

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

УДК 621.3.049.77: 621.793

Чан
Динь Ньат Хань

Исследование процессов магнетронного нанесения пленок оксида тантала
распылительной системой с цилиндрической мишенью

АВТОРЕФЕРАТ

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

Научный руководитель
Голосов Дмитрий Анатольевич
доцент, в.н.с. Центра 2.1
доцент; кандидат технических наук

Минск 2023

Работа выполнена на кафедре инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Голосов Д. А.,**
кандидат технических наук, доцент в.н.с. Центра 2.1 учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **Калтыгин А. Л.,**
кандидат технических наук, доцент кафедры ИГ учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита диссертации состоится «21» июня 2023 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220027, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 2 уч. корп., ауд. 517, тел.: 293-89-73, e-mail: kafig@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкое распространение для изменения оптических характеристик деталей оптики и оптоэлектроники получили многослойные интерференционные системы, состоящие из чередующихся слоев с высоким и низким показателями преломления и имеющие оптическую толщину кратную четверти заданной длины волны. Интерференционные явления, возникающие при прохождении излучения через последовательный ряд соответствующим образом подобранных пленок, приводят к изменению его коэффициентов отражения и пропускания для различных длин волн излучения. Такие интерференционные системы находят практическое применение в качестве просветляющих, фильтрующих, светоделительных, зеркальных и поляризующих покрытий.

Для изготовления интерференционных покрытий наибольшее применение получили методы нанесения пленок в вакууме. В настоящее время наряду с традиционными методами испарения в вакууме используются современные методы ионно-плазменного распыления и в частности реактивное магнетронное распыление. Данный метод обладает широкими возможностями получения композиционных материалов с требуемым стехиометрическим составом, что позволяет получать не только низкопреломляющие и высокопреломляющие слои, но и слои с показателем преломления в промежуточном диапазоне. Одной из главных проблем методов ионно-плазменного нанесения интерференционных покрытий является сложность получения однородных по толщине пленок на крупноформатных подложках диаметром до 300 мм. При этом при изготовлении многослойных фильтров толщина каждого из слоев должна выдерживаться с точностью до единиц нанометров.

Для получения однородных по толщине покрытий в настоящее время стали использоваться аксиальные цилиндрические магнетроны, которые позволяют наносить тонкие пленки на крупноформатные подложки. Однако расстояние мишень – подложка оказывает значительное влияние на равномерность толщины наносимых пленок. И выбор этого расстояния является сложной задачей.

Таким образом, целью работы являлось исследование влияния расстояния мишень – подложка на равномерность толщины пленок тантала, наносимых методом магнетронного распыления цилиндрическим магнетроном.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

С развитием микроэлектроники происходит постоянное уменьшение размеров элементов, что влечет за собой пропорциональное уменьшение толщин наносимых слоев. При этом размеры полупроводниковых пластин увеличились до 300 мм, а в перспективе до 450 мм и для нанесения тонких пленок стали применять технологии индивидуальной обработки подложек. В данных условиях все более жесткие требования предъявляются к равномерности толщины наносимых слоев.

Цель работы:

Целью работы является исследование особенностей процессов реактивного распыления Ta мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов при использовании распылительной системы с цилиндрической мишенью, изучение зависимости свойств пленок от условий синтеза и оптимизация процесса магнетронного нанесения пленок оксида тантала.

Задачи исследования:

- исследовать процессы магнетронного распыления Ta мишеней коаксиальными цилиндрическими магнетронами
- исследовать влияние параметров процесса реактивного магнетронного распыления на распределение электрофизических свойств и толщины пленок тантала и оксида тантала;
- провести моделирование профилей распределения толщины наносимых покрытий для прогнозирования процесса нанесения пленок тантала и оксида тантала;
- разработать методику нанесения тонких пленок тантала и оксида тантала с заданной равномерностью толщины.

Объект исследования: Разрядные характеристики магнетрона, элементный состав, структура, оптические и электрические свойства пленок тантала и оксида тантала.

Предмет исследования: Тонкие пленки, оксид тантала, процессы реактивного магнетронного распыления.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-36 80 08 «Инженерная геометрия и компьютерная графика».

Информационная база исследования сформирована на основе научно-технической литературы, открытой информации, технических нормативно-

правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна диссертационной работы заключается в исследованиях процессов распыления Ta мишени в среде Ar и Ar/O₂ смеси газов и формирования тонких пленок на крупноформатных подложках магнетронной распылительной системой с цилиндрической мишенью. Установлено, что при изменении расстояния мишень – подложка с 86 до 226 мм неравномерность толщины пленок изменяется от 0,4 до 10 %. При расстоянии мишень – подложка 146 мм на подложке Ø 150 мм могут быть получены пленки тантала с неравномерностью толщины менее 0.4 %. При этом при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

Практическая значимость состоит в определении технологических параметров процесса получения тонких пленок тантала и оксида тантала методом магнетронного распыления, позволяющих получить покрытия с высокой равномерностью толщины.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При распылении Ta мишени в среде Ar и Ar/O₂ рабочих газов коаксиальными магнетронами при стабилизации мощности разряда в течение процесса происходит изменение напряжения и тока разряда (резкое уменьшение напряжения и увеличение тока разряда). После 10 минут распыления процесс стабилизируется, но в дальнейшем также происходит небольшое уменьшение напряжения и увеличение тока разряда. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что изменение напряжения и тока разряда связано с тепловыми процессами (разогревом мишеней).

2. Получены профили распределения скорости нанесения пленок при различном расстоянии мишень – подложка. Установлено, что при изменении расстояния мишень – подложка с 86 до 226 мм неравномерность толщины пленок изменяется от 0.4 до 10 %. При расстоянии мишень – подложка 146 мм на подложке Ø 150 мм могут быть получены пленки тантала с неравномерностью толщины менее 0.4 %. При этом при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

3. Используемая в программе модель VsuirIzovac 1.6, адекватно описывает тенденции изменения профилей распределения скорости нанесения при магнетронном нанесении пленок Ta и изменении расстояния мишень – подложка. Модель занижает скорость нанесения на краях подложки, а в центре подложки завышает. При уменьшении расстояния мишень – подложка расчетная скорость нанесения пленок более низкая по сравнению с экспериментальными значениями. Погрешности модели, по-видимому, связаны с неправильным

заданием углового распределения распыленных частиц. Большие погрешности в результаты моделирования вносят нестабильности процесса магнетронного распыления. В процессе распыления происходит увеличение тока разряда магнетронов и изменение соотношения токов магнетронов. Это приводит к трудностям задания адекватных параметров процесса при моделировании.

Теоретическая значимость диссертации заключается в установлении зависимостей неравномерности толщины пленок от условий распыления при магнетронном распылении Та мишени магнетронной распылительной системой с цилиндрической мишенью.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиата». Процент оригинальности составил 83,47%. Заимствования, самоцитирования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Списке литературы».

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 59-й научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР (17 – 21 апреля 2023 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликована 1 статья в в материалах научных конференций. Общий объем публикаций составляет 1,6 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 62 страниц включая 36 иллюстраций, 4 таблицы, библиографический список из 30 наименований, список собственных публикаций соискателя из 1 наименования и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассмотрены назначения, типы оптических интерференционных фильтров. Показаны характеристики, свойства отрезающих (блокирующих) коротковолновых фильтров, отрезающих (блокирующих) длинноволновых фильтров, узкополосных фильтров и полосовых фильтров. Проведен анализ материалов интерференционных фильтров и указаны материалы, наиболее часто используемые для нанесения оптических фильтров для видимой области спектра. Показано, что одним из широко используемых материалов является оксид тантала. А также проведен анализ характеристик, свойств, достоинств и недостатков методов нанесения оптических интерференционных фильтров. Определены методы повышения равномерности толщины слоев при магнетронном распылении за счет изменения зоны распыления, использования цилиндрических магнетронов и различных систем перемещения подложки.

Во **второй главе** рассмотрена схема экспериментальной установки для нанесения интерференционных покрытий методом магнетронного распыления и установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП. Для нанесения многослойных интерференционных покрытий применена внутрикамерная система магнетронного нанесения на основе цилиндрических коаксиальных магнетронов производства ОАО «ИЗОВАК». Для питания магнетронов использовался источник питания APCL-M-5PDC-800A-2. Описаны назначение, технические характеристики и конструкция оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08 для измерения тонких пленок, метод измерения тонких пленок и условия эксплуатации данного прибора.

В **третьей главе** проведены исследования изменения характеристик разряда магнетронов во времени при распылении Ta мишеней в среде Ar и использовании униполярного импульсного питания магнетронов. Представлены результаты исследования изменения разрядных характеристик магнетрона во времени и результаты исследования распределения токов магнетронов.

Установлено, что при использовании одного источника питания для распыления двух мишеней ток разряда неравномерно распределяется между магнетронами. Неравномерность распределения токов между магнетронами возникает из-за различий магнитных ловушек магнетронов и разброса параметров магнитов (эффективности магнитной ловушки), разогрева мишени (изменения коэффициента ионно-электронной эмиссии).

В **четвертой главе** приведены результаты исследований влияния расстояния магнетрон 2 – подложка процесса магнетронного распыления на изменение профилей распределения скорости нанесения пленок при распылении Ta мишени в среде Ar и представлены результаты экспериментов. Проведены исследования влияния давления в камере на профиль распределения скорости нанесения и получены результаты экспериментов. Установлено, что при уменьшении расстояния мишень – подложка происходит увеличение средней скорости нанесения пленок. При этом уменьшается относительная скорость нанесения на краях подложки и увеличивается относительная скорость нанесения на оси подложки. Максимальная равномерность скорости нанесения пленки получена при $h_{12} = 146$ мм. При этом при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

В **пятой главе** проведено моделирование профилей распределения толщины наносимых покрытий при магнетронном нанесении пленок оксида тантала распылительной системой с цилиндрической мишенью с использованием программы *Bsuirlzovac 1.6* и представлены результаты моделирования. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами. Установлено, что модель, используемая в программе *Bsuirlzovac 1.6*, адекватно описывает тенденции изменения профилей распределения скорости нанесения при магнетронном нанесении пленок Ta и изменении расстояния мишень – подложка. Погрешности модели, по-видимому, связаны с неправильным заданием углового распределения распыленных частиц.

Приложение А содержат копии авторской публикаций по теме диссертации.

Приложение Б содержат результаты проверки работы в системе «Антиплагиат».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе выполнения проекта проведен анализ материалов и методов получения оптических интерференционных фильтров. Показано, что одним из широко используемых материалов является оксид тантала. Для формирования пленок оксида тантала наиболее перспективным методом является реактивное магнетронное распыление. Определены методы повышения равномерности толщины слоев при магнетронном распылении за счет изменения зоны распыления, использования цилиндрических магнетронов и различных систем перемещения подложки.

2. Проведены исследования процессов распыления Ta мишени в среде Ar и Ar/O₂ смеси газов и формирования тонких пленок на крупноформатных подложках магнетронной распылительной системой с цилиндрической мишенью. Получены зависимости изменения разрядных характеристик магнетронов во времени, распределения токов магнетронов. Установлено, что изменение напряжения и тока разряда во времени и неравномерное распределение токов магнетронов связано с тепловыми процессами и искажением магнитных ловушек магнетронов.

3. Получены профили распределения скорости нанесения пленок при различном расстоянии мишень – подложка. Установлено, что при изменении расстояния мишень – подложка с 86 до 226 мм неравномерность толщины пленок изменяется от 3,6 до 19 %. При расстоянии мишень – подложка 146 мм на подложке Ø 150 мм могут быть получены пленки тантала с неравномерностью толщины менее 3,6 %. При этом при увеличении рабочего давления до 0.5 Па не наблюдается эффекта термализации распыленного потока.

4. Используемая в программе *BsuirIzovac* 1.6, адекватно описывает тенденции изменения профилей распределения скорости нанесения при магнетронном нанесении пленок Ta и изменении расстояния мишень – подложка. При моделировании модель занижает скорость нанесения на краях подложки, а в центре подложки завышает. При уменьшении расстояния мишень – подложка расчетная скорость нанесения пленок более низкая по сравнению с экспериментальными значениями. Погрешности модели, по-видимому, связаны с неправильным заданием углового распределения распыленных частиц. Большие погрешности в результаты моделирования вносят нестабильности процесса магнетронного распыления. В процессе распыления происходит увеличение тока разряда магнетронов и изменение соотношения токов магнетронов. Это приводит к трудностям задания адекватных параметров процесса при моделировании.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1–А.] Чан, Д. Н. Х. Влияние расстояния мишень – подложка на равномерность толщины пленок тантала, наносимых цилиндрической магнетронной распылительной системой / Материалы 59-й научной конференции студентов магистрантов, аспирантов УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Минск, 17 – 21 апреля 2023 г. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 1057 – 1061.