксидов методом реактивного магнетронного распыления.

Объект исследования: элементный состав, структура, оптические и электрические свойства пленок оксидов.

Предмет исследования: тонкие пленки оксидов, процессы реактивного магнетронного распыления.

Научная новизна диссертации заключается в анализе особенностей формирования тонких пленок оксидов при реактивном магнетронном распылении и влияния параметров процесса реактивного распыления на свойства наносимых пленок.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составил 84,07%. Заимствования, самоцитирования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Библиографическом списке».

Основные положения, выносимые на защиту

1. При реактивном распылении тантала образование диэлектрических пленок оксида тантала происходит при сравнительно больших содержаниях кислорода в Ar/O₂ смеси газов (более 40 %). При концентрации кислорода 50 – 100 % получены пленки с диэлектрической проницаемостью 12 – 30 единиц, тангенсом угла диэлектрических потерь 0.01, плотностью токов утечки менее 0.1 А/см² при напряженности электрического поля 2.0×10⁶ В/см и шириной запрещенной зоны 4.5 – 4.85 эВ.

2. При нанесении на вращающуюся подложку и концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов 20,8 % получены пленки оксида циркония с разбросом диэлектрической проницаемости по площади подложки от 13 до 18 и тангенс угла диэлектрических потерь 0,01 – 0,02 на частоте 1 кГц и 0,08 – 0,11 на частоте 1 МГц.

3. Установлено, что увеличение расстояния смещения оси подложки относительно оси магнетрона позволяет увеличить равномерность толщины наносимых слоев при снижении скорости нанесения. На основе полученных экспериментальных данных разработана модель процесса магнетронного нанесения слоев при вращении подложек. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность модели не превышает 10 %. Таким образом, представленная модель может быть использована для прогнозирования профилей распределения толщины слоев при магнетронном нанесении на вращающуюся подложку.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на республиканской научно-технической конференции студентов, аспирантов молодых учёных «Интеллектуальные системы» 2022; 59-й научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2023.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 3 печатных работ, из них 3 доклада в материалах научных конференций, 2 статьи в периодическом научном журнале.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются процессы при реактивном магнетронном нанесении пленок оксидов.

Во второй главе проведена модернизация исследовательского и диагностического оборудования для нанесения и анализа свойств пленок оксидов.

В третьей главе проведено исследование процессов реактивного магнетронного распыления нанесении пленок оксида тантала.

В четвертой главе проведено исследование процессов реактивного магнетронного распыления нанесении пленок оксида циркония.

В пятой главе проведено моделирование профили распределения толщины нанесенных пленок на вращающуюся подложку при магнетронном распылении Ti мишени.

Общий объем диссертации составляет 79 страниц включая 36 иллюстрации, 5 таблицы, библиографический список из 25 наименований, список собственных публикаций соискателя из 2 наименования и 2 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены современное состояние развития мирового рынка электронной техники и полупроводникового производства, преимущества применения high-k диэлектрических материалов и перспективы метода реактивного магнетронного распыления, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** проведен анализ методов получения пленок оксидов. Установлено, что реактивное магнетронное распыление находит множество преимуществ используемых для нанесения пленок оксидов: высокая скорость нанесения, низкая температура подложки, простота аппаратуры, низкий уровень радиационных дефектов и отсутствие перегрева подложек; малая степень загрязненности пленок посторонними газовыми включениями; разнообразие форм распыляемых мишеней. На основе анализа процессов при реактивном магнетронном нанесении пленок оксидов установлено, что параметры реактивного магнетронного распыления влияющие на структурно-фазовые и диэлектрические характеристики пленок оксидов являются давлением камеры и реактивного газа, составом смеси рабочих газов, током разряда магнетрона и напряжением разряда.

Во **второй главе** приводится описание экспериментального и диагностического оборудования для нанесения и анализа свойств пленок оксидов. Для нанесения пленок оксидов в работе использован метод реактивного магнетронного распыления металлических мишеней в среде Ar/O_2 рабочих газов. Для питания магнетрона применен биполярный асимметричный импульсный ток средней частоты (1 – 100 кГц). Определены методики оборудования измерения физико-электрических, диэлектрических, оптических характеристик высоты, глубины, профиля элементов микроструктур и толщины нанесенных пленок оксидов.

В **третьей главе** проведено исследование процессов реактивного магнетронного распыления нанесения пленок оксида тантала. При совместной газоподаче предпочтительным является диапазон концентраций кислорода от 37.5 до 60 %. При отдельной газоподаче область предпочтительных концентраций кислорода сдвигается в сторону более высоких концентраций кислорода (от 54.2 до 80 %). При концентрации кислорода 50 – 100 % получены пленки с диэлектрической проницаемостью 12 – 30 единиц, тангенсом угла диэлектрических потерь 0.01, плотностью токов утечки менее $0.1 \text{ A}/\text{cm}^2$ при

напряженности электрического поля 2.0×10^6 В/см и шириной запрещенной зоны 4.5 – 4.85 эВ.

В **четвертой главе** проведено исследование процессов реактивного магнетронного распыления нанесении пленок оксида циркония. Изменение профиля приводит к увеличению неравномерности скорости нанесения пленок при распылении Zr мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Однако распределение ε и tg ϕ по площади подложки довольно равномерно. Диэлектрическая проницаемость изменялась от 13,5 до 18 и более высокие значения получены в центре и на краях подложки. При нанесении на вращающуюся подложку и концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов 20,8 % получены пленки оксида циркония с разбросом диэлектрической проницаемостью по площади подложки от 13 до 18 и тангенс угла диэлектрических потерь 0,01 – 0,02 на частоте 1 кГц и 0,08 – 0,11 на частоте 1 МГц.

В **пятой главе** проведено моделирование профили распределения толщины нанесенных пленок на вращающуюся подложку при магнетронном распылении Ti мишени. Установлено, что увеличение расстояния смещения оси подложки относительно оси магнетрона позволяет увеличить равномерность толщины наносимых слоев при снижении скорости нанесения. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность модели не превышает 10 %. Таким образом, представленная модель может быть использована для прогнозирования профилей распределения толщины слоев при магнетронном нанесении на вращающуюся подложку.

В **заключении** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены основные установленные зависимости и полученные выводы, подведен итог проведенной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа методов получения пленок оксидов установлено, что реактивное магнетронное распыление находит множество преимуществ используемых для нанесения пленок оксидов. Улучшение стабильности процесса реактивного распыления и состава наносимых пленок при распылении составных мишеней возможно за счет уменьшения влияния реактивного газа (кислорода) на процессы распыления. Это может быть достигнуто за счет уменьшения парциального давления реактивного газа в зоне распыления. Такой эффект может быть получен при использовании процессов высоковакуумного магнетронного распыления и/или пространственного разделения процессов распыления и окисления пленок за счет отдельной подачи газов.

2. Установлено, что формирование диэлектрических пленок с высоким оптическим пропусканием и высокими скоростями нанесения как при совместной, так и отдельной газоподаче возможно в переходном режиме работы системы. Применение отдельной газоподачи не дает преимуществ в свойствах пленок. Однако при отдельной подаче газов минимизируется отравление поверхности мишени, что позволяет значительно уменьшить вероятность дугообразования и повысить стабильность процесса реактивного распыления.

3. Установлено, что при уменьшении толщины пленки наблюдается снижение диэлектрической проницаемости пленок и увеличение диэлектрических потерь на высоких частотах. При концентрации кислорода 50 – 100 % получены пленки Ta_2O_5 с диэлектрической проницаемостью 12 – 30 единиц, тангенсом угла диэлектрических потерь 0,01. При нанесении на вращающуюся подложку и концентрации кислорода 20,8 % получены пленки ZrO_2 с разбросом диэлектрической проницаемости по площади подложки от 13 до 18 и тангенс угла диэлектрических потерь 0,01 – 0,02 на частоте 1 кГц и 0,08 – 0,11 на частоте 1 МГц.

4. Установлено, что увеличение расстояния смещения оси подложки относительно оси магнетрона позволяет увеличить равномерность толщины наносимых слоев при снижении скорости нанесения. На основе полученных экспериментальных данных разработана модель процесса магнетронного нанесения слоев при вращении подложек. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность модели не превышает 10 %. Таким образом, представленная модель может быть использована для прогнозирования профилей распределения толщины слоев при магнетронном нанесении на вращающуюся подложку.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Нгуен, В.Т.А. Распределение электрофизических свойств пленок оксида циркония при реактивном магнетронном нанесении на вращающуюся подложку / В.Т.А. Нгуен, Т.Х. Доан, Р.И. Нестерчик // Сборник материалов 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 17-21 апреля 2023 г.: Электронные системы и технологии / Минск: БГУИР, 2023. – С.493–497.

2–А. Нгуен, В.Т.А. Магнетронная распылительная система с вращающейся магнитной системой для нанесения тонких пленок на стационарную подложку / В.Т.А. Нгуен // Сборник материалов 59-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 17-21 апреля 2023 г.: Электронные системы и технологии / Минск: БГУИР, 2023. – С. 1053-1056.