

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

УДК 621.373.826

АЮПОВ
Вадим Андреевич

**Исследование распределения скорости нанесения тонких пленок
методом перемещаемого зонда**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 02 – Технология и оборудование для
производства полупроводников, материалов и приборов электронной
техники

Научный руководитель

Кандидат технических наук, доцент

Завадский Сергей Михайлович

Минск 2020

Работа выполнена на кафедре электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Завадский Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Защита диссертации состоится «___» июня 2020 года в ___ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 135, тел.: +375 17 293-88-35, e-mail: kafett@bsuir.by.

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

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки, получаемые методами осаждения в вакууме находят все большее применение с ростом объемов производства устройств мобильной связи, приборостроения, систем управления движением летательных аппаратов и наземного транспорта, навигационных и радиолокационных систем, радаров, вычислительных комплексов, бытовой и военной техники, а также большое количество других важнейших отраслей науки, промышленности и транспорта требуют увеличения объемов производства изделий микроэлектроники и качества выпускаемой продукции.

Качество наносимых пленок оценивается путем контроля таких параметров покрытий, как толщина, химический состав, пористость, плотность, адгезия, износостойкость, твердость, шероховатость, внутреннее напряжение и др. Совокупность контролируемых параметров в каждом конкретном случае зависит от назначения покрытий, однако, для любого нанесенного слоя одним из важнейших свойств является толщина конденсированного слоя.

Для получения высококачественных пленок с заранее заданными и воспроизводимыми параметрами предопределяет необходимость строгого контроля при их нанесении и соблюдения правильной методики проводимых экспериментов.

Среди всех существующих методов контроля скорости и толщины осаждаемых покрытий особое место занимают сверхчувствительные методы контроля осаждаемых покрытий с использованием пьезокварцевых резонаторов, благодаря комбинации высокой добротности, стабильности, малых размеров и низкой стоимости кварца. Свойства кварца чрезвычайно устойчивы с течением времени при скачках температуры и других изменениях в окружающей среде. Кварц также обладает высокой повторяемостью свойств от одного образца к другому, а его акустические потери достаточно низкие. В частности, в вакуумных установках пьезодатчики применяются в качестве толщиномеров для контроля роста пленок в реальном времени, что и обусловило их широкое применение в промышленности.

Однако одной из основных задач датчиков и других систем автоматического контроля является исключение человеческого фактора, зачастую приводящего к опасным ситуациям и катастрофам.

Как правило, практически все датчики работают по принципам, хорошо известных из курсов по схематехнике и электронных компонентов. Большое заблуждение, что в реализации датчиков все предельно просто. От общеизвестного принципа работы до практической реализации надежно и точно

работающей конструкции требуются большие интеллектуальные нагрузки в решении конструктивно-технологических проблем. В эксплуатации к датчику предъявляются очень жесткие требования, такие как высокая точность, долговечность, технологичность производства на доступном оборудовании и себестоимость.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка методов *in situ* диагностики скорости нанесения и распределения толщины наносимых слоев при ионно-плазменном распылении методом перемещаемого кварцевого зонда.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ методов и оборудования для измерения скорости нанесения тонких пленок при вакуумном нанесении покрытий;
- разработать систему для диагностики скорости нанесения тонких пленок методом перемещаемого зонда;
- провести исследования скорости нанесения тонких пленок методом перемещаемого зонда при ионно-плазменном распылении.

Объект исследования: конструкции кварцевых датчиков, систем диагностики и преобразования частоты.

Предмет исследования: процессы ионно-плазменного нанесения тонких пленок, процессы диагностики скорости нанесения тонких пленок методом кварцевого датчика.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования зависимостей профилей распределения скорости нанесения при DC магнетронном распылении Al, Ti и Cu мишеней от параметров процесса распыления и уровня несбалансированности магнитной системы магнетрона. На основе экспериментальных данных установлено, что при распылении различных металлов скорость нанесения изменялась практически пропорционально току.

2. Результаты исследования влияния разрядных характеристик при магнетронном распылительнии Al и Ti мишеней на распределение скорости нанесения тонких пленок. На основе экспериментальных данных установлено, что профиль распределения скорости нанесения зависит от рода распыляемого материала и при увеличении тока разряда скорость нанесения увеличивается не пропорционально току разряда. Распределение плотности ионного тока не

совпадает с профилем скорости нанесения, зависит от рода распыляемого материала и тока разряда.

3. Результаты исследования процессов реактивного магнетронного распыления Ti, Ta, Hf и Zr мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов, показывающих что при увеличении концентрации кислорода скорость нанесения тонких пленок уменьшается.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 55-ой юбилейной конференции аспирантов, магистрантов и студентов.

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы из них 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав с выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 60 страниц, в том числе 34 иллюстрации, 1 таблица, 24 наименования в библиографическом списке.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние проблемы, определены цели и задачи исследования.

В первой главе магистерской работы производится литературный обзор, проводится анализ методов нанесения тонких пленок (ионно-плазменного, ионно-лучевого нанесения) и основных методов измерения и контроля скорости нанесения тонких пленок, как непосредственно в процессе нанесения тонких пленок, так и после нанесения, также проводится анализ современных кварцевых датчиков.

Во второй главе рассматриваются основные этапы разработки кварцевого датчика, такие как разработка структурной схемы, разработка системы диагностики и преобразования частоты кварцевого датчика, выбор и обоснование способа защиты от теплового воздействия и магнитной системы кварцевого датчика.

В третьей главе проводится исследование методом перемещаемого зонда влияния параметров магнетронного распыления металлов на скорость роста и уровень ионной бомбардировки пленок и влияния разрядных характеристик магнетронных распылительных систем на распределение скорости нанесения тонких пленок. Установлено, что при распылении различных металлов скорость нанесения изменялась практически пропорционально току, распределение плотности ионного тока не совпадает с профилем скорости нанесения и зависит от рода распыляемого материала и тока разряда.

В четвертой главе проводится исследование методом перемещаемого зонда влияния состава рабочих газов на распределение скорости нанесения тонких пленок. Установлено, что при увеличении концентрации кислорода скорость нанесения тонких пленок уменьшается.

Получение высококачественных тонких пленок с заданными параметрами требует строгого контроля параметров при их нанесении. Параметры пленок контролируют непосредственно в процессе их нанесения в вакуумной рабочей камере, и после нанесения, т. е. вне камер. Наиболее эффективно контроль осуществляется в камере, так как в зависимости от его результатов настраиваются режимы процесса роста пленки, что позволяет устранить операции подгонки ее параметров после нанесения.

Наиболее распространен контроль скорости нанесения пленок методом кварцевого датчика. В качестве датчика при этом методе используют включенный в контур генератора частоты кварцевый элемент. Принцип действия

кварцевого датчика основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы кварцевого элемента при нанесении на его поверхность пленки. С увеличением массы кварцевого элемента его резонансная частота падает.

Большинство кварцевых датчиков рассчитаны на работу только с резистивными или электронно-лучевыми испарителями и не способны стабильно функционировать с ионно-плазменными устройствами. Это связано с тем, что при работе ИПУ даже в зоне подложки имеются заряженные частицы (потoki тепловых и высокоэнергетичных электронов, положительных и отрицательных ионов). Бомбардировка кварца заряженными частицами приводит к возникновению электрических помех и в некоторых случаях срыву генерации. Кроме того нагрев кварца при бомбардировке заряженными частицами приводит к изменению частоты генерации кварца, что значительно снижает точность измерений. Поэтому для регистрации скорости нанесения при ионно-лучевом и ионно-плазменном распылении был разработан специализированный кварцевый.

Разработанный датчик предназначен для работы в системах кварцевого контроля толщины и скорости роста пленок в технологическом оборудовании вакуумного ионно-плазменного нанесения слоев и при проведении научных исследований. Основной частью датчика скорости осаждения является кварцевая пластина с резонансной частотой 6 МГц, на обеих поверхностях которого расположены контакты для подачи напряжения. Кварцевый элемент располагается на держателе и держится на выводах закрепленных изолятором, который вставляется в медный держатель датчика. Конструкция держателя кварца с установкой с тыльной стороны обеспечивает простую замену кристалла без извлечения головки датчика из системы. Для устранения влияния высокоэнергетичных электронов на частоту генерации кварца датчик был оборудован специальной магнитной системой.

Это влияет на процессы генерации кварцевого резонатора, что приводит к нестабильности измерения толщины и скорости нанесения. Для устранения воздействия на генерацию кварца потока высокоэнергетичных электронов, используется магнитная система, состоящая из магнитов и магнитопровода, которая локализует магнитное поле и формирует магнитную ловушку у поверхности кварцевого резонатора.

Для того, чтобы перемещать кварцевый датчик кварцевый датчик подключается с помощью гибких трубок к вводу воды в камеру.

Особенностью датчика является магнитная система на Nd-Fe-B постоянных магнитах, которая формирует магнитную ловушку у поверхности кварцевого резонатора и защищает кварц от бомбардировки потоками заряженных частиц путем их отклонения магнитным полем. Кроме того для

получения стабильной генерации кварца, плата генератора была размещена непосредственно в датчике. Для устранения нагрева кварца и магнитной системы потоками заряженных частиц используется проточное водяное охлаждение. Все эти меры позволили использовать кварцевый датчик при интенсивной ионной и электронной бомбардировке растущей пленки.

При измерении скорости нанесения пленки сигнал частоты генерации кварца предварительно усиливался и поступал в блок измерения частоты Micron-5, который по шине RS-232 подключался к компьютеру. Цифровые данные об изменении частоты поступали на компьютер, где с помощью оригинального программного обеспечения производилась их обработка, визуализация и сохранение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор источников литературы по теме магистерской работы. Рассмотрены основные методы измерения и контроля толщины тонких пленок. К ним относятся методы механического взвешивания, измерения электрофизических свойств, голографического измерения и кварцевого зонда.

Разработан кварцевый датчик для измерения скорости осаждения материала при ионно-плазменном распылении и контроля толщины. Разработана система диагностики и преобразования частоты кварцевого датчика. Произведен выбор и обоснование способа защиты от теплового воздействия, а также расчет и выбор магнитной системы кварцевого датчика. Данный датчик обеспечивает измерение распределений в технологических процессах магнетронного и ионно-лучевого распыления. Разработанный датчик показал высокую стабильность измерений при повышенных температурах процесса, наличии потока высокоэнергетичных электронов. Особенностью датчика является магнитная система на постоянных магнитах, которая формирует магнитную ловушку у поверхности кварцевого резонатора и защищает кварц от бомбардировки потоками заряженных частиц путем их отклонения магнитным полем.

Результаты экспериментальных исследований с помощью разработанной системы установлены закономерности изменения скорости нанесения пленок и распределения плотности ионного тока при магнетронном распылении Cu, Al и Ti мишеней. Показано, что скорость нанесения меняется пропорционально току разряда в диапазоне его величин. Так как скорость нанесения пленок пропорциональна току разряда, следовательно и скорость распыления также изменяется пропорционально, а это предполагает что они зависят только от тока и материала. В моделях для процессов роста пленок необходимо учитывать

неравномерность ионной бомбардировки, так как это влияет на возможные изменения структуры пленок по площади подложки и фазовый состав, но это не влияет на скорость нанесения.

Результаты экспериментальных исследований с помощью разработанной системы при распылении металлических Ti и Al мишеней методом DC магнетронного распыления показали, что форма профиля скорости нанесения не зависит от тока разряда. Однако профиль распределения скорости нанесения зависит от углового распределения скорости распыления (т.е. рода распыляемого материала) и при увеличении тока разряда скорость нанесения увеличивается не пропорционально току разряда. Распределение плотности ионного тока не совпадает с профилем скорости нанесения, зависит от рода распыляемого материала и тока разряда.

Список опубликованных работ

1. Аюпов, В. А. Кварцевый датчик для измерения скорости нанесения тонких пленок методами ионно-плазменного распыления / В. А. Аюпов, П. Ю. Шамшуров, А. Д. Голосов // Электронные системы и технологии : 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. : сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 262.

2. Шамшуров, П. Ю. Моделирование магнитных полей торцевого холловского ускорителя / П. Ю. Шамшуров, А. Д. Голосов, В. А. Аюпов // Электронные системы и технологии : 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. : сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 396–397.

3. Голосов, А. Д. Нанесение пленок танталата-ниобата стронция-висмута в off-axis конфигурации / А. Д. Голосов, В. А. Аюпов, П. Ю. Шамшуров // Электронные системы и технологии : 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. : сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 275–276.

4. Аюпов, В. А. Разработка конструкции кварцевого датчика и системы перемещения / В. А. Аюпов, П.Ю. Шамшуров // Электронные системы и технологии : 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 18-20 мая 2020 г. : сборник тезисов докладов / Белорусский

государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск :
БГУИР, 2020.

Библиотека БГУИР