

Рассмотрим условия равновесия для внутренней и внешней поверхностей слоя. Выраженные через твердость выражения имеют вид:

$$H_M = \frac{P}{S}; \quad (5)$$

$$H_l = \frac{P}{S_l}, \quad (6)$$

где P – нагрузка на индентор; S – площадь проекции отпечатка; H_M – твердость по Мейеру; S_l – площадь, найденная с учетом среднего значения l ; H_l – твердость с учетом размера l .

Выражение для площади S_l выглядит следующим образом:

$$S_l = (\sqrt{S} + 2l)^2. \quad (7)$$

Тогда выражение для твердости по Мейеру с учетом (5)–(7)

$$H_M = H_l \left(1 + \frac{2l}{\sqrt{F}} \right). \quad (8)$$

Выражение (8) учитывает эффект масштабного фактора с точки зрения дислокационной теории упрочнения и позволяет оценить размер l при статических измерениях твердости. При

этом за твердость по Мейеру принимается значение твердости, измеренное при больших размерах отпечатка индентора, когда проявление эффекта масштабного фактора пренебрежимо мало.

Разработана установка для измерения статической твердости методом восстановленного отпечатка в диапазоне нагрузок от 1 до 35 Н. Испытания показали, что разработанная установка имеет разрешение по нагрузке порядка 0,1 Н. Установка позволяет регистрировать ход кривых статического индентирования при исследованиях физико-механических свойств металлических структур с покрытиями.

Рассмотрен метод учета эффекта масштабного фактора при статических измерениях твердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klepachko J. R. The newest development on physically based constitutive modeling in dynamic plasticity // Proceedings of the Sixth International Conference Mechanical Behaviour of Materials-VI. – Kyoto, Japan, 1991. – С. 235–244.
2. Шоршоров М. Х., Алехин В. П., Булычев С. И. О масштабной зависимости твердости // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 3, вып. 2. – С. 374–379.
3. Предводителев А. А., Рожанский В. Н., Степанов В. М. Процессы деформирования материалов в микрообъемах // Кристаллография. – 1962. – № 7. – С. 418.
4. Алехин В. П., Терновский А. П. Структурные и кинетические особенности формирования материалов при микровдавливании // Новое в испытаниях на микротвердость. – М., 1974. – С. 29.

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА И ИХ АДАПТАЦИЯ К МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

Асп. ФИГУРИН К. Б., канд. техн. наук ФИГУРИН Б. А.

Белорусский национальный технический университет

Магнетронный распылитель является высокоэнергетическим устройством, преобразующим энергию магнитного поля и локализованного тлеющего разряда в энергию распыленных ато-

мов материала катода. Плазма локализованного тлеющего разряда обладает наибольшей тепловой энергией и является источником лучистого нагрева при обработке подложек и покрытий.

Это достоинство позволяет расширить рамки технологических возможностей магнетрона и исключить использование дополнительных устройств. Несмотря на сложность и многофакторность процесса распыления в скрещенных магнитном и электрическом полях, энергетические параметры могут быть изучены при исследовании влияния параметров процесса (давления рабочего газа, формы распыляемого катода-мишени, индукции магнитного поля) на вольт-амперные характеристики разряда.

Энергия тлеющего разряда находит применение в вакуумной технике при высокотемпературной обработке поверхности с целью изменения структуры поверхностного слоя подложки для синтеза базового материала покрытия. Тлеющий разряд легко адаптируется в цикл вакуумной обработки материалов, так как это самостоятельный разряд в газах с холодными электродами при силе тока $I = 10^{-5} \dots 10^1$ А и при падении напряжения вблизи катода не менее чем на $U = 100$ В. Обработка в плазме тлеющего разряда имеет ограничения, обусловленные как физикой процесса, так и техническими возможностями устройств. Получение материалов в аморфном состоянии возможно при определенной скорости отвода теплоты от подложки. Процесс аморфизации зависит от массы конденсируемого материала, осаждающегося на подложке, и его энергии. Последующая кристаллизация материала протекает при нагреве его вспомогательными нагревающими элементами.

Практическое применение нашел метод, где тлеющий разряд имеет значения силы тока $I = 10^{-4} \dots 10^{-1}$ А, при этом вольт-амперная характеристика от силы тока не зависит. Энергетические процессы, связанные с тлеющим разрядом, происходят в катодных областях разряда и на катоде. При изменении положения катода в пространстве положение катодных областей разряда не изменяется, при этом влияние положительного столба и анодных областей разряда мало. Возникновение разряда обусловлено электронами, эмитируемыми катодом при его бомбардировке положительными ионами, а также явлением фотоэффекта, возникающего вследствие излучения атомов в разряде. При приближении анода к катоду уменьшаются размеры анодных зон при сохранении размеров катодных зон.

Характерная структура нормального тлеющего разряда представлена на рис. 1, где темные

пространства – Астоново 1, катодное (Круксово) 3, Фарадеево 5, анодное 7; светящиеся зоны – катодный слой 2, отрицательное свечение 4, положительный столб 6, анодное свечение 8.

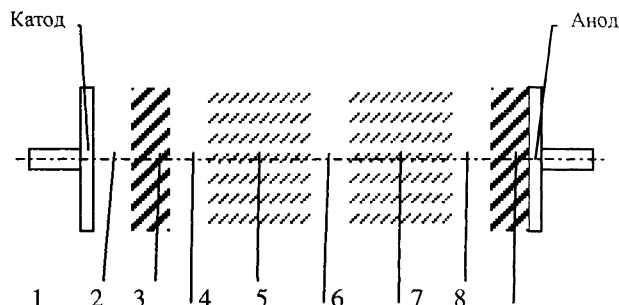


Рис. 1. Структура нормального тлеющего разряда

Пограничное пространство занимают темное Фарадеево пространство и примыкающая к нему часть области отрицательного свечения. На этих участках температура вторичных и медленных электронов снижается от единиц до десятых долей электрон-вольта. Высокая концентрация вторичных электронов $10^7 \dots 10^{10}$ в см^3 и низкая напряженность электрического поля исключают ионизацию газа в разряде. Такое состояние газовой плазмы соответствует условиям предварительной, а на этапе раздельного синтеза – окончательной обработки подложек.

Активацию поверхности подложек в тлеющем разряде [1] осуществляли при положении подложек на аноде [2] на расстоянии 15 мм от катода либо на катоде ионизирующего устройства. Обработку осуществляли при давлении газа $P \sim 200 \dots 300$ Па и постоянном токе $U \sim 500$ В, $I = 50$ мА. Длительность обработки – менее 30 с. Установлено, что при увеличении времени обработки более чем на 15...20 с происходит снижение адгезионной прочности покрытия. Площадь обрабатываемых поверхностей подложек не превышала площадь катода, поскольку иначе создаются условия для экранирования катода и исчезновения тлеющего разряда. При ионной бомбардировке диэлектриков (стекло, керамика, пластмасса и т. д.) происходят электризация поверхности, и загрязнение подложек продуктами эрозии катода. На начальных этапах обработки очищается и активируется поверхность подложек, а на последующих, установившихся, этапах она загрязняется.

При проведении экспериментов обрабатываемая подложка располагалась в области темного Фарадеева пространства, а активируемая поверхность подложки – параллельно катоду. Поверхность подложки защищали от загрязнения, располагая ее в сторону катода. Это значительно снижало влияние процесса бомбардировки катода на напыляемую поверхность, позволяло увеличить продолжительность обработки подложек в тлеющем разряде и повысить эффективность активации поверхности.

На рис. 2 показаны структура тлеющего разряда и координаты подложек перед напылением. В вакуумной камере напыляемая поверхность подложки 1 обращена в сторону катода 2. Поверхность катода находилась в одной плоскости с поверхностью анода. При этом использовали катод-мишень для создания тлеющего разряда. В качестве анода использовали стенки вакуумной камеры, что исключало необходимость создания автономных устройств для перемещения подложек из зоны предварительной обработки в зону напыления.

Расположение областей тлеющего разряда соответствовало их расположению в случае использования параллельно расположенных электродов. При этом катодные и анодные области образовывались вблизи одноименных электродов без изменения размеров областей. Значительные изменения происходили в переходной области

темного Фарадеева пространства и в пограничных светящихся областях. Область Фарадеева пространства занимала большой объем, соизмеримый с площадью катода и достаточный для расположения подложек. Подложки удалены от катода на расстояния, обеспечившие оптимальный режим напыления.

В результате предварительной обработки диэлектрических материалов установлено, что при встречном движении заряженных частиц (ионов и электронов) в плазме их траектории являются касательными к поверхности подложки и не заряжают ее. При осуществлении процесса синтеза керамических покрытий изменение положения подложек в Фарадеевом пространстве значительно увеличило продолжительность обработки. При высоком давлении газа $p \sim 10 \dots 12$ Па, а, следовательно, резком снижении длины свободного пробега распыленных атомов, загрязнения подложки материалом катода не происходило. В результате катодного распыления атомов аргона имела место очистка катода. Заключительным этапом предварительной обработки являлась подготовка к последующему распылению катода и напылению подложки.

Получение покрытий с использованием эффекта тлеющего разряда осуществляли при положении подложки в подложкодержателе на расстоянии 70...200 мм от катода. Обрабатываемая поверхность была обращена в сторону магнетро-

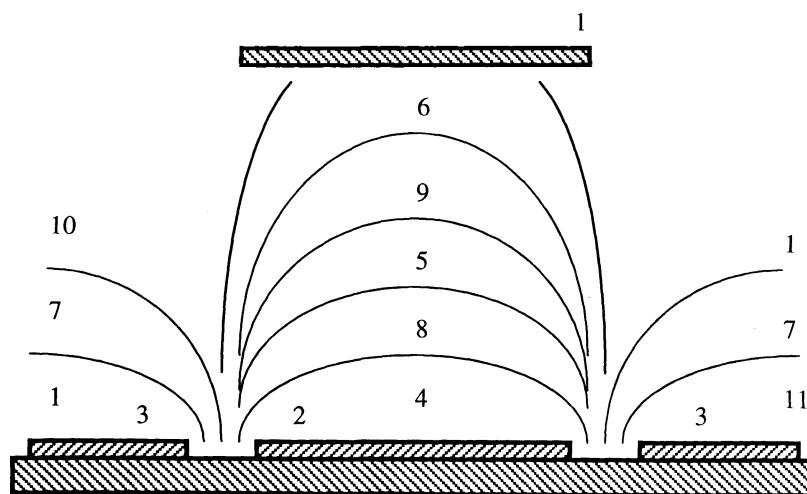


Рис. 2. Морфология плазмы тлеющего разряда: 1 – подложка; 2 – катод; 3 – анод; 4 – Астонново пространство; 5 – катодное пространство; 6 – Фарадеево пространство; 7 – анодное пространство; 8 – катодный слой; 9 – отрицательное свечение; 10 – положительный столб; 11 – анодное свечение

на. При давлении $p = 10...12$ Па включалось анодное напряжение $U = 1700$ В при выключенной магнитной системе. В зависимости от рода материала (полимеры, стекло, металлы) ток разряда катода изменяли в пределах $I = 0,15...0,80$ А, в качестве рабочего газа использовали воздух либо смесь воздуха и аргона в произвольной пропорции, продолжительность обработки – 1...5 мин. Эффективность предварительной обработки подложек в плазме тлеющего разряда очевидна и подтверждена данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

**Адгезионная прочность покрытий
с различными подложками при обработке
в плазме тлеющего разряда**

Материалы подложек	Состояние подложек	Адгезионная прочность, МПа		
		Ti	Ni	C
Стекло	Не обработано	4,0	3,0	2,1
	Обработано	15,0	14,0	11,0
Стекло-текстолит	Не обработано	2,3	2,1	0,9
	Обработано	8,1	7,4	4,2
Ситалл	Не обработано	3,5	4,1	3,8
	Обработано	14,0	21,0	12,3

Анализ результатов позволил сделать вывод о целесообразности использования темного Фарадеева пространства тлеющего разряда для обработки поверхностей подложек перед напылением. Установлено, что размер области Фарадеева пространства, независимо от расстояния мишени до подложки (50, 100, 150 мм), совпадает с диаметром катода-мишени. При таком расположении подложки в процессе распыления величина адгезионной прочности материала максимальна. При использовании сопредельных анодных областей для распыления адгезионная прочность материала резко уменьшалась. При распылении Ti на необработанные и обработанные в тлею-

щем разряде подложки адгезионная прочность составила 2,0 и 3,8 МПа соответственно.

Исследование структуры тлеющего разряда, основных закономерностей появления заряженных частиц в плазме, условий устойчивого существования и способов обработки подложки позволило значительно расширить рамки технологической применимости магнетронного распылительного устройства. Его можно использовать в качестве устройства тлеющего разряда. Размещение подложки в темном Фарадеевом пространстве с низкими энергиями электронов и низким содержанием ионной компоненты газовой атмосферы позволило создать условия для бездефектного взаимодействия материалов. Магнетрон также может использоваться в качестве нагревающего устройства за счет изменения одного технологического параметра – давления рабочего газа. Это обеспечит гибкость процесса обработки и позволит исключить применение автономных источников нагрева (резистивные и др.).

Магнетронный способ может быть использован на стадиях предварительной (дегазация подложек), промежуточной (согласование температурного уровня подложки и энергии конденсации) и окончательной (нагрев, кристаллизация) обработок подложек. Такое техническое решение исключает электризацию токопроводящих подложек и возможность их загрязнения материалом оснастки.

Разработанный способ нагрева обеспечил снижение уровня напряжений в покрытиях и повышение адгезионной прочности материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В. В., Упит Г. П. Влияние способа подготовки поверхности стекла на адгезию к нему вакуумных конденсаторов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 23–27.
2. Жаров В. А., Горелова О. Н. Влияние обработки поверхности полимера тлеющим разрядом и другими физическими методами пленок металлов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 4. – С. 102–104.