

## ВЛИЯНИЕ САМОРАСПЫЛЕНИЯ НА СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РАБОТЕ МАГНЕТРОНА С ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ МИШЕНЬЮ

В.А. ГРУДИНИН, Д.В. СИДЕЛЁВ, А.С. ШАБУНИН, Г.А. БЛЕЙХЕР

Гомский политехнический университет

E-mail: vladergru@mail.ru

Магнетронные распылительные системы (МРС) с испаряющимися мишенями могут быть эффективным инструментом для высокоскоростного осаждения модифицирующих покрытий. Принципы функционирования этих устройств подробно описаны в научной литературе [1]. За счёт того, что дополнительно к потоку распылённых атомов на поверхности мишени появляется поток испарённых частиц, скорость осаждения покрытий может увеличиться на один-два порядка по сравнению с распылением твердотельных мишеней [1-2]. Одна из проблем широкого внедрения этих устройств в промышленность связана с отсутствием ясного понимания взаимного влияния механизмов эрозии при возникновении испарения мишени и функционирования разряда. Так, при высокой скорости удаления атомарных частиц с поверхности мишени эти частицы начинают участвовать в ионизационных процессах и возвращаться назад на мишень в качестве распыляющих ионов. Формируется самораспыление мишени. Из-за этого сокращается количество частиц в эрозионном потоке, которые достигают подложки и осаждаются на неё. Известно, что самораспыление заметно снижает скорость осаждения покрытий при работе мощных импульсных магнетронов. В настоящей работе получены результаты исследования этого явления на примере распыления жидкофазной медной мишени.

Изучение влияния самораспыления на скорость осаждения покрытий выполнялось посредством экспериментов и математического моделирования. В экспериментах использовалась МРС планарного типа, в которой катодный узел имел медную мишень, помещённую в кольцевой тигель из молибдена. Тигель крепился к корпусу магнетрона через тонкие вставки из графита. Подобный контакт позволил замкнуть электрическую цепь МРС и при этом существенно сократить теплопроводный сток из системы «мишень в тигле». Был использован среднечастотный источник питания магнетрона. Мощность  $Q$ , усреднённая по периоду, находилась в диапазоне от 1 до 5 кВт. Осаждение покрытий начиналось после выхода магнетрона в устойчивый режим работы. Подложка располагалась параллельно поверхности мишени на расстоянии 14 см. Измерение толщины покрытий производилось методом сферического металлографического микрошлифа.

Расчёт тепловых процессов в мишени и эрозионных потоков, формируемых на её поверхности, производился с использованием математической модели, описанной в [3]. При вычислении скорости осаждения покрытия на подложку в режиме самораспыления учитывался возврат на мишень её атомов, которые подвергаются ионизации в области разряда и формируют ионный ток. Пусть  $F_{ev}$  и  $F_{sput}$  – эрозионные потоки атомов меди с поверхности мишени за счёт испарения и распыления,  $F_{ion}$  – плотность потока ионов, которые попадают на поверхность элементарной площадки мишени с координатами  $(x_t, y_t)$ .  $F_{ion}(x_t, y_t) = I_{ion}(x_t, y_t) / e$ . Здесь  $I_{ion}$  – плотность ионного тока,  $e$  – заряд электрона. В расчётах  $I_{ion}(x_t, y_t) = W(x_t, y_t) / U$ , где  $W$  – плотность мощности ионного тока,  $U$  – напряжение, измеренное в экспериментах при соответствующей мощности  $Q$  источника питания МРС. Тогда скорость осаждения покрытия  $V_{dep}$  на поверхности подложки в области элементарной площадки с координатами  $(x, y)$  имеет следующий вид:

$$V_{dep}(x, y) = \frac{L^2}{\pi n_{nuc} S_{tag}} \iint \frac{(F_{sput}(x_t, y_t) + F_{ev}(x_t, y_t) - F_{ion}(x_t, y_t)) dx_t dy_t}{(L^2 + (x - x_t)^2 + (y - y_t)^2)^2}.$$

Здесь  $L$  – расстояние между мишенью и подложкой,  $n_{nuc}$  – ядерная плотность вещества мишени в конденсированном состоянии,  $S_{tag}$  – площадь поверхности мишени.

Для реализации режима самораспыления необходимо, чтобы коэффициент эрозии поверхности мишени  $Y$  (т.е. количество атомов, удаляемых с поверхности мишени под

действием одного иона) при бомбардировке ионами вещества мишени был больше единицы. Коэффициент распыления  $Y_{sput}$  поверхности меди ионами  $\text{Cu}^+$  с энергиями, имеющими место при работе МРС, больше единицы. Коэффициент эрозии поверхности мишени  $Y_{sum}$ , представляющий собой сумму коэффициента распыления и составляющей коэффициента эрозии за счёт испарения ( $Y_{ev}$ ), т.е.  $Y_{sum}=Y_{sput}+Y_{ev}$ , может значительно возрасти при появлении заметного испарения мишени.

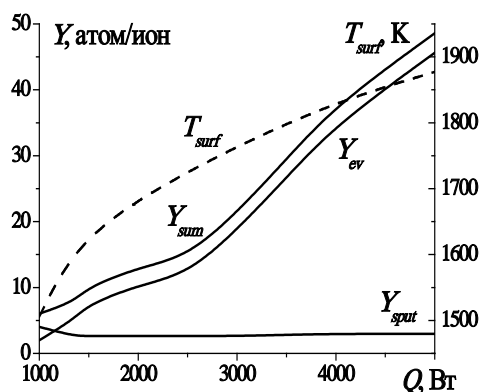


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента эрозии  $Y_{sum}$  поверхности медной мишени и её температуры  $T_{surf}$  от мощности МРС, работающей при подаче рабочего газа аргона

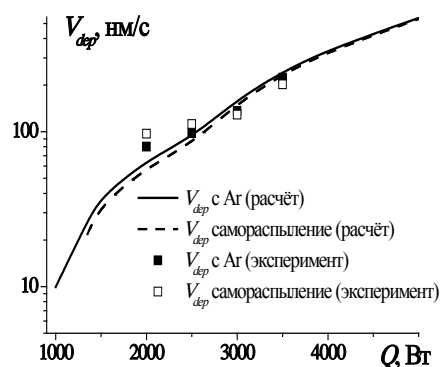


Рисунок 2 – Скорость осаждения медного покрытия ( $V_{dep}$ ) на подложке, в зависимости от мощности МРС. Линии – расчёт, точки – измерения

На рисунке 1 показаны рассчитанные зависимости коэффициента эрозии поверхности медной мишени в теплоизолированном тигле от мощности МРС для случая бомбардировки мишени ионами аргона. Здесь поток ионов на мишень рассчитывался по данным о токе и напряжении, измеренных в экспериментах. На этом рисунке видно, что составляющая коэффициента эрозии за счёт испарения нелинейно увеличивается с ростом  $Q$  и существенно превышает  $Y_{sput}$ . Переход в режим самораспыления практически не сказывается на поведении  $Y_{sum}$ . В результате скорость осаждения является практически одинаковой при работе МРС как с напуском рабочего газа, так и без него. Об этом свидетельствуют зависимости скорости осаждения от мощности, показанные на рисунке 2.

Таким образом, скорость осаждения покрытий с интенсивным испарением мишени практически не уменьшается при переходе МРС в режим самораспыления.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-08-00454.*

### Список литературы

1. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Эрозия поверхности твёрдого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 2014. – 248 с.
2. Bleykher G.A., Borduleva A.O., and etc. Features of copper coatings growth at high-rate deposition using magnetron sputtering systems with a liquid metal target // Surface & Coating Technologies. – 2017. – Vol. 324. – P. 111–120.
3. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Юрьева А.В. Магнетронное осаждение покрытий с испарением мишеней // Журнал технической физики. – 2015. - № 12. – С. 56-61.