

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу
Доан Тхе Хоанг

«Формирование тонкопленочных изолирующих слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе двойных 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»

Доан Тхе Хоанг в 2019 году поступил в аспирантуру УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» для обучения по специальности 05.13.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». В 2020 году в связи с изменением направления диссертационных исследований был переведен на кафедру электронной техники и технологии для обучения по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

В период обучения в аспирантуре Доан Тхе Хоанг работал в Центре 2.1 «Ионно-плазменные системы и технологии» НИЧ БГУИР и выполнял научные исследования, направленные на разработку процессов формирования тонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов и технологии формирования структур металл – диэлектрик – полупроводник. Исследования проводились в рамках выполнения научно-исследовательских работ «Разработка методов ионно-плазменного формирования сверхтонких пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью на основе двойных оксидов для использования в качестве подзатворного диэлектрика КМОП структур» (2021–2025 гг., № ГР 20212854), «Разработка методов ионно-плазменного формирования активных слоев на основе легированного оксида ванадия для интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов» (2021–2025 гг., № ГР 20212680) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», «Разработка физико-технических основ формирования тонких пленок нитридов и оксидов при использовании импульсного униполярного и биполярного питания магнетронных распылительных систем» (2021–2025 гг., № ГР 20212275) ГПНИ «Конвергенция-2025», хозяйственного договора на выполнение НИР № 21-1183 «Исследование процессов реактивного магнетронного нанесения тонких пленок оксидов и многослойных структур с использованием переданного во временное пользование технологического стенда, на основе полученных данных провести уточнение и верификацию расчетной модели процесса» (2021–2022 гг., заказчик – СООО «Изотек-М», г. Минск, РБ).

Работа над диссертацией велась ритмично и в соответствии с календарным планом обучения аспиранта. За время работы над диссертацией Доан Тхе Хоанг проявил себя сформировавшимся ученым, способным самостоятельно решать на современном уровне сложные исследовательские задачи. Доан Тхе Хоанг является автором 13 научных публикаций, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, 8 статей в сборниках материалов научных конференций.

Научные интересы Доан Тхе Хоанг находятся в области изучения процессов ионно-плазменного формирования тонких пленок оксидов на основе диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и МОП структур на их основе. В ходе проведения научных исследований Доан Тхе Хоанг исследованы процессы реактивного магнетронного распыления составных мишеней, установлены закономерности высоковакуумного реактивного распыления составных мишеней при совместной и отдельной подаче газов в камеру, закономерности изменения соотношения интенсивности контрольных линий оптического излучения возбужденных атомов металлов в плазме магнетронного разряда при высоковакуумном распылении Ti-Al, Ta-Al, Hf-Zr, Ti-Zr составных мишеней, что позволило разработать модель магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени и методику контролируемого нанесения тонких пленок сложных оксидов методом реактивного магнетронного распыления

составных мишеней и показана возможность использования данного класса в качестве диэлектрических слоев современных МОП ИС высокой плотности.

Следует отметить, что полученные соискателем научные и практические результаты внедрены в учебный процесс на кафедре ЭТТ БГУИР в качестве материалов лекционного курса «Пучковые и плазменные технологии». Также полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные закономерности и, в частности, разработанная методика контролируемого нанесения пленок сложных оксидов будут в дальнейшем использована в «Отраслевой лаборатории новых технологий и материалов» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Результаты диссертационной работы

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о высокой научной квалификации Доан Тхе Хоанг и значимости полученных в диссертации результатов исследований.

Считаю, что Доан Тхе Хоанг заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» за:

1. Установленные закономерности высоковакуумного реактивного распыления Ti-Al составной мишени при совместной (смесь Ar/O₂ подается в область мишени) и отдельной (Ar подается в область мишени, O₂ подается в область подложки) подаче газов в камеру, сравнение которых показало, что использование отдельной газоподдачи позволяет формировать пленки в переходном режиме работы системы и увеличить содержание кислорода в пленках оксида титана-алюминия с 45–48 ат.% до 60–64 ат.%, что обеспечивает увеличение скорости нанесения пленок с 0,02–0,04 нм/с до 0,05–0,15 нм/с, диэлектрической проницаемости с 7–13 до 17–23 и снижение диэлектрических потерь с 0,025–0,04 до 0,011–0,02 на частоте 1 кГц;

2. Установленную закономерность изменения соотношения интенсивности контрольных линий оптического излучения возбужденных атомов металлов AlI (396,15 нм), TiI (395,82 нм), ZrI (338,23 нм) HfI (368,22 нм) Ta (481,27 нм) в плазме магнетронного разряда при высоковакуумном распылении Ti-Al, Ta-Al, Hf-Zr, Ti-Zr составных мишеней, постоянном общем расходе газов 60 мл/мин и изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов от 0 до 100 %, показывающее, что соотношение атомного содержания металлов в наносимой пленке линейно зависит от соотношения интенсивности линий оптического излучения этих металлов, что позволяет обеспечить контроль состава пленок сложных оксидов;

3. Предложенный механизм распыления составных мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов, объясняющий изменение относительного атомного содержания металлов C_{Al}/C_{Ti} 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 отдельной газоподдачи, за счет формирования пленок оксидов на поверхности Ti и Al частей мишени и различием скоростей окисления этих металлов, что позволяет целенаправленно осуществлять выбор режимов нанесения пленок сложных оксидов;

4. Разработанную модель магнетронного распыления двухкомпонентной составной мишени, учитывающую распределение плотности ионного тока на мишени, коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии распыляемых металлов и их оксидов, и скорости химической реакции образования оксидов, которая позволяет прогнозировать с погрешностью менее 10 % соотношение содержания металлов в наносимых пленках сложных оксидов при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов от 0 до 100 % и давлении в камере менее 0,1 Па, что и обеспечивает обоснованный выбор режимов нанесения диэлектрических пленок сложных оксидов при реактивном распылении составных мишеней.

Научный руководитель:

в.н.с. Центра 2.1 НИИ БГУИР

к.т.н., доцент

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЕНА

Старший инспектор по кадрам отдела кадров

16.06

16.06

16.06



Д.А. Голосов