

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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»

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

Диссертация Доан Тхе Хоанг «Формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов реактивным магнетронным распылением» соответствует отрасли технических наук и специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», так как включает разработку научных основ создания новых перспективных материалов для твердотельных электроники (п.1 Физико-химические процессы, протекающие при синтезе и выращивании кристаллических и аморфных материалов в объемном и пленочном состоянии для различных областей электронной техники, п.4 Исследование электрических, магнитных, оптических, теплофизических свойств материалов и слоев).

Актуальность темы диссертации

Особый интерес в микроэлектронике к сложным оксидам связан с использованием в качестве функциональных слоев запоминающих конденсаторов ячеек сегнетоэлектрической, резистивной, магниторезистивной памяти, газовых сенсоров, буферных и барьерных слоев. Однако свойства таких материалов крайне чувствительны к элементному составу и структуре, что потребовало развития существующих и создания новых методов формирования слоев. Одним из перспективных способов формирования пленок сложных оксидов является метод реактивного магнетронного распыления составных мишеней. Метод позволяет управлять элементным составом формируемых многокомпонентных пленок при использовании одного магнетронного распылительного устройства. Однако в этом случае состав наносимых пленок зависит от ряда факторов (коэффициентов распыления элементов, распределения плотности ионного тока на мишени, энергии бомбардирующих мишень ионов и т. д.). При реактивном распылении процессы в камере значительно усложняются, и состав наносимых пленок также зависит от реакционной способности материалов мишени и давления реактивного газа. Поэтому поиск новых диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, низким током утечки, высокой стабильностью параметров и разработка методов нанесения тонких пленок сложных оксидов принципиальны для дальнейшего улучшения характеристик ИС и является актуальной

задачей, которая требует решения.

Степень новизны результатов, научных положений, которые выносятся на защиту диссертации

Выносимые на защиту результаты диссертационной работы и научные положения являются принципиально новыми:

Показано, что при высоковакуумном импульсном магнетроном двухкомпонентных Ti-Al, Ta-Al, Zr-Hf, Ti-Zr составных мишеней напряжение разряда магнетрона и скорость нанесения пленок при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов определяются эффективными коэффициентами распыления и ионно-электронной эмиссии (КИЭЭ) мишени, которые зависят от площади, занимаемой металлами на мишени, степени их покрытия оксидами, коэффициентов распыления и ионно-электронной эмиссии этих металлов и их оксидов.

2. Предложен механизм распыления составных мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов, независимый от способа подачи газа в камеру, учитывающий различие скоростей окисления металлов в составе мишени, которые определяются значением свободной энергии Гиббса образования оксида ΔG^0 , и зависимость эффективного коэффициента распыления пленок сложных оксидов на поверхности частей мишени от давления кислорода. Изменение профиля распределения скорости нанесения происходит в результате генерации в разрядной области магнетрона отрицательно заряженных ионов распыленных частиц и их ускорении перпендикулярно мишени, что приводит к их конденсации вблизи оси магнетрона.

3. Установлено, что раздельная подача газов в камеру (Ar подается в область мишени, O₂ подается в область подложки) позволяет формировать диэлектрические пленки оксида титана-алюминия в переходном режиме работы системы при высоких скоростях нанесения, увеличить содержание кислорода в пленках от 45 – 48 ат.% до 60 – 64 ат.%, обеспечивает увеличение диэлектрической проницаемости от 7 – 13 до 17 – 23 и снижение диэлектрических потерь от 0,025 – 0,04 до 0,011 – 0,02 на частоте 1 кГц.

4. Установлены зависимости диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, тока утечки, ширины запрещенной зоны, напряженности поля пробоя) пленок сложных оксидов Ti_xAl_{1-x}O_y, Ti_xZr_{1-x}O_y, Hf_xZr_{1-x}O_y, Ta_xAl_{1-x}O_y от параметров процесса магнетронного распыления и степени легирования. Показано, что наилучшим сочетанием свойств с точки зрения использования пленок в качестве диэлектрика МОП структур обладают пленки оксида гафния-циркония.

Степень новизны результатов и научных положений, выносимых на защиту, определяется новизной, что подтверждается публикацией в рецензируемых журналах и сборниках материалов международных конференций.

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, приведенные в диссертационной работе, подтверждены результатами экспериментальных исследований с применением широкого круга современных методик и оборудования, обоснованы теоретически на основе предложенного механизма распыления составных мишеней и формирования пленок сложных оксидов. Все разработанные модели верифицированы. Достоверность результатов работы подтверждается отсутствием противоречий в полученных данных, которые опубликованы в отечественных и зарубежных научных изданиях различного уровня.

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

Научная значимость полученных результатов заключается в установлении особенностей высоковакуумного реактивного магнетронного распыления составных мишеней и управления элементным составом формируемых пленок сложных оксидов. Установлены зависимости диэлектрических характеристик пленок различного состава от параметров процесса магнетронного распыления и степени легирования. Предложена модель магнетронного распыления двухкомпонентных составных мишеней, позволяющая прогнозировать состав наносимых пленок с высокой точностью.

Полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные закономерности и методика нанесения пленок сложных оксидов импульсным реактивным магнетронным распылением составных мишеней будут использованы отраслевой лабораторией новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ» при разработке технологических процессов формирования термочувствительных слоев нового поколения микроболометрических матриц неохлаждаемых инфракрасных фотоприемных устройств.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре ЭТТ БГУИР в качестве материалов лекционного курса «Пучковые и плазменные технологии».

Экономическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты открывают технические перспективы для освоения новых видов изделий, повышения конкурентоспособности и качества продукции белорусских предприятий.

Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей в научных журналах, соответствующих пункту 19

Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (2,6 авторских листа), 8 статей в материалах научных конференций.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Оформление диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь к кандидатским диссертациям. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, общих выводов и списка использованных источников. Полный объем работы составляет 176 страниц основного текста, в том числе: 117 иллюстраций на 47 страницах, 14 таблиц на 4 страницах, 2 приложения на 2 страницах. Список использованных источников содержит 179 наименований источников (включая собственные публикации соискателя) на 14 страницах.

Автореферат диссертационной работы достаточно полно отражает основное содержание работы.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Анализ диссертационной работы, представленных в ней выводов и рекомендаций, а также основных публикаций соискателя по теме диссертации позволяет заключить, что диссертационная работа представляет собой самостоятельную законченную научно-исследовательскую работу, а 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».

Замечания по диссертации

В работе приведены экспериментальные зависимости различных величин от концентрации кислорода в газовой смеси, причем интервал изменения последней составлял от 4 до 10 %. Насколько возможности лабораторной установки обеспечивали точность задания параметров?

При исследовании влияния материала мишени на напряжение разряда магнетрона на графиках (рис.3.7, 3.8) некорректно использовать термин «расчетное содержание металла в распыленном потоке», так как в этом случае использованы данные о составах мишеней.

В главе 4 при моделировании процесса реактивного магнетронного распыления составных мишеней в формулах отсутствуют размерности использованных величин.

В тексте работы при изложении полученных результатов отсутствуют ссылки на публикации соискателя.

В целом, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности работы.

Заключение

Диссертационная работа Доан Тхе Хоанг «Формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов реактивным магнетронным распылением, по уровню научной новизны и практической значимости представленных результатов соответствует требованиям п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» а ее автор заслуживает присвоения искомой степени за новые научно-обоснованные результаты, включающие:

- экспериментально установленную закономерность высоковакуумного реактивного магнетронного распыления Ti-Al составной мишени при раздельной подаче газов в камеру (Ar на мишень, O₂ на подложку), заключающуюся в том, что пленки сложного оксида титана-алюминия формируются в переходном режиме работы системы, что позволяет увеличить содержание кислорода в пленках от 45 – 48 ат.% до 60 – 64 ат.% , их диэлектрической проницаемости от 7 – 13 до 17 – 23 и снижение диэлектрических потерь от 0,025 – 0,04 до 0,011 – 0,02 на частоте 1 кГц, обеспечивая при этом рост скорости нанесения пленок до 4 раз.

- механизм распыления составных мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов, учитывающий различие скоростей окисления металлов в составе мишени, и формирования пленок сложных оксидов с изменением относительного атомного содержания металлов в пленке оксида титана-алюминия от 0,52 до 0,36 с минимумом при $\Gamma_{O_2} = 12,5 \%$ для совместной и $\Gamma_{O_2} = 30 \%$ для раздельной газоподачи соответственно.

- установленную линейную зависимость соотношения атомного содержания металлов в наносимой пленке от соотношения интенсивности контрольных линий оптического излучения возбужденных атомов металлов Al (396,15 нм), Ti (395,82 нм), Zr (338,23 нм), Hf (368,22 нм), Ta (481,27 нм) в плазме магнетронного разряда при высоковакуумном распылении Ti-Al, Ta-Al, Hf-Zr, Ti-Zr составных мишеней что позволяет обеспечить контроль содержания металлов в наносимых пленках сложных оксидов с погрешностью до 6 %.

- предложенную модель магнетронного нанесения пленок сложных оксидов при распылении двухкомпонентной составной мишени, учитывающую распределение плотности ионного тока на мишени, скорости химической реакции образования оксидов, коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии распыляемых металлов и их оксидов, которая позволя-

ет прогнозировать содержание металлов в наносимых пленках с погрешностью до 10 % при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов от 0 до 100 %.

Официальный оппонент:
кандидат технических наук, доцент,
заведующий лабораторией вакуумно-
плазменных покрытий Государствен-
ного научного учреждения «Физико-
технический институт НАН Беларуси»

Лет-

С.Д. Латушкина

Подпись Латушкиной С.Д. удостоверяю

prof. S. D. Latushkin



Совет по защите
диссертаций при БГУИР
«12» октября 2023 г.
Вх. № 05.02-н/189