

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

УДК 621.793.18

Шекелевский

Вадим Владимирович

Влияние плазмообразования на формирование потока материала в
процессе магнетронного распыления

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы»

Научный руководитель
Котов Дмитрий Анатольевич
к.т.н., доцент кафедры МНЭ

Минск 2021

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ионно-плазменные методы нанесения тонкопленочных покрытий находят широкое применение в производстве изделий микро- и нанoeлектроники, оптики и оптоэлектроники. Это обусловлено их экологической безопасностью, высокой чистотой технологических процессов и качеством получаемых пленок.

Проблемой существующих методов нанесения покрытий является либо высокая стоимость оборудования, небольшие скорости осаждения покрытий и небольшие площади обрабатываемых поверхностей с низким коэффициентом использования материала мишени, как у ионно-лучевого распыления, либо плохая равномерность толщины наносимой тонкой пленки, низкая адгезия, как у термического распыления, либо высокое рабочее напряжение разряда и, как следствие, нарушение структуры конденсируемой пленки из-за бомбардировки электронами с высокой энергией, как у диодного распыления.

Только магнетронное распыление в какой-то степени лишено этих недостатков и при этом обладает рядом достоинств: высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях и при низких давлениях рабочего газа, отсутствие перегрева подложки, возможность получения равномерных по толщине пленок на большей площади подложек, сравнительно высокая скорость нанесения пленки при возможности оперативного управления параметрами процесса, высокая чистота и плотность создаваемых слоев, хорошая масштабируемость технологии, что позволяет создавать линии непрерывного действия.

Несмотря на все это, магнетронные распылительные системы и технологии с их использованием разрабатывались и оптимизировались эмпирически только методом постепенного приближения (проб и ошибок), используя экспериментальный опыт, что требует значительных временных затрат и материальных ресурсов. Компьютерное моделирование позволяет уменьшить стоимость и время доводки ионно-плазменного оборудования и во многих случаях является единственным способом выбора оптимального решения. В настоящее время в открытом доступе не представлены сквозные методики расчета неравномерности покрытия, нанесенного методом магнетронного распыления. Имеются расчеты только определенных процессов, протекающих при распылении, и не даны способы перехода от одних расчетов к другим. Также не приведено решение обратных задач, которые используя неравномерность пленки позволят сконструировать магнетронную систему. Поэтому вопрос о разработке сквозных методик расчета процессов при ионно-плазменном распылении является актуальным.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Актуальность темы заключается в широком применении магнетронного распыления в промышленности и научных исследованиях в областях микро- и нанoeлектроники, оптики и оптоэлектроники, и связанной с этим необходимостью наличия физико-математических моделей, упрощающих разработку, конструирование и оптимизацию магнетронных распылительных устройств.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является изучение влияния формируемых в плазме магнетронного разряда заряженных частиц на геометрические характеристики потоков распыляемых атомов и конденсируемого материала на подложке. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести аналитические исследования процесса магнетронного распыления;
- разработать экспериментальный комплекс для получения тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления, методов и методик проведения исследований;
- определить распределение профиля ионного тока в плоскости перпендикулярной поверхности мишени от ее центра к краю исходя из конфигурации магнитной системы магнетронного распылительного устройства, и на основе этого рассчитать профиль равномерности покрытия, осажденного на подложку;
- провести экспериментальные исследования по верификации полученных расчетных результатов.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования являются плазма магнетронного разряда и поток распыленных частиц. Предметом исследования являются зависимости и закономерности процессов плазмообразования и распыления из катодного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы».

Теоретическая и методологическая основа исследования. В результате выполнения аналитических исследований были рассмотрены

принципы работы магнетронных распылительных устройств, и методики описания процессов, протекающих при распылении, имеющиеся в настоящее время.

Для изучения влияния плазмообразования на формирование потока материала мишени проводились расчеты в программном комплексе Comsol Multiphysics методом конечных элементов. Предварительно геометрия всех элементов создавалась в CAD - приложении Autodesk Inventor Professional и далее импортировалась в Comsol Multiphysics. Также был использован язык программирования Python. Экспериментальные исследования осуществлялось в вакуумной установке ВУ-1Бс.

Информационная база исследования заключается в разработке методики определения неравномерности осажденного на подложке покрытия исходя из параметров магнитной системы магнетронного распылительного устройства и профиля зоны эрозии мишени.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики определения распределение профиля ионного тока в плоскости перпендикулярной поверхности мишени от ее центра к краю исходя из конфигурации и величины индукции магнитного поля в зоне плазмообразования.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные результаты:

Разработана методика определения профиля плотности ионного тока на поверхность мишени магнетронного распылительного устройства, основывающаяся на расчете положения электронной компоненты в области плазмообразования методом Monte-Carlo, исходя из величины и конфигурации магнитного поля, что позволило установить диаметр зоны распыления как 0,9 от диаметра мишени с отклонением профиля плотности ионного тока +3%, это в свою очередь позволило, с учетом расстояния мишень-подложка, установить диаметр зоны конденсации материала с заданной неравномерностью на подложке, которая была верифицирована методом сравнения с экспериментальными измерениями и показала отклонения не более 5%.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Разработка, расчеты и верификация полученных результатов проводилась соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем проводилась разработка расчетной методики для выполнения задач, поставленных в данной работе. Анализ экспериментальных результатов проводился совместно с научным руководителем кандидатом технических наук Котовым Д.А.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок были не однократно представлены на республиканских и международных конференциях.

Также по теме работы в 2020 году выполнялся Грант Министерства образования Республики Беларусь.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 5 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 45 наименований. Общий объем диссертации составляет 56 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено преимущество применения магнетронного распыления перед другими методами для нанесения тонкопленочных покрытий, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** приводятся аналитические исследования принципа работы магнетронного распылительного устройства и рассмотрены основные явления, происходящие во время распыления.

Во **второй главе** дано описание экспериментальной установки, изготовленной на базе вакуумного поста ВУ-1Бс, а также даны методики проведения экспериментальных измерений толщины осажденного покрытия, профиля зоны эрозии мишени, значений магнитной индукции магнитной системы магнетронного распылительного устройства.

В **третьей главе** рассмотрены основные подходы, имеющиеся в настоящее время для физико-математического описания тлеющего разряда магнетронной системы, а также проведен выбор методик и их описание для написания программы на языке программирования Python, которая будет использоваться для расчета неравномерности осаждаемого покрытия на подложке.

В **четвертой главе** проведена верификация разработанной методики, даны выводы о влиянии магнитной ловушки на параметры тлеющего разряда над поверхностью мишени и рассмотрено влияние этого разряда на поток распыляемого материала мишени, а также на его осаждение на подложку.

В **выводах** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа научной литературы по теме работы была показана актуальность метода магнетронного распыления в производстве изделий микро- и нанoeлектроники, а также других областях, требующих получение тонкопленочных металлических или диэлектрических покрытий. Также был проведен анализ принципа работы магнетронной распылительной системы и процессов, происходящих во время распыления.

Из рассмотренных методов для моделирования и расчета плазмы был выбран метод Monte-Carlo для движущихся заряженных частиц в скрещенных магнитном и электрическом полях.

На основе выбранного метода и составленной методики расчета профиля плотности ионного тока на поверхности мишени нами была разработана программа на языке программирования Python в которой были проведены расчеты профилей концентрации электронов в плазме тлеющего разряда методом Monte-Carlo, которые в дальнейшем аппроксимировались гауссовой функцией и использовались при расчете профиля плотности распределения ионного тока на поверхности мишени. Далее, используя профиль плотности ионного тока, проводился расчет профиля зоны эрозии мишени.

На основании косинусного закона распыления была разработана методика расчет неравномерности осажденного покрытия на подложке для плоской мишени, геометрическая конфигурация зоны эрозии которой рассчитывалась ранее.

Также были проведены экспериментальные работы по осаждению пленок алюминия на подложки, измерение значений индукций магнитного поля исследуемого магнетронного устройства с диаметром мишени 80 мм, а также исследование распределения толщины осажденного покрытия методом микроинтерферометрии.

Проведение расчетных и экспериментальных исследований показало высокую точность разработанной методики с погрешностью в профили зоны эрозии мишени порядка 6%, а также совпадение профилей осажденного покрытия на подложке при заданном расстоянии мишень-подложка для начального времени распыления плоской мишени в 10 минут.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Шекелевский, В.В. Метод расчета профиля зоны эрозии мишени магнетронной распылительной системы / В. В. Шекелевский, Бездников М. С. // Радиотехника и электроника : материалы 56 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 21 – 24 апреля / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 87-89.

[2] Шекелевский, В.В. Методика расчета магнитной ловушки при проектировании магнетронного распылительного устройства / В. В. Шекелевский, Бездников М. С. // Радиотехника и электроника : материалы 56 науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 21 – 24 апреля / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 76-78.

[3] Шекелевский, В.В. Алгоритм расчета зоны плазмообразования в магнетронной распылительной системе / В. В. Шекелевский, Бездников М. С. // Радиотехника и электроника : материалы 55 юбилейной науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22 – 26 апреля / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 179-181.

[4] Шекелевский, В.В. Алгоритм определения профиля распределения плотности ионного тока в магнетронной распылительной системе // Материалы XXVIII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 17 апр. 2020 г.) / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. – Гродно : ГрГУ, 2020. – С. 154-157.

[5] Шекелевский, В.В. Расчет неравномерности покрытий, формируемых методом ионно-плазменного распыления / В. В. Шекелевский, Р. Диас, Д. А. Котов // Молодежь в науке – 2019 : тезисы докладов XVI Международной научной конференции молодых ученых (Минск, 14–17 октября 2019 г.) / Нац. акад. наук Беларуси, совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2019. – С. 503-506.