

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Доан Тхе Хоанг «Формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов реактивным магнетронным распылением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите

В представленной диссертационной работе Доан Тхе Хоанг «Формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов реактивным магнетронным распылением» были исследованы особенности физико-химических процессов контролируемого получения слоев двухкомпонентных оксидов методом высоковакуумного реактивного магнетронного распыления, исследован их элементный состав и электрофизические свойства, определяющие возможность использования данного класса пленок в качестве диэлектрических слоев современных интегральных схем.

Цели, задачи и объекты исследования вышеуказанной работы соответствуют паспорту специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

2. Актуальность темы диссертации

Разработка современных, высокопроизводительных, энергоэффективных интегральных схем связана с уменьшением их функциональных элементов, в частности толщины подзатворного диэлектрика. Причем свойства диоксида кремния в этом случае в полной мере не соответствуют выдвигаемым требованиям. Необходимо использовать новые пленочные материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью, в качестве которых наиболее перспективны легированные многокомпонентные материалы, на основе двойных и тройных оксидов. В этой связи, разработка научно обоснованных принципов формирования тонких пленок сложных оксидов с контролируемой структурой и свойствами, несомненно, является актуальной научно-технической задачей.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, которые выносятся на защиту диссертации

Научные результаты и выносимые на защиту научные положения диссертационной работы являются новыми. Наиболее значимыми среди них являются установленные и обоснованные зависимости напряжения разряда магнетрона и скорости нанесения пленок от концентрации кислорода в смеси газов аргона и кислорода при импульсном магнетронном распылении двухкомпонентных составных мишеней (Ti-Al, Ta-Al, Zr-Hf, Ti-Zr). Указанные зависимости определяются коэффициентами распыления и ионно-электронной

эмиссии этих металлов и их оксидов, площадью, занимаемой металлами на мишени, степени их покрытия оксидом;

Автором экспериментально установлено изменение относительного содержания металлов в пленке и профиля распределения скорости нанесения слоев при реактивном магнетронном распылении составных мишеней, как при совместной, так и при отдельной подаче газов в камеру, определение возможных механизмов данного изменения. Разработаны модели магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени, учитывающей распределение плотности ионного тока на мишени, коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии металлов и их оксидов. Проведена проверка представленной модели при распылении Ti-Al составных мишеней в среде аргона и смеси рабочих газов аргон-кислород. Установлены зависимости диэлектрических характеристик, ширины запрещенной зоны, тока утечки, пробивного напряжения пленок сложных оксидов TiAl, TiZr, TaAl, HfZr от параметров процесса магнетронного распыления и степени легирования. Определены оптимальные сочетания данных характеристик у пленки оксида гафния-циркония.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Представленные в диссертационной работе результаты научных исследований и практические рекомендации по их применению объективны и являются обоснованными, выводы аргументированы, вытекают из содержания проведенных исследований и отражают научные положения, сформулированные и представленные в работе. Достоверность результатов и выводов подтверждена публикациями, включенных в список ВАК по данной специальности.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость диссертационной работы заключается в получении новых знаний о закономерностях формирования тонких слоев сложных оксидов, формируемых при высоковакуумном импульсном магнетронном распылении двухкомпонентных составных мишеней. Разработке модели магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени, учитывающей распределение плотности ионного тока на мишени, коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии металлов и их оксидов.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в разработке методики воспроизводимого формирования тонких слоев сложных оксидов TiAl, TiZr, TaAl, HfZr с заданными диэлектрическими характеристиками, шириной запрещенной зоны, тока утечки, пробивного напряжения. Практическая реализация указанных приемов позволяет существенно расширить область применения процессов реактивного магнетронного распыления для формирования нового поколения интегральных схем.

Социально-экономическая значимость работы обусловлена разработкой эффективных, простых в аппаратной реализации технологических приемов высоковакуумного реактивного магнетронного распыления для формирования сложных структур микро- и нанoeлектроники, микроэлектромеханических систем с управляемым составом и электрофизическими свойствами.

6. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, соответствующий пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 8 статей в сборниках материалов научных конференций.

В опубликованных материалах представлены все основные выносимые на защиту положения диссертации. Из наиболее значимых работ следует отметить следующие публикации:

1. Доан Х.Т., Голосов Д.А., Джанг Дж., Мельников С.Н., Завадский С.М. Применение оптической эмиссионной спектроскопии для прогнозирования состава пленок при реактивном магнетронном распылении Ti-Al составных мишеней // ЭОМ. – 2023. – Т. 59, № 1. – С. 60–69.

2. Доан Х.Т., Голосов Д.А., Джанг Дж., Кананович Н.А., Завадский С.М., Мельников С.Н. Влияние способа подачи рабочих газов в камеру на процессы реактивного магнетронного распыления Ti-Al составной мишени // ЖТФ. – 2023. – Т. 93, № 3. – С. 409–416.

3. Доан Х.Т., Голосов Д.А., Джанг Дж., Завадский С.М., Мельников С.Н., Нгуен Т.Д. Модель процесса реактивного магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 17–25.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы, ее результатам и основным положениям, которые выносятся на защиту.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертационная работа и автореферат с точки зрения оформления соответствуют требованиям «Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации» и «Положению о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий».

Материал в диссертационной работе и автореферате изложен в соответствии с принятой терминологией, текст написан лаконичным языком и представлен в логической последовательности, иллюстрации достаточно полно поясняют и отражают основные результаты работы. Выводы отражают основные результаты работы. Объем диссертации соответствует установленным требованиям.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Детальный анализ представленных материалов (диссертационной работы, автореферата, публикаций по теме диссертации, акта внедрения и справки о практическом использовании результатов работы) позволяют сделать вывод о том, что научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

9. Недостатки диссертации

По диссертации в целом можно сделать следующие замечания, касающиеся стиля изложения и оформления:

1. В тексте автореферата с. 7 под термином «структурное устройство», по-видимому, имелась в виду «структура».

2. Интервал измеряемых частот (автореферат с. 8) должен быть выражен в Гц, а не МГц.

3. В подрисуночных надписях рисунков 5, 6 индексы формул пленок содержащих Al и Ti взаимно обращены (x, x-1), кроме того x используется для обозначения переменной уравнения линейной регрессии, что усложняет понимание рисунков.

4. В представленной диссертационной работе в главе 3, 5 присутствуют отдельные методические абзацы, которые можно было включить в методическую главу 2, что позволило бы более наглядно структурировать представленный материал.

5. Рисунок 3.6 заканчивает раздел 3.5, что ухудшает восприятие материала.

6. В заключении п.3 неудачный термин «оксидирование мишени» (прием создания оксидных слоев) более подходящий «окисление».

В тексте диссертации встречаются описки «просто, фактически» с. 30 последний абзац, «градировочные зависимости» надо градуировочные с. 47.

В целом, указанные замечания не носят принципиального характера и существенно не влияют на ценность диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертация Доан Тхе Хоанг «Формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов реактивным магнетронным распылением» является законченной квалификационной научной работой. Содержание диссертационной работы соответствует отрасли науки, по которой она представлена к защите – технические науки, а полученные научные результаты полностью соответствуют заявленной специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

Доан Тхе Хоанг несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и

оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» за следующие новые, научно обоснованные результаты:

– экспериментально установленные и обоснованные зависимости напряжения разряда магнетрона и скорости нанесения пленок от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при высоковакуумном импульсном магнетронном распылении двухкомпонентных (Ti-Al, Ta-Al, Zr-Hf, Ti-Zr) составных мишеней. Указанные зависимости определяются коэффициентами распыления и ионно-электронной эмиссии (КИЭЭ) этих металлов и их оксидов, площадью, занимаемой металлами на мишени, степени их покрытия оксидом;

– установленное изменение относительного содержания металлов в пленке и профиля распределения скорости нанесения слоев при реактивном магнетронном распылении составных мишеней, как при совместной, так и при отдельной подаче газов в камеру, определение возможных механизмов данного изменения;

- разработку модели магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени, учитывающей распределение плотности ионного тока на мишени, коэффициенты распыления и КИЭЭ металлов и их оксидов. Валидацию представленной модели при распылении Ti-Al составных мишеней в среде Ar и Ar/O₂ рабочих газов;

- установление зависимости диэлектрических характеристик ($\text{tg}\phi$, ϵ), ширины запрещенной зоны (E_g), тока утечки, пробивного напряжения пленок сложных оксидов TiAl, TiZr, TaAl, HfZr от параметров процесса магнетронного распыления и степени легирования. Определение наилучших сочетанием данных характеристик у пленки оксида гафния-циркония,

что в совокупности вносит существенный вклад в разработку технологических принципов контролируемого нанесения тонких пленок сложных оксидов методом реактивного магнетронного распыления составных мишеней для диэлектрических слоев современных интегральных схем высокой плотности.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАН Беларуси,
директор Государственного научного учреждения
«Институт химии новых материалов Национальной
академии наук Беларуси»

А.А. Рогачев

Подпись



11.10.2023

Рогачев А.А.

УДОСТОВЕРЯЮ

Ученый секретарь, к.х.н.

Михайловский

**Ю.К. Совет по защите
диссертаций при БГУИР**
«12» октября 2023 г.
Вх. № 05.02-11/188