

СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

А.П. Бурмаков, К.В. Коротков, В.Е. Чёрный.
Белорусский государственный университет,
проспект Ф. Скорины, 4, 220050, Минск, Беларусь.

The spectroscopic research results of magnetron discharge used for deposition of film coatings are discussed. The influence of gas flow rate, discharge power, and pressure in vacuum chamber on the plasma emission is analyzed.

1. Введение. В процессах реактивного магнетронного распыления материалов, основанных на распылении материалов ионами разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, характеристики пленок химических соединений определяются соотношением потоков частиц материала и реактивного газа, образующих пленку, кинетической и потенциальной энергией этих частиц. Эмиссионный оптический спектр разряда характеризует состояние плазмы как инструмента обработки поверхности. Информация об интенсивности различных компонент спектра, а также о влиянии режима проведения процесса может быть положена в основу разработки способов управления реактивным магнетронным распылением.

2. Основная часть. В исследованиях использовались следующие материалы распыляемых мишеней: Ti, Al, InSn, V, Ta. Инертный газ – Ar, реактивные газы – кислород, азот, углеродосодержащий газ (C_2H_6). Диапазон мощностей разряда и давлений рабочего газа в проводимых экспериментах $W = 0,5-2,5$ кВт и $p = 0,2-0,6$ Па. Методика определения зависимости интенсивности основных элементов спектра разряда от параметров процесса значительно усложняется из-за неустойчивости системы мишень-плазма-пленка. Неустойчивость такой системы приводит к самопроизвольному её переходу в одно из двух устойчивых состояний процесса даже при сохранении на постоянном уровне всех внешних параметров разряда, таких как ток и напряжение разряда, давление в разрядной камере, расход инертного и реактивного газов, скорость откачки /1/.

Исключить влияние неустойчивости системы позволило применение ранее разработанного нами прибора спектрального управления /2/, который позволял поддерживать на заданном постоянном уровне интенсивность спектральных линий материала мишени путем управления расходом реактивного газа. На рис.1 показана динамика относительной интенсивности спектрального элемента материала мишени I_M и реактивного газа I_R при проведении процесса нанесения пленки в условиях поддержания на

постоянном уровне мощности разряда, давления в вакуумной камере и скорости откачки. Изменяемой величиной являлся расход реактивного газа. Здесь: t_0 – момент времени включения регистрирующей I_M и I_R аппаратуры; t_1 – момент зажигания магнетронного разряда в инертном газе; t_2 – момент подачи реактивного газа в вакуумную камеру; t_3 – момент выхода на требуемое значение I_M интенсивности I_M , т.е. на требуемый режим нанесения покрытия металл-реактивный газ (MR); t_4 – момент отключения обратной связи между интенсивностью I_M и расходом реактивного газа; t_5 – начальный момент самопроизвольного изменения состояния системы мишень-плазма-пленка; t_6 – момент выхода системы в одно из устойчивых состояний.

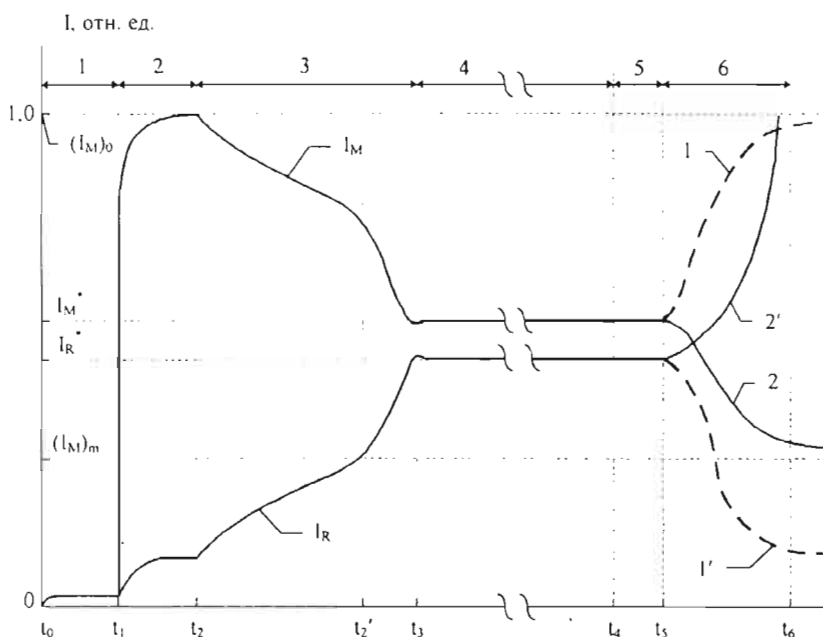


Рис. 1 Динамика относительной интенсивности спектрального элемента материала мишени I_M и реактивного газа I_R

Представленные зависимости I_M и I_R от времени носят универсальный характер. Качественно они сохраняются для всех использованных нами материалов мишени и типов реактивного газа.

Стадия t_2-t_1 (стадия 2) характеризует выход магнетронного разряда на стационарный режим горения в среде инертного газа. Длительность стадии 2 определяется временем установления теплового режима распыляемой мише-

ни и предысторией состояния поверхности мишени. Если разряд зажигается на мишени, частично или полностью покрытой пленкой соединения MR, то длительность стадии возрастает на время, необходимое для очистки мишени.

На стадии 3 (интервал t_2-t_3) происходит переход от режима нанесения пленки материала мишени к режиму нанесения стехиометрической пленки MR. Спад величины I_M обусловлен образованием соединения MR на поверхности мишени, коэффициент распыления которого всегда меньше коэффициента распыления чистой поверхности. Если вся поверхность мишени покрывается соединением MR, то достигается минимальное значение величины I_M , равное $(I_M)_m$. Величина $D = (I_M)_{\text{с}} / (I_M)_m$ слабо зависит от выбора спектральной линии и практически не зависит от мощности разряда и парциального давления аргона. Эта величина определяется материалом мишени, родом реактивного газа и является параметром чувствительности оптического управления для конкретного процесса.

При условиях проведения процесса, когда W и p являются постоянными, количественными показателями состояния системы мишень-плазма-пленка может являться величина $\alpha = [(I_M)_{\text{с}} - I_M] / [(I_M)_{\text{с}} - (I_M)_m]$, имеющая смысл степени реактивности процесса. Эта величина принимает значения от 0 до 1 и может служить в качестве критерия нанесения пленки требуемого состава. Анализ влияния величины α на состав покрытия показал, что для выбранной пары материала мишени – реактивный газ образование стехиометрического покрытия происходит в узком интервале значений α . Например, TiN при $\alpha = 0,65 \pm 0,03$; TiO_2 – при $\alpha = 0,75 \pm 0,04$; $(\text{InSn})_2\text{O}_3$ – при $\alpha = 0,72 \pm 0,03$.

Динамика интенсивностей I_M и I_R на стадии 4, которая является стадией нанесения пленки стехиометрического состава, характеризуется следующими особенностями. Высокочастотная модуляция величины I_M , обусловленная колебаниями напряжения источника питания разряда, снижается по сравнению со стадией 2 и не превышает 18%. Модуляция величины I_R на таких частотах не превышает 15%. Эта нестационарность не приводит к модуляции состава осаждаемого покрытия. В условиях проводимого эксперимента основными причинами изменения состава покрытия являются низкочастотные (меньше десятых долей Гц) колебания мощности разряда и давления в вакуумной камере. Влияние таких колебаний на плотность потоков частиц материала мишени и реактивного газа, следовательно, на состав покрытия изучено путем низкочастотного изменения на стадии 4 величин W и p в пределах 5-20% их средних значений. Наличие

обратной связи между I_M и g приводило в таких случаях к изменению I_R при постоянном значении I_M . В результате установлено, что в процессах нанесения оксидов и нитридов Ti и Al нестабильность величины $C = I_R/I_M$ связана с нестабильностью мощности разряда и давления соотношениями $\Delta C/C = (2,3-4,2)\Delta W/W$ и $\Delta C/C = (0,4-0,6)\Delta p/p$. В пределах указанных границ нестабильность зависит от абсолютных значений W и p и скорости откачки из вакуумной камеры.

С целью оценки влияния низкочастотных колебаний расхода реактивного газа g на состав осаждаемого потока регистрировались зависимости I_M и I_R от g путем медленного изменения рабочей точки процесса (величины I_M) с помощью прибора /З/ в условиях постоянства значений W и p . Переход к каждому предыдущему из каждого последующего состояния системы мишень-плазма-пленка проводился за время, необходимое для установления равновесия нового состояния, т.е. для установления нового стационарного значения величин I_M и I_R . Установлено, что для различных пар материал мишени – реактивный газ $\Delta C/C = (2,0-4,6)\Delta g/g$. Причем рост величины $\Delta C/C$ в указанных пределах обусловлен в первую очередь ростом скорости откачки.

После отключения обратной связи в момент времени t_4 , наблюдается сохранение степени реактивности, т.е. состава осаждаемого потока в течение промежутка t_4-t_5 (стадия 5 рис.1). На этой стадии система мишень-плазма-пленка находится в состоянии неустойчивого равновесия и появление случайных возмущений параметров процесса приводит к самопроизвольному переходу системы в одно из устойчивых состояний. При скоростях откачки, равных или меньше расхода реактивного газа, длительность стадии 5 составляет от долей секунд до минуты. С ростом скорости откачки длительность этой стадии может достичь единиц минут. Динамика переходов изображена на рис.1 кривыми 1 и 2 для I_M и кривыми 1' и 2' для I_R . Направление самопроизвольного перехода, т.е. уменьшение или рост α при переходе случайно и определяется знаком низкочастотного возмущения. Например, при $\Delta W > 0$ или $\Delta g < 0$ происходит спад α .

Литература:

1. Бурмаков А.П., Зайков В.А., Лабуда А.А., Чёрный В.Е. ЖПС. – 1996. – Т.63, № 6. – С. 1049-1053.
2. Бурмаков А.П., Лабуда А.А., Никифорова Н.Н., Чёрный В.Е. Вакуумная техника и технологии. – 1993. – Т.3, вып.2. – С. 5-7