

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО ТИПА

Д.А.Голосов, И.В.Свадковский, С.М.Завадский

Белорусский Государственный Университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. Бровки, 6, каф. ЭТТ, тел: (017) 2-39-84-14, e-mail: dmgolesov@mail.ru

На основании исследований трех конфигураций планарных магнетронных распылительных систем (МРС) установлены зависимости параметров ионного и распыленного потоков от степени несбалансированности магнетрона. Для количественной оценки степени несбалансированности введены понятия коэффициентов несбалансированности и геометрической несбалансированности МРС, которые характеризуют конфигурацию магнитного поля и величину ионного тока на подложку. Предложена методика расчета устройств и процессов формирования тонкопленочных покрытий методом несбалансированного магнетронного распыления с требуемым соотношением ион/атом на поверхности конденсации.

Введение

Отношение потока ионов к потоку осаждаемого материала являются фундаментальным параметром, определяющим структуру и свойства пленок осаждаемых методами ионно-ассистированного осаждения [1]. В несбалансированных магнетронных распылительных системах (НМРС) ионный ток, поступающий на подложку, прямо пропорционален току разряда [2]. Скорость осаждения пропорциональна току разряда (при неизменном напряжении) [3]. В результате, отношение ионного потока к потоку осаждаемых атомов на определенном расстоянии остается постоянным при неизменных характеристиках несбалансированности.

Целью данной работы являлось разработка оценочной методики расчета устройств и процессов формирования тонкопленочных покрытий методом несбалансированного магнетронного распыления с требуемым соотношением ион/атом на поверхности конденсации. Для выполнения поставленной цели проводились расчеты в следующей последовательности: 1. Определялись компоновочные параметры; 2. Производился расчет параметров несбалансированности устройства; 3. Рассчитывались параметры ионного и распыленного потоков; 4. Определялось соотношение ион/атом на поверхности подложки.

I. Эксперимент

Проведены исследования трех конфигураций планарных магнетронных распылительных систем с диаметром мишени 80 мм (Рис. 1). Во всех случаях конфигурация магнитного поля на поверхности мишени формировалась магнитной системой (МС) на постоянных магнитах. В случае сбалансированной МРС (рис. 1, а) практически все линии магнитного поля замкнуты между полюсными наконечниками. В НМРС боковое магнитное поле усилено относительно центрального полюса путем увеличения объема магнитов (рис. 1, б). В МРС с дополнительным соленоидом основная МС формирует на поверхности мишени поле сбалансированной конфигурации (рис. 1, в). Дополнительный соленоид используется для изменения распределения магнитного поля в области мишень – подложка. В качестве мишени использовалась мишень из Ti и углерода, рабочий газ – Ar. Распределение плотности ионного тока пучка НМРС была измерена с помощью точечного

зонда. Для отсекаания потока электронов на зонд подавалось отрицательное смещение [4].

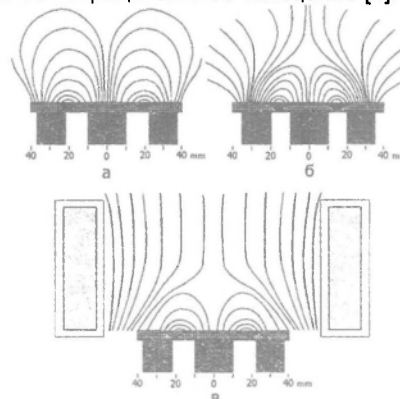


Рис. 1. Типы конфигураций исследованных магнетронов: (а) – сбалансированная МРС; (б) – НМРС; (в) – МРС с дополнительным соленоидом

II. Результаты

Для количественной оценки степени несбалансированности нами введены понятия коэффициентов несбалансированности геометрической несбалансированности МРС, которые характеризуют конфигурацию магнитного поля и следовательно величину ионного тока на подложку. Установлено, что отличительной особенностью несбалансированной МРС является наличие на оси устройства области с противоположным направлением вертикальной составляющей магнитного поля B_z (Рис. 2). Экспериментально определено, что расстояние от мишени до точки на оси МРС в которой B_z изменяет направление на противоположное Z_0 зависит от соотношения периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени. На рис. 3 представлено распределение B_z на оси МРС при различном токе соленоида. Как видно за счет изменения периферийного магнитного поля обеспечивается управление распределением B_z на оси МРС.

Таким образом: коэффициент несбалансированности K равен отношению периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени МРС

$$K = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (1)$$

Для НМРС с единственной магнитной системой формула может быть записана в виде

$$K = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{B_{11}S_1}{B_{12}S_2}, \quad (2)$$

где B_{11} и S_1 – вертикальная составляющая индукции магнитного поля на поверхности мишени и площадь поперечного сечения боковых магнитов, B_{12} – вертикальная составляющая индукции магнитного поля на поверхности мишени и площадь поперечного сечения центральных магнитов.

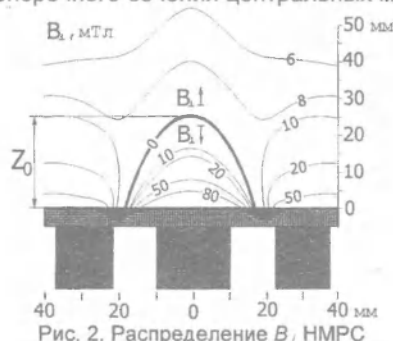


Рис. 2. Распределение B_z НМРС

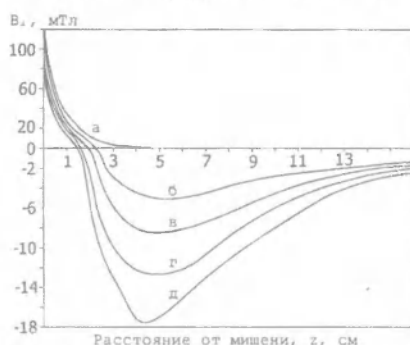


Рис. 3. Зависимость B_z на оси МРС при различном токе дополнительного соленоида: (а) 0 А; (б) 0.3 А; (в) 0.6 А, (г) 0.9 А, (д) 1.2 А

В случае МРС с дополнительным соленоидом магнитный поток "усиленного" полюсного наконечника МРС будет представлять сумму магнитных потоков полюсного наконечника и магнитного потока соленоида. Исходя из конструктивных параметров МРС, степень несбалансированности магнетрона можно оценить с помощью коэффициента геометрической несбалансированности K_G , который рассчитывается по формуле

$$K_G = \frac{Z_0}{2\bar{R}}, \quad (3)$$

где $\bar{R}$ – радиус средней линии зоны распыления. Следует отметить, что существует однозначная зависимость между коэффициентом несбалансированности и коэффициентом геометрической несбалансированности. Очевидно, что взаимосвязь этих параметров будет определяться компоновочными параметрами магнетронной распылительной системы, а значение K может быть рассчитано опосредованно через K_G для магнетрона с дополнительным соленоидом (рис. 4).

Положение точки на оси МРС, в которой B_z изменяет направление на противоположное, будет определяться равенством индукции магнитного поля, создаваемого основной МС B_m , и индукции магнитного поля, создаваемого соленоидом B_s . Величина B_s определяется по формуле

$$B_s(z) = \frac{\mu}{2\pi} I_s \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{(R_0 + jd)^2}{((R_0 + jd)^2 + (z - id)^2)^{3/2}} \quad (4)$$

где I_s – ток соленоида, R_0 – диаметр катушки, z – расстояние от мишени до точки на оси МРС, k – количество витков в слое, m – количество слоев катушки, d – диаметр провода. Индукция магнитного поля на расстоянии z на оси МРС, создаваемого основной МС определяется графоаналитическим методом расчета МС на постоянных магнитах.

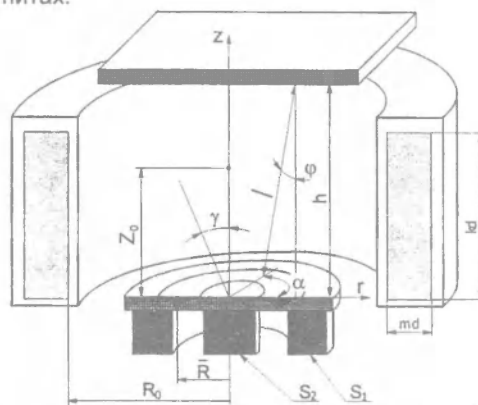


Рис. 4. Компоновочная схема МРС с дополнительным соленоидом

Таким образом, зная осевое распределение B_m и B_s можно определить такую точку, лежащую на расстоянии z от мишени, в которой $B_m(z) = B_s(z)$. В этом случае $z = Z_0$. Для представленной на рис. 4 конфигурации магнетрона с дополнительным соленоидом взаимосвязь K и K_G определяется

$$K = 1 + \frac{0.724}{K_G - 0.456} \quad (4)$$

Следует отметить, что K изменяется пропорционально току дополнительного соленоида

$$K = K_0 + bI_s \quad (5)$$

где K_0 – начальная несбалансированность МРС (основной магнитной системы), b – коэффициент зависящий от конструктивных особенностей МРС (в нашем случае $b=6.5$).

В результате проведения экспериментальных исследований установлена взаимосвязь между коэффициентами несбалансированности и параметрами ионного потока на подложку. Плотность тока прямо пропорциональна K , току разряда МРС и нелинейно уменьшается с увеличением расстояния мишень – подложка (рис. 5). На рис. 6 представлено распределение ионного тока подложки на расстоянии 7.5 см от мишени (Ti) при различном K . На основе данных исследования МРС с дополнительным соленоидом была получена эмпирическая формула зависимости плотности тока в точке находящейся под углом γ к нормали на расстоянии z от мишени

$$j(z, \gamma) = \frac{(1.96(K - K_0) + 1)I_p}{10z^{1.7}} \cos^n \gamma \quad (6)$$

где I_p – ток разряда МРС, n – коэффициент зависящий от K ($n \approx 6$ при $K=1.23$, $n \approx 10-12$ при $K=2.2$, $n \approx 8-10$ при $K=3.18$ и $n \approx 12-20$ при $K=4.15$). При выводе формулы для упрощения предполага-

лось, что ионы генерируются на оси устройства непосредственно на поверхности мишени.

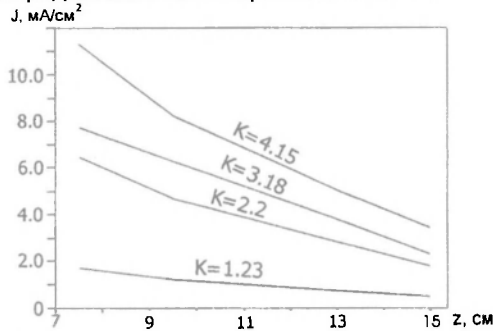


Рис. 5. Зависимость плотности ионного тока подложки от расстояния мишень – зонд для различных K при $I_p = 2$ А, $P = 0.12$ Па

Скорость осаждения в любой точке подложки расположенной на расстоянии h от поверхности мишени планарного магнетрона с кольцевой зоной распыления может быть рассчитана по формуле

$$V(r, \alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{V_p(r) r \cos^2 \varphi(r, \alpha)}{l^2(r, \alpha)} dr d\alpha \quad (7)$$

где φ – угол конденсации; α – полярный угол; l – расстояние от точки распыления до точки конденсации; $V_p(r)$ – скорость распыления материала мишени по толщине, которое определяется как

$$V_p(r) = Y_p(U) \frac{j_i(r) A_m}{N_A \rho} \quad (8)$$

где $Y_p(U)$ – коэффициент распыления материала мишени зависящий от напряжения разряда, с учетом обратного рассеяния и диффузии распыленных частиц, атом/ион; A_m – атомная масса распыляемого материала; ρ – плотность материала; $j_i(r)$ – плотность ионного тока в прикатодной области на расстоянии r от оси, которое в общем случае может быть аппроксимировано полиномом Лагранжа

$$j_i(r) = j_{\max} (-0.24|r - \bar{R}|^3 + 0.44|r - \bar{R}|^2 - 0.64|r - \bar{R}| + 1) \quad (9)$$

Таким образом, из известных распределений плотности тока и скорости осаждения рассчитываются отношения ион/атом в любой точке подложки

$$\frac{i}{a} = \frac{j(z, \gamma) A_m}{N_A \rho V(r, \alpha)} \quad (10)$$

В результате проведенных расчетов установлено, что отношение ион/атом пропорционально увеличивается с ростом K . Так, например, на рис. 7 представлена зависимость отношения ион/атом на оси устройства от K и K_G для различных конфигураций MPC. Данные были получены при распы-

лении углеродной мишени $\varnothing 80$ мм в одинаковых условиях

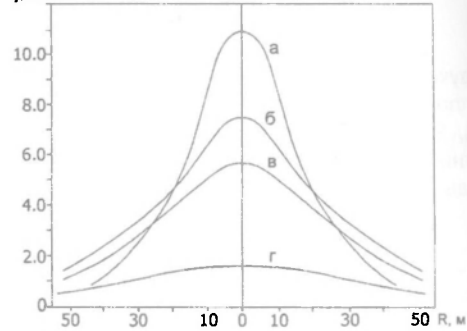


Рис. 6. Распределение ионного тока подложки при различном K : (а) $K=4.15$; (б) $K=3.18$; (в) $K=2.2$; (г) $K=1.23$ условиях ($P_p=235$ Вт, $P=0.1$ Па, расстояние мишень – подложка 8 см). Как видно отношение ион/атом пропорционально K для различных конфигураций MPC.

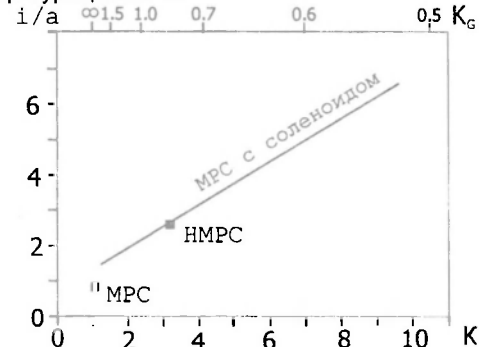


Рис. 7. Зависимость отношения ион/атом от K и K_G для различных конфигураций магнетронов

Заключение

На основе анализа различных конфигураций MPC разработана оценочная методика расчета HMPC с требуемым соотношением ион/атом на поверхности конденсации. Для количественной оценки степени несбалансированности введены понятия коэффициента несбалансированности и коэффициента геометрической несбалансированности MPC, которые имеют прямую связь с отношением ион/атом.

Список литературы

1. I. Petrov, F. Adibi, J.E. Greene, W.D. Sproul, W.D. Munz // J. Vac. Sci. Technol.- 1992.- A10.- P.3283
2. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // PPPT-III, Minsk, Belarus, September 18-22, 2000.- Vol. 2.- P. 716.
3. Kelly P.J., Arnell R.D. // Vacuum.- 2000.- Vol.56.- P.159.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда.-М.:1983.- 590с.

ESTIMATION METHOD OF UNBALANCED MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM

D.A. Golosov, I.V. Svadkovski, S.M. Zavatskiy

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Minsk, 6, P.Brovka, phone: (017) 2-39-84-14, e-mail: dmgoosov@mail.ru

On base of the investigation of three configurations of planar circular magnetron (conventional or balanced magnetron, unbalanced magnetron, magnetron with additional coil) dependence of ion and sputtered fluxes parameters as a function level of unbalance has been establish. For valuation of unbalance level, magnetic field configuration and ion flux on substrate the coefficient of unbalance and the coefficient geometrical unbalance have been proposed. The method of estimation unbalanced magnetron thin films deposition with necessary ion/atom ratio on the substrate surface has been proposed.