

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

УДК621.3.049.77: 621.793

Голосов
Андрей Дмитриевич

**Исследование процессов ВЧ магнетронного нанесения тонких пленок
сегнетоэлектриков на подложки 200 мм**

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

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сегнетоэлектрики находят все более широкое применение в устройствах функциональной электроники. В последние годы резко возрос интерес к использованию сегнетоэлектриков в виде тонких пленок.

Последними тенденциями развития технологии нанесения тонких пленок является внедрение в промышленность современных методов ионно-плазменного распыления и, в частности, метода ВЧ магнетронного распыления. Магнетронное распыление давно и прочно заняло свое место в получении функциональных покрытий в микроэлектронике. В настоящее время эта технология лидирует среди всех других вакуумных методов получения тонкопленочных структур. Данный метод позволяет наносить тонкие пленки сегнетоэлектриков и обеспечивает однородность покрытий на подложках больших размеров.

При этом требования к распылительным системам и процессам магнетронного распыления все более возрастают. Примерами таких требований являются: высокая равномерность толщины наносимой тонкой пленки; высокий коэффициент использования материала мишени; увеличивающийся размер подложек и высокая скорость нанесения слоев.

Одним из сравнительно простых методов увеличения равномерности наносимых слоев является использование метода перемещения подложек относительно магнетрона. Данный метод позволяет при небольших размерах зоны распыления магнетрона получать сравнительно высокую равномерность даже на подложках, превышающих в несколько раз размер мишени.

Благодаря разработке новых и оптимизации существующих методов нанесения тонких пленок за последние годы во всем мире наблюдается значительный рост использования данных технологий. Полученные в последнее время результаты позволяют предположить, что исследование механизмов формирования сегнетоэлектрических тонких пленок и разработка методов ионно-плазменного распыления позволят улучшить технологию формирования сегнетоэлектрических тонких пленок и сделать ее воспроизводимой и более высокопроизводительной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магнетронное распыление – технология нанесения тонких пленок на подложки в вакууме – давно и прочно заняло свое место в получении покрытий как в микроэлектронике, так и в других отраслях промышленности. В настоящее время эта технология лидирует среди всех других вакуумных методов получения тонкопленочных структур. В микроэлектронике метод стал использоваться не только для формирования слоев металлизации, но и для получения функциональных компонентных пленок оксидов и нитридов, многокомпонентных тонких пленок (сегнетоэлектриков, магниторезистивных тонких пленок и т.д.)

При этом требования к распылительным системам и процессам магнетронного распыления все более возрастают. Примерами таких требований являются: высокая равномерность толщины наносимой тонкой пленки; высокий коэффициент использования материала мишени; увеличивающийся размер подложек; высокая скорость нанесения слоев при реактивном магнетронном распылении с равномерным химическим составом по подложке. Следует отметить, что 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. В данных условиях все более жесткие требования предъявляются к равномерности толщины наносимых слоев.

Одним из сравнительно простых методов увеличения равномерности наносимых слоев является использование метода перемещения подложек относительно магнетрона. Данный метод позволяет при небольших размерах зоны распыления магнетрона получать сравнительно высокую равномерность даже на подложках, превышающих в несколько раз размер мишени. Поэтому для улучшения равномерности наносимых слоев распылительные системы оснащаются механизмами перемещения подложек. Однако чаще всего при разработке таких систем не уделяется должного внимания конфигурации процесса, и взаимное расположение магнетрона и подложки выбирают эмпирически, путем проведения ряда экспериментов. Применение в данном случае методов компьютерного моделирования может значительно уменьшить сроки и затраты на разработку и исключить ошибки при проектировании установок нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления.

Таким образом целью данной работы было провести исследования и добиться улучшения равномерности нанесения сегнетоэлектрических слоев на подложки диаметром 200 мм, исследовав метод перемещения подложек

относительно магнетрона.

Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование процессов ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрических материалов и разработка методик нанесения равномерных по толщине тонких пленок сегнетоэлектриков на подложки 200 мм.

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

- провести анализ современных способов вакуумного нанесения тонких пленок на крупноформатные подложки;
- разработать методику повышения равномерности толщины и компонентного состава при нанесении многокомпонентных тонких пленок на подложки 200 мм;
- провести исследования процессов нанесения тонких пленок сегнетоэлектриков на подложки 200 мм.

Объект исследования: конструкции системы ВЧ магнетронного нанесения тонких пленок, процессы ВЧ магнетронного распыления.

Предмет исследования: процессы формирования ВЧ магнетронного разряда, процессы распыления многокомпонентных материалов и нанесения тонких пленок.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы магнетронного распыления тонких пленок на вращающиеся подложки. Для анализа нанесенных пленок использовались методы оптической интерферометрической профилометрии, рентгенофлуоресцентного анализа и стандартные методики измерения диэлектрических характеристик тонких пленок.

Научная новизна диссертационной работы заключается в использовании метода нанесения сегнетоэлектрических слоев на вращающиеся подложки. Данная технология позволяет повысить равномерности толщины наносимых слоев, а также обеспечивает получение пленок заданного состава и геометрического профиля с высокой воспроизводимостью.

Положения, выносимые на защиту

Результаты исследования процессов нанесения сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней на стационарные и вращающиеся подложки при ВЧ магнетронном распылении, показывающие, что профиль распределения толщины нанесенных пленок имеет неоднородное распределение, и толщина пленки уменьшается с удалением от центра подложки, расположенной у оси магнетрона, к периферии более чем в 4 раза. При этом компонентный состав нанесенной пленки также имел неоднородное распределение состава, а именно:

с удалением от центральной части подложки к периферии в 1,2 – 1,4 раза увеличивалась концентрация O, Ta и Nb и уменьшалась концентрация Bi и Sr.

Модель расчета профилей распределения толщины наносимых пленок при ВЧ магнетронном распылении, которая учитывает поток формирующихся отрицательно заряженных ионов. Проведенная верификация предложенной модели при распылении SBTN мишеней магнетронами RIF-039 и MARS-080 показала, что погрешность моделирования не превышает 10 %. Анализ результатов моделирования показал, что при распылении сегнетоэлектрических мишеней угол разлета и количество ионизированного материала зависит от напряжения постоянного смещения мишени и может достигать 22 %.

Конфигурация процесса нанесения тонких пленок SBTN на вращаемую подложку при смещении оси магнетрона относительно оси подложки, что позволило уменьшить неравномерность толщины наносимой пленки на подложке \varnothing 100 для магнетрона RIF.039 мм до ± 19 %.

Результаты исследований распределения толщины нанесённых пленок показывающих, что профиль распределения толщины нанесенной пленки SBTN при вращении подложки \varnothing 200 мм и смещении оси подложки относительно оси магнетрона на 70 мм позволило добиться толщины пленки около 180 нм. При этом неравномерность толщины нанесенной пленки составила примерно ± 6 %, однако на краях подложки на расстоянии 20 мм отмечалось значительное снижение толщины пленки.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав с выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 81 страницу, в том числе 55 иллюстраций и 30 наименований в библиографическом списке, 4 публикации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы сформулированы цель и задачи диссертации, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, описаны предмет и методы исследования, установлена научная новизна диссертационной работы. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, также указаны структура и объем диссертации.

Во введении рассмотрено современное состояние проблемы нанесения тонких пленок сегнетоэлектриков в вакууме на крупноформатные подложки. Также затронуты самые простые и эффективные методики по нанесению равномерных по толщине тонких пленок при магнетронном распылении.

В первой главе проводится анализ существующих методов нанесения тонких пленок в вакууме. Основное внимание уделяется ионно-плазменным методам нанесения многокомпонентных тонких пленок. Также рассматриваются самые перспективные пути повышения эффективности нанесения тонких пленок при магнетронном распылении.

Во второй главе проводятся исследования особенностей процессов нанесения тонких пленок сегнетоэлектриков методом ВЧ магнетронного распыления. Рассматриваются компонентный состав полученных пленок, а также профили распределения толщины сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней.

В третьей главе основное внимание уделяется разработке модели процессов магнетронного нанесения пленок SBTN на вращающуюся подложку. На основе полученных экспериментальных данных разработана модель расчета толщины наносимых слоев при ВЧ магнетронном распылении, которая позволяет рассчитать профиль распределения толщины пленки при распылении сегнетоэлектрической мишени с учетом формирующегося потока отрицательно заряженных ионов.

В четвертой главе была разработана и изготовлена система магнетронного нанесения тонких пленок на вращающиеся и планетарно-перемещаемые подложки.

В пятой главе проводится исследование процессов нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления на перемещаемые подложки. Рассматривается методика проведения экспериментов. Анализируются экспериментальные данные. Устанавливается, что при оптимальной конфигурации система позволяет добиться неравномерности толщины нанесенной пленки $\pm 6\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе произведен анализ современных способов вакуумного нанесения тонких пленок на крупноформатные подложки. На основе этого анализа были предложены пути по повышению равномерности толщины наносимых покрытий при магнетронном распылении.

Были проведены исследования по нанесению сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней на стационарные и вращающиеся подложки. При ВЧ магнетронном распылении данных мишеней профиль распределения толщины нанесенных пленок имеет неоднородное распределение, и толщина пленки уменьшается с удалением от центра подложки, расположенной у оси магнетрона, к периферии более чем в 4 раза. При этом компонентный состав нанесенной пленки также имел неоднородное распределение состава, а именно: с удалением от центральной части подложки к периферии в 1,2 – 1,4 раза увеличивалась концентрация O, Ta и Nb и уменьшалась концентрация Bi и Sr.

На основе полученных экспериментальных данных была разработана модель расчета профилей распределения толщины наносимых пленок при ВЧ магнетронном распылении, которая учитывает поток формирующихся отрицательно заряженных ионов. Проведенная верификация предложенной модели при распылении SBTN мишеней магнетронами RIF-039 и MARS-080 показала, что погрешность моделирования не превышает 10 %. Анализ результатов моделирования показал, что при распылении сегнетоэлектрических мишеней угол разлета и количество ионизированного материала зависит от напряжения постоянного смещения мишени и может достигать 22 %. Исходя из полученных данных была предложена конфигурация процесса нанесения тонких пленок SBTN на вращаемую подложку при смещении оси магнетрона относительно оси подложки, что позволило уменьшить неравномерность толщины наносимой пленки на подложке $\varnothing 100$ для магнетрона RIF.039 мм до ± 19 %.

При проведении исследований по полученной модели установлено, что профиль распределения толщины нанесенной пленки SBTN при вращении подложки и смещении оси подложки относительно оси магнетрона на 70 мм позволило добиться толщины пленки около 180 нм. При этом неравномерность толщины нанесенной пленки составила примерно ± 6 %, однако на краях подложки на расстоянии 20 мм отмечалось значительное снижение толщины пленки.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Формирование пленок оксида тантала на подложках диаметром 200 миллиметров / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, Т. Д. Нгуен, А. Д. Голосов, Э. Е. Литвин, Н. Н. Лам // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1. – С. 12–17.

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. 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.

4. 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.