

УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА МИШЕНИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ

А.П. Достанко, Д.А. Голосов, С.Н. Мельников, С.М. Завадский, М.В. Ермоленко, Д.Э. Окоджи
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь, dmgolosov@gmail.com

Проведены исследования профилей эрозии мишени магнетрона при различном уровне несбалансированности магнитной системы. Установлено, что профиль эрозии при постоянном давлении не зависит от режимов распыления, времени и материала мишени. Коэффициент использования материала мишени определяется только параметрами магнитной системы магнетрона и является характеристикой определенной магнетронной распылительной системы. Увеличение коэффициента использования материала мишени достигается за счет устранения фокусирующего действия магнитного поля и изменения кривизны силовых линий магнитного поля при несбалансированной конфигурации магнитного поля.

Введение

В настоящее время метод магнетронного распыления завоевал лидирующие позиции среди процессов формирования тонкопленочных слоев [1]. Поскольку в микроэлектронике широко используются мишени из драгоценных металлов, металлов платиновой группы, редких металлов, многокомпонентных сплавов и составов, эффективное использование материала мишени во многих случаях является главным критерием при разработке промышленных магнетронных распылительных систем (МРС). Кроме того, прогнозирование зоны эрозии также имеет важную практическую значимость при оптимизации равномерности нанесения пленок. С данной точки зрения эффективность МРС характеризуется коэффициентом использования материала мишени [2, 3]:

$$K_i = \frac{M_0 - M_k}{M_0}, \quad (1)$$

где M_0 – начальная масса мишени, M_k – конечная масса мишени при ее предельной выработке. Практическая оптимизация коэффициента K_i является сложной задачей, поскольку требует проведения ряда экспериментов по распылению мишеней различной толщины с разными комбинациями взаимного расположения магнитов. В данном случае методы компьютерного моделирования позволяют уменьшить время и стоимость оптимизации, и во многих случаях являются единственным способом найти приемлемое решение. Для создания адекватных моделей необходимо знать, какие параметры процесса оказывают решающее влияние на изменение профиля эрозии мишени.

Таким образом, целью работы было исследование профилей зоны эрозии мишеней при различном уровне несбалансированности магнитных систем магнетрона с целью увеличения использования материала мишени.

Эксперимент

Проведена серия экспериментов по распылению Cu, Ti и Al мишеней методом DC магнетронного распыления. Схема экспериментальной установки DC магнетронного распыления приведена на рис. 1. Для распыления мишеней Cu \varnothing 39×4.7 мм, Ti \varnothing 39×4.0 мм и Al \varnothing 39×4.35 мм (числота всех мишеней не менее 99.9 %) использова-

лась магнетронная распылительная система RIF.039.001 оригинальной конструкции. Конфигурации магнитного поля над поверхностью мишени магнетрона варьировались путем изменения объема центрального магнита магнитной системы. При диаметре центрального магнита 13 мм магнитная система магнетрона была практически сбалансированной. При использовании магнита \varnothing 10 мм была получена несбалансированная конфигурация магнитного поля II-го типа [4].

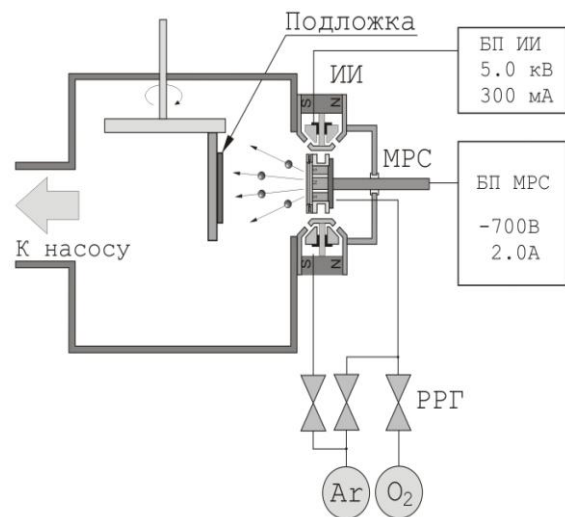


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для нанесения тонких пленок методом DC магнетронного распыления: МРС – магнетронная распылительная система, ИИ – ионный источник, РРГ – автоматический регулятор расхода газа.

Напряжение разряда в зависимости от степени выработки мишени изменялось от -670 до -350 В для Cu мишени, от -448 до -340 В для Ti мишени и от -490 до -340 В для Al мишени. Для Cu мишени общее время распыления составило 20 часов, для Ti – 12 часов, для Al – 16 часов. После каждого процесса распыления мишень извлекались из камеры, производилось ее взвешивание и измерение профиля эрозии. Масса мишени определялась с помощью аналитических электронных весов OHAUS Explorer. Профиль эрозии катода определялся с помощью двух головок индикаторов часового типа ИЧ-2 и ИЧ-10.

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования динамики изменения профиля эрозии Cu, Ti и Al мишеней в процессе DC магнетронного распыления при несбалансированной конфигурации магнитного поля (диаметр центрального магнита 10 мм). На рис. 2 представлено изменение профиля эрозии Cu мишени. Скорость эрозии Cu мишени в зоне максимальной плотности тока составляла 0.225 мм/час. Скорость эрозии Ti и Al мишеней в зоне максимальной плотности тока при том же токе разряда составляли соответственно 0.068 и 0.113 мм/час. В процессе распыления как Cu, так и Ti мишеней на краях зоны распыления формировались возвышения от первоначального уровня поверхности мишени. Эти возвышения появляются в результате обратной конденсации распыленных атомов. Обратный поток атомов мишени может возникать при термализации распыленных атомов или в результате бомбардировки мишени ионизированными распыленными атомами.

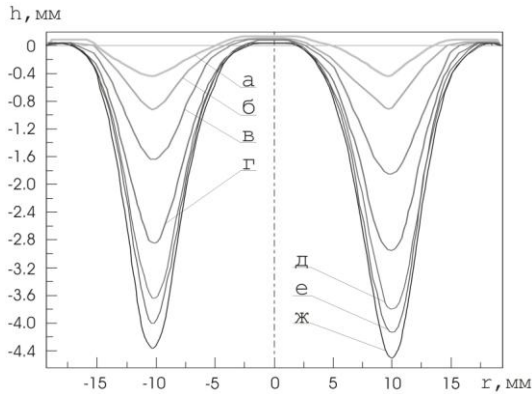


Рис. 2. Профили эрозии Cu мишени при различном времени распыления: а – 2 ч, б – 4 ч, в – 8 ч, г – 12 ч, д – 16 ч, е – 18 ч, ж – 20 ч.

Нормирование полученных профилей зоны эрозии Cu мишени после серии процессов распыления показало практически полное совпадение профилей (рис. 3). Нормированные профили эрозии Ti и Al мишеней также полностью совпадали с профилями эрозии Cu мишени (рис. 4). Таким образом, был сделан вывод, что форма профиля эрозии мишени при определенном рабочем давлении не зависит ни от материала мишени, ни от времени распыления. Значение коэффициента использования материала мишени K_f определяется только параметрами магнитной системы магнетрона и является характеристикой определенной MPC. Это позволяет при моделировании зоны эрозии мишеней производить один расчет для заданной конфигурации магнитной системы и масштабировать полученный профиль в зависимости от времени распыления.

Проведено сравнение профилей эрозии для различных конфигураций магнитного поля (рис. 5). Установлено, что при сбалансированной конфигурации магнитного поля формируется узкая зона распыления с резко выраженным максимумом эрозии. Коэффициент использования материала мишени для сбалансированной конфигу-

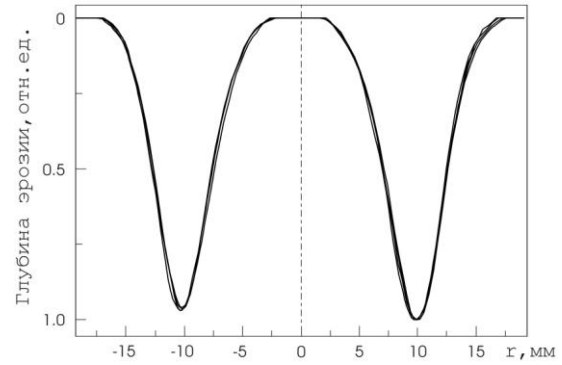


Рис. 3. Нормированные профили эрозии Cu мишени. На рисунке представлено три профиля снятых после 4, 10 и 20 часов распыления мишени.

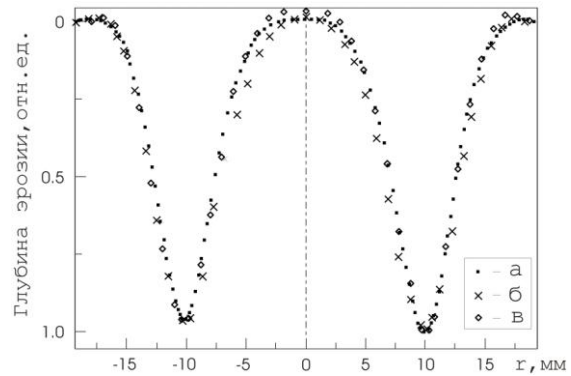


Рис. 4. Нормированные профили эрозии при распылении Cu (а), Al (б) и Ti (в) мишеней.

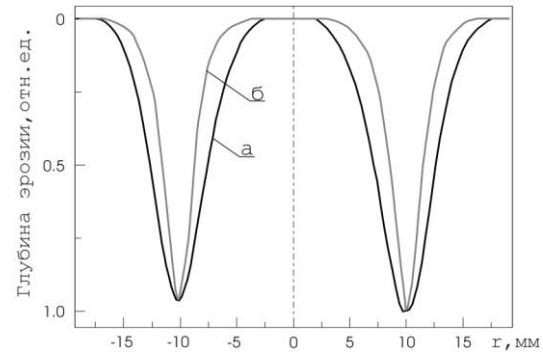


Рис. 5. Нормированные профили эрозии мишени при различной сбалансированности магнитной системы магнетрона: а – несбалансированная конфигурация магнитной системы, б – сбалансированная конфигурация магнитной системы.

рации магнитного поля составил 21.22 %. При увеличении несбалансированности магнитной системы зона распыления расширялась, и максимум эрозии становился менее выраженным. При этом K_f составлял 32.0 %.

Количество атомов материала мишени, распыленных в единицу времени с определенного участка мишени можно рассчитать по формуле [5]:

$$v_i(r) = \langle Y_i \rangle \frac{j_i(r) A_i}{N_A e \rho_i}, \quad (2)$$

где $\langle Y_i \rangle$ – средняя по энергетическому спектру величина коэффициента распыления материала мишени (эффективный коэффициент распыления), e – заряд электрона, $j_i(r)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на радиусе r поверхности мишени, A_t – атомная масса распыляемого материала, ρ_t – плотность материала, N_A – число Авогадро, $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ моль⁻¹.

Исходя из формулы (2), скорость распыления материала мишени по толщине при прочих равных условиях зависит только от уровня ионной бомбардировки определенного участка мишени МРС, т.е. глубина эрозии мишени $h(r)$ на радиусе r прямо пропорциональна произведению величины плотности ионного тока на среднюю по энергетическому спектру величину коэффициента распыления материала мишени:

$$h(r_1) \propto j_i(r) \langle Y_i \rangle. \quad (3)$$

Распределение плотности ионного тока на поверхности мишени может быть получено путем интегрирования актов ионизации во всем объеме плазмы:

$$j_i(r_1) = \int_0^{z^*} n_e(r, z) v_i(r, z) dz \quad (4)$$

где n_e – плотность ионизирующих электронов, v_i – частота ионизации, z^* – граница плазмы.

В магнетронном разряде ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных $E \times H$ полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину не ниже определенного значения. Поскольку разгон электронов происходит в узкой зоне темного катодного пространства, электрическое поле имеет слабое влияние на распределение концентрации актов ионизации. Поэтому можно сказать, что ионизация рабочего газа определяется именно конфигурацией магнитного поля над поверхностью мишени.

Принцип, лежащий в основе повышения K_t , заключается в увеличении скорости распыления на краях зоны эрозии за счет расширения зоны скрещенных $E \times H$ полей. Устранить фокусирующее действие магнитного поля и, тем самым расширить зону эрозии, можно изменив кривизну силовых линий магнитного поля. Анализ результатов показывает, что зона максимальной эрозии

располагается в зоне, определяемой тремя кривыми

$$B_z(r, z) = 0, dB(r, z)/dr = 0 \text{ и } B_r(r, z) = B_{r \max}. \quad (5)$$

В сбалансированных МРС эти положения этих кривых практически совпадают. При этом профиль эрозии представляет собой узкую зону с резко выраженным максимумом эрозии. Для увеличения коэффициента использования материала мишени эти кривые должны быть разнесены друг от друга на максимальное расстояние.

Заключение

Проведены исследования профилей эрозии мишени магнетрона при различном уровне несбалансированности магнитной системы. Установлено, что профиль эрозии при постоянном давлении не зависит от режимов распыления, времени и материала мишени.

Коэффициент использования материала мишени определяется только параметрами магнитной системы магнетрона и является характеристикой определенной МРС. При сбалансированной конфигурации магнитного поля формируется узкая зона распыления с резко выраженным максимумом эрозии. При увеличении несбалансированности магнитной системы зона распыления расширялась, и максимум эрозии становился менее выраженным. При этом K_t увеличился более чем на 10 % и достигал 32 %. Это достигается за счет устранения фокусирующего действия магнитного поля и изменения кривизны силовых линий магнитного поля.

Список литературы

1. Pauleau Y. Materials surface processing by directed energy techniques. Elsevier Ltd. 2006. 722 p.
2. Golosov D.A., Melnikov S.N., Zavatskiy S.M. // XXth Symposium on Physics of Switching Arc, Sept. 2-6, 2013. – Brno, Czech Republic: Bruno University of Technology, 2013. P. 155-158.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 328с.
4. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // Vacuum, 2003. V. 68. P. 283-290.
5. Голосов Д.А., Мельников С.Н., Кундас С.П., Достанко А.П. // Проблемы физики, математики и техники. 2010. Т. 2. № 3. С. 62-67.

INCREASE OF TARGET UTILIZATION FACTOR AT MAGNETRON SPUTTERING

A.P. Dostanko, D.A. Golosov, S.N. Melnikov, S.M. Zavadski, M.V. Ermolenko, J.E. Okojie
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
 6 P.Brovka str., Minsk, 220013, Belarus, dmgoosov@gmail.com*

The erosion of the magnetron target profile at different level of unbalance of the magnetic system was investigated. It was established that erosion profile at constant pressure does not depend on the sputtering modes, time and target material. Utilization factor of the material is determined by the parameters of the magnetic system and is characteristic feature of the magnetron sputtering system. The increase in the utilization factor of the target material is achieved by removing of focusing of the magnetic field and by change in the flexion of the magnetic lines at unbalanced configuration of the magnetic field.