

УДК 537.535

Ионный распылитель со встречно-расположенными мишенями

А. П. Еремин, В. Д. Смольянинов

ГП "Научно-исследовательский институт электронной оптики", Москва, Россия

А. М. Филачев

Государственный научный центр НПО "Орион", Москва, Россия

Рассмотрены характеристики и возможности магнетронного и ионного распылителя.

Получение высококачественных тонких металлических, диэлектрических, полупроводниковых и магнитных пленок — одна из актуальных задач технологии изготовления различных элементов радиоэлектронной аппаратуры, робототехники, вычислительной техники, технических средств связи. Наряду с классическими системами (термовакuumный метод, электронно-лучевой метод, диодная система распыления) в последние годы большое распространение получили магнетронные распылительные системы (МРС) [1]. Области применения МРС все более расширяются, что наглядно видно из нижеприведенных данных:

Назначение	Получаемые пленки
Металлизация дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем	Al, Al—Si, Al—Si—Cu, W—Ti—Al, W—Ti—Au, W—Ti—Cr, Ti—Pt—Au, Ti—Pd—Cu, W—Ti, Cr—Au, Al—Ni—Au
Металлизация мощных кремниевых приборов	NiCr—Al—Cu, Cr—Cu, Cr—Ag, Cr—Au—Ag
Металлизация керамики	Ti—Cu, NiCr—Cu, Al—Cu
Получение балочных выходов	Ti—Pt—Au
Резистивные пленки	Ta, TaN, Ta—Al, NiCr
Магнитные пленки	NiFe, CdCoCu
Сверхпроводящие пленки	Nb, NbN, Nb ₃ Al, Nb ₃ Sn, Nb ₃ Ge
Диэлектрические пленки	Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , SiO ₂ , AlN, Ta ₂ O ₅
Оптические покрытия	SiO ₂ , TiO ₂ , In ₂ O ₃ , SnO ₂
Фотоэлементы, солнечные батареи	Si, CuS, CdS, карбиды и силициды
Многослойные поглощающие покрытия	Fe, Cr, Ni, Mo, Ti
Фотошаблоны	Cr, Cr ₂ O ₃
Печатные платы	Cu
Упрочняющие и износостойкие покрытия	TiN, MoC, SiC
Пьезоэлементы	

Из данных видно, что с помощью МРС можно получать пленки как простого, так и сложного состава полупроводников и диэлектриков.

К настоящему моменту хорошо изучены и исследованы МРС планарного типа, которые нашли широкое применение в промышленности. Вопросы теории магнетронного распыления изложены в работе [3].

Наименее изучены и исследованы МРС с встречно-расположенными мишенями. Интерес к данным системам появился при получении пленок сложного состава с тремя и более компонентами, характерными для магнитных пленок.

Особенности распыления ферромагнитных материалов требуют внимательного их изучения и анализа.

Вопросы получения магнитных пленок и исследования их свойств впервые в стране были опубликованы в 1980 г.

Наиболее высокие требования к операциям нанесения магнитных пленок предъявляются при изготовлении запоминающих устройств на ЦМ1. Пермалловые пленки должны иметь высокое магнитное сопротивление, низкую магнитострикцию, минимальную коэрцитивную силу и высокую удельную электропроводность. Кроме того, они должны обладать хорошей адгезией к подложке, отсутствием остаточных механических напряжений и проколов, гладкой поверхностной текстурой, высокой равномерностью по толщине.

Очень важно в процессе нанесения магнитных пленок поддерживать в определенной плоскости магнитное поле, чтобы иметь близкую к нулю магнитострикцию.

Все вышеперечисленные свойства магнитных пленок прямо связаны с их химическими свойствами. Даже незначительные изменения в химическом составе пленок оказывают существенные влияния на магнитострикцию. Поэтому необходимо контролировать не только процентное соотношение в сплаве, но и количество загрязняющих газовых примесей. Например, примеси кислорода и воды увеличивают электрическое сопротивление пленки, коэрцитивную силу и температурный коэффициент сопротивления пленок.

То же самое относится к пленкам, полученным при создании магнитных головок на основе сендаста. Сендаст — это сплав из Fe, Si, Al — хорошо известный магнитомягкий материал. И магнитокристаллическая анизотропия, и магнитострикция исчезают при следующем составе: S — 9,6 %, Al — 5,5 %, остальное — Fe.

В отличие от пермаллоя сендаст обладает повышенной механической прочностью и хорошо подходит к тем случаям, когда прибор работает при механических воздействиях. При работе на радиочастотах для улучшения эксплуатационных характеристик необходимо создать тонкопленочную структуру, состоящую из слоев сендаста толщиной 3,5 мкм и монооксида кремния толщиной 0,5—1 мкм.

Анализ тенденции развития систем для распыления магнитных материалов показал, что наилучшие результаты дает конструкция магнетрона со встречно-расположенными мишенями. Если планарные магнетроны переносят материал мишени по составу с точностью до 0,5 %, то встречно-расположенный магнетрон дает 0,3 %. Метод нанесения тонких пленок таким устройством называется “оппозит метод”.

При разработке МРС со встречно-расположенными мишенями особое внимание уделено конструкции магнетрона и возможности вакуумного формирования декоративных и комбинированных защитных покрытий из композиционных материалов, в том числе пленок нитридов алюминия, титана и тантала, а также магнитных пленок.

Исходя из анализа информационного материала, была разработана схема ионного распылителя с двумя мишенями, расположенными одна против другой в магнитном поле. Подложка помещается между мишенями.

Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид площадки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенями (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле, и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны — поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циркулируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию.

Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, а следовательно, и скорости осаждения пленки.

В состав ионного распылителя входят: анод, магнитопробод, две охлаждаемые магнитные системы, два держателя мишеней с мишенями.

Магнитопробод представляет собой два кронштейна из стали 20, к горизонтальной части которых крепятся с помощью болтов планки с прорезями размерами 50x10 мм, в пределах которых можно менять расстояние между мишенями. К вертикальной части кронштейнов крепятся полюсные наконечники с электромагнитными катушками. Вода для охлаждения корпуса катушек поступает через штуцер.

Магнитное поле, необходимое для концентрации высокоплотной плазмы на поверхности мишени, создается электромагнитными катушками, находящимися за мишенями, и его величина составляет 0,01 т. Эта магнитная система формирует магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны поверхности мишени. Мишени являются полюсами магнита, одна мишень является северным полюсом, а другая — южным.

К торцам полюсных наконечников крепятся охладители с мишенями. Распыляемые мишени вакуумно-плотно крепятся к охладителям и охлаждаются холодной проточной водой, поступающей в охладитель по гибким трубкам из изоляционного материала через штуцера, вваренные в радиатор охладителя.

Мишени электрически изолированы с помощью пластин из фторопласта от корпусов ионного распылителя, которые одновременно являются полюсными наконечниками.

Анод представляет собой O-образную пластинку из стали 12X18H10T, приваренную к корпусу анода, который закрепляется на корпусе — полюсном наконечнике ионного распылителя. По периметру O-образных пластин приварена трубка, по которой проходит холодная вода и охлаждает анод.

В данной работе ионный распылитель устанавливается в камеру вакуумной установки ВУ-150, к нему подводятся кабель и шланги энерго- и водоснабжения. Конструкция ионного распылителя позволяет устанавливать его практически в любой вакуумной установке.

На специальных подложкодержателях устанавливаются подложки. В зависимости от требований и целей технологического процесса подложки распо-

лагаются по всему периметру разрядного промежутка или одной-двум подложкам между мишенями. За один технологический цикл можно нанести покрытие 10 подложек размером 60x48 мм.

Экспериментальные исследования разработанного ионного распылителя показали эффективность его использования для получения тонкопленочных покрытий различного назначения из металлов, диэлектриков, сплавов и магнитных материалов, что представляет особый интерес.

В процессе работы были получены пленки алюминия, тантала, титана и меди, причем для напыления пленок меди высокого качества необходимо было использовать подслои металлов, дающих высокую адгезию к стеклу (хром, титан, вольфрам, молибден). Одновременно была разработана эффективная технология нанесения повышающих износостойкость покрытий из нитрида алюминия и эффективных декоративных покрытий из нитрида титана (золотистый цвет) и нитрида тантала (серебристый цвет и высокая износостойкость).

Особо следует остановиться на проведенных исследованиях получения магнитных пленок, так как к процессу нанесения магнитных пленок предъявляются достаточно жесткие требования: кроме обеспечения требуемых магнитных характеристик, необходима высокая адгезия к подложке, отсутствие остаточных механических напряжений и проколов, обеспечение высокой равномерности по толщине и гладкой поверхностной структуры [3, 4].

Экспериментальные исследования разработанного ионного распылителя показали не только его работоспособность, но и позволили найти зависимость коэрцитивной силы наносимых пленок от условий напыления: давления напыляемого газа, температуры подложки и скорости напыления. Пленки с низкой коэрцитивной силой (меньше 1 Э) и высокой накальной проницаемостью получались при высоком давлении, высокой температуре подложек и пониженной скорости осаждения.

Так, пленки никеля наносились со скоростью 60 км/мин, причем пленки, полученные при давлении Ag, равном 0,6 Па, имели кристаллиты, ориентированные перпендикулярно к плоскости пленки, а при давлении 1 Па — кристаллиты случайно ориентированы, пленка имеет столбчатую структуру, грубую поверхность.

Проводились тщательные исследования дефектности наносимых магнитных пленок, разработанная технология позволила на представленном макете ионного распылителя со встречно-расположенными мишенями получить дефектность, определяемую как 0,01—0,02 прокола на 1 мм² поверхности.

Таким образом, разработанный ионный распылитель пригоден для получения покрытий из металла, диэлектриков, сплавов и магнитных материалов с высокой степенью сохранения стехиометрии.

Основные технические характеристики

Номинальная мощность ионного распыления, кВт	3,0
Рабочее давление, Па	0,4—1,0
Скорость напыления по меди, нм/с	50
Рабочий газ	инертные и активные газы
Максимальный коэффициент использования мишени, %	70
Диаметр обрабатываемых подложек, мм	150
Масса, кг (без блока питания)	5,0

На разработанный распылитель имеются эскизная конструкторская документация, а также ряд разработанных технологических процессов.

Л и т е р а т у р а

1. Лабунев В. А., Данилович Н. И., Укусов В. А., Минайчев В. Е. Современные магнетронные распылительные устройства//Зарубежная электронная техника. 1982. № 10 (256). С. 3—62.
2. Электронная техника. Сер. 6. Вып. 6(176). С. 66.
3. Минайчев В. В., Одинокоев В. В., Сливаков Д. Д., Тюфяева Г. П. Магнетронное распыление магнитных материалов: Обзоры по электронной технике. Сер. 7. ТОПО. 1985. Вып. 14(1138).
4. Magnetic and Cristallographical Characteristics of the Sendust Films formed by DC Opposite Sputtering Method Michiuori Miura, Katsuyuki Tanaka and Yoshihiro Noro//Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. № 8. P. 1192—1202.
5. Preparation of high-coerciviti Co-Rt alloy films by target-facing type of hygh-rate sputtering/Masahiko Naoe, Vonichi Hochi, Shum ichi Jawanaka and Minoru Kume//Ibid. 1983. V. 22. № 10. P. 1519—1522.
6. Волчков В. И., Ренская И. В., Смольянинов В. Д., Стоянов П. А., Николайчук С. А. Исследование характеристик устройств для нанесения тонкопленочных покрытий методом ионного распыления//В сб. тез. докл. семинара "Ионная обработка оптических материалов и создание высокоточных оптических элементов". — М., ЦНИИ информации. 1983. С. 32—35.

Ionic atomizer with counter-arranged targets

A. P. Eremin, V. D. Smolyaninov

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A. M. Filachev

The State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

The characteristics and opportunities of magnetron ionic atomizer are considered.