

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЛОЕВ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ МОЗАИЧНЫХ МИШЕНЕЙ

Д.А. Голосов, С.Н. Мельников, А.П. Достанко

*УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,
ул. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, dmgolosov@gmail.com*

Предложена модель процесса магнетронного распыления, которая позволяет прогнозировать элементный состав нанесенных пленок при распылении мозаичных мишеней с произвольным расположением вставок для аксиальных магнетронных распылительных систем (МРС). Модель основана на интегрировании распыленного потока с каждой точки зоны распыления и учитывает коэффициенты распыления и электронно-ионной эмиссии материалов основы и вставок. Кривая распределения плотности тока разряда аппроксимируется с применением третьего центрального момента в распределении типа “сдвоенная гауссиана”, что дает возможность использовать реальные параметры зоны распыления и тока разряда магнетрона и с достаточной точностью математически описать распределение плотности ионного тока. Для верификации предложенной модели проведены экспериментальные исследования по нанесению тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления Ti/Zr и Ti/Zr/Pb мозаичных мишеней. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность модели не превышает 10%.

УДК 621.793.18

ВВЕДЕНИЕ

Технологические потребности рынка значительно повысили интерес к получению тонкопленочных слоев с особенными электрофизическими, оптическими, механическими, жаростойкими и антикоррозионными свойствами. В настоящее время покрытия стали представлять собой однослойные нанокристаллические композиты, слои с изменяемыми по толщине свойствами или сложные многослойные гетероструктуры на основе сверхрешеток и градиентных структур [1, 2]. Данные слои – главным образом сложные многокомпонентные соединения на основе оксидов, нитридов или карбидов, относятся к труднораспыляемым диэлектрикам. Традиционно для нанесения многокомпонентных тонких пленок применяется метод ВЧ магнетронного распыления [3, 4]. Он позволяет распылять многокомпонентные диэлектрические мишени. Причем содержание компонентов в мишени может полностью повторять требуемый состав наносимых пленок. Среди недостатков метода ВЧ магнетронного распыления следует назвать сложность его масштабирования, сравнительно низкую производительность процесса и высокую стоимость ВЧ источников питания, что значительно снижает возможность его использования в промышленности.

Более перспективным с этой точки зрения является метод реактивного магнетронного распыления. Он сохраняет все преимущества магнетронного распыления (высокая скорость нанесения слоев, низкая температура подложки, простота конструкции и т.д.) и позволяет наносить пленки соединений при использовании сравнительно легко изготавливаемых металлических мишеней. В настоящее время для нанесения многокомпонентных тонких пленок методом магнетронного распыления используются три основных способа – распыление сплавных мишеней, отдельное распыление каждой из компонент (multi-target sputtering) или распыление мозаичных мишеней. Метод распыления сплавных мишеней дает хорошие результаты, когда возможно получение сплава или смеси необходимых элементов [5, 6]. Состав наносимых слоев практически повторяет концентрации элементов в исходной мишени. Однако в ряде случаев в состав наносимых слоев входят разнородные материалы с низкой взаимной растворимостью или большой разницей в температурах плавления. При этом практически невозможно получение мишеней требуемого состава. Хорошие результаты в данном случае дает метод совместного распыления (multi-target sputtering) [7, 8]. В этом методе для получения многокомпонентных пленок используется несколько распылительных устройств, и каждый элемент наносится отдельным магнетроном. Метод совместного распыления позволяет точно контролировать элементный состав нанесенных пленок и получать пленки разного состава путем изменения тока или мощности разряда каждого из магнетронов. Однако из-за сложности метод практически невозможно использовать в промышленных установках.

Одной из последних тенденций развития метода магнетронного распыления является использование для нанесения многокомпонентных тонких пленок так называемых составных или “мозаичных мишеней”, то есть мишеней, состоящих из матрицы одного металла со вставками других металлов [9]. Метод позволяет получать многокомпонентные пленки с произвольным количеством и содержанием элементов с помощью одного магнетрона. Преимущество метода магнетронного распыления мозаичных мишеней особенно проявляется в случаях, когда необходимо получить пленки, в состав которых входят элементы с низкой взаимной растворимостью или большой разницей в температурах плавления. К недостаткам этого метода следует отнести сложность подбора размера и количества вставок для получения требуемой концентрации и равномерного распределения элементов в нанесенной пленке, поскольку скорость распыления основы и вставок зависит от ряда факторов (распределения плотности ионного тока, коэффициента распыления элемента, энергии ионов и т.д.). Практика показывает, что для получения требуемого соотношения элементов в нанесенной пленке необходимо провести ряд экспериментов по распылению мозаичной мишени и корректировке размера вставок по результатам элементного анализа нанесенных пленок. Данный метод подбора довольно дорогостоящий, особенно при использовании в мишени редких элементов, и занимает много времени. В то время как методы компьютерного моделирования позволяют значительно сократить время и стоимость разработки и исключить ряд ошибок.

Таким образом, настоящая статья посвящена разработке модели процесса распыления мозаичных мишеней, которая позволяла бы определять размеры и размещение вставок для коррекции элементного состава наносимой многокомпонентной пленки.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Мозаичная мишень представляет собой основу (основная матрица), выполненную из материала A и мозаичных вставок из материала B , расположенных на этой основе (рис. 1). Вставки располагаются равномерно по радиусу максимальной эрозии мишени. Размер вставок, а также их количество зависят от требуемого содержания материала B в нанесенной пленке. Чаще всего мишень изготавливается с таким расчетом, чтобы вся площадь вставок попадала в зону распыления. Материал A имеет относительную атомную массу A_A , плотность ρ_A , коэффициент распыления Y_A и коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_A , а материал B – относительную атомную массу A_B , плотность ρ_B , коэффициент распыления Y_B и коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_B .

Модель будем строить для случая аксиальных магнетронных распылительных систем с планарной мишенью. При этом сделаем следующие допущения: I – распыленные атомы имеют направленное движение и распространяются в пространстве по закону косинуса; II – распыленные атомы не сталкиваются друг с другом и с атомами рабочего газа (то есть отсутствует эффект термализации распыленного потока); III – распыленные атомы конденсируются в точке соударения с подложкой. При этом предполагается, что распределение плотности тока в зоне разряда аксиального магнетрона зависит только от радиуса распыления r_1 и не зависит от вида распыляемого материала.

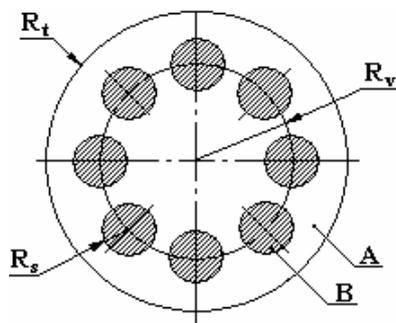


Рис. 1. Геометрическая модель мишени: A – основа мишени; B – вставки, R_t – радиус мишени, R_s – радиус вставок, R_v – радиус размещения вставок

Количество атомов материала мишени, распыленных в единицу времени с определенного участка мишени, рассчитывается по формуле

$$v_x(r_1) = Y_x \frac{j_i(r_1)}{e}, \quad (1)$$

где Y_x – коэффициент распыления ионами Ag атомов материала основы или вставок; e – заряд электрона, $j_i(r_1)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на радиусе r_1 , которая может быть рассчитана по формуле

$$j_i(r_1) = \frac{j_t(r_1)}{1 + \gamma_x} \quad (2)$$

где $j_t(r_1)$ – плотность тока разряда на радиусе r_1 , γ_x – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала основы или вставки. Скорость распыления мишени по толщине

$$v_x(r_1) = \frac{v_x(r_1)A_x}{N_A e \rho_x} \quad (3)$$

где A_x – атомная масса распыляемого материала, ρ_x – плотность материала, N_A – число Авогадро $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ моль⁻¹. С учетом формул (4) и (5) скорость распыления по толщине можно записать в виде

$$v_x(r_1) = Y_x \frac{j_t(r_1)A_x}{N_A e \rho_x (1 + \gamma_x)} \quad (4)$$

Следует отметить, что при расчетах скорости распыления желательно использовать эффективный коэффициент распыления материала мишени, который зависит от распределения энергии бомбардирующих ионов [10].

Распределение плотности тока разряда $j_t(r_1)$ может быть рассчитано с помощью методов моделирования кинетики движения тестовых частиц Монте-Карло (PIC-MC) [11–13]. Однако это значительно усложняет модель и может быть использовано при необходимости проведения прецизионных расчетов. В нашем случае кривая распределения плотности тока разряда аппроксимировалась с использованием третьего центрального момента в распределении типа “сдвоенная гауссиана” с различными дисперсиями на левом и правом плечах распределения. Данное распределение использует реальные параметры зоны распыления и тока разряда магнетрона и с достаточной точностью позволяет математически описать распределение плотности ионного тока. При этом методе моделирования профиль распределения плотности ионного тока в зоне разряда задается аналитически с помощью формулы

$$j_t(r_1) = \frac{I_t}{\pi(R_{max} + R_{min})} \frac{f(r_1)}{\int_0^{\infty} f(r_1) dr_1} \quad (5)$$

где I_t – ток разряда магнетрона, R_{min} и R_{max} – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени; $f(r_1)$ – функция распределения, которая имеет вид сдвоенной полугауссианы

$$f(r_1) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r_1 - \bar{R})^2}{2\sigma_1^2}\right] & \text{для } r_1 \leq \bar{R}; \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(r_1 - \bar{R})^2}{2\sigma_2^2}\right] & \text{для } r_1 > \bar{R}; \end{cases}$$

$$\sigma_1 = \frac{\bar{R} - R_{min}}{3}, \quad \sigma_2 = \frac{R_{max} - \bar{R}}{3}, \quad \sigma = \frac{R_{max} - R_{min}}{6}, \quad (6)$$

где \bar{R} – радиус максимальной эрозии мишени. При этом функция распределения должна удовлетворять соотношению

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_t(r_1) dr_1 = I_t. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета профилей распределения плотности тока разряда при использовании для аппроксимации “двоенной гауссианы” (а). Для сравнения на рис. 2 (кривая б) представлен нормированный профиль зоны эрозии магнетрона МАС-80. Поскольку плотность тока разряда пропорциональна скорости распыления материала мишени [14], можно сделать вывод, что представленный выше метод аппроксимации с использованием третьего центрального момента в распределении типа “двоенная гауссиана” позволяет с высокой точностью математически описать распределение тока разряда в зоне распыления МРС.

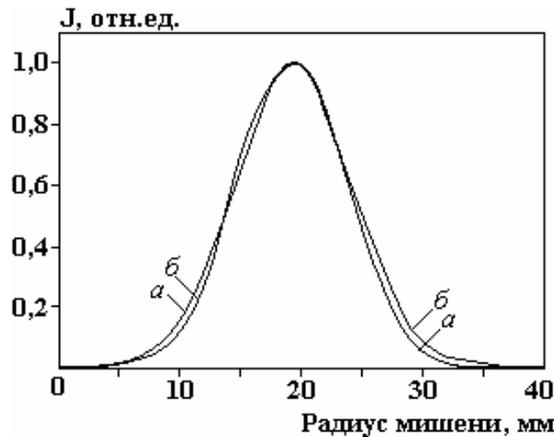


Рис. 2. Результаты расчета профиля распределения плотности тока разряда (а) и нормированный профиль зоны эрозии мишени магнетрона МАС-80 (б)

Для определения скорости нанесения пленки на подложке будем использовать метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. В нашем случае подложка размещается параллельно плоскости мишени, поэтому модель процесса напыления будем строить для случая, когда угол распыления равен углу конденсации, то есть $\phi = \varphi$. Скорость нанесения пленки в точке подложки, находящейся на расстоянии x_2 от оси магнетрона, может быть рассчитана по формуле

$$F(x_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_0^{2\pi} \frac{v(r_1) r_1 \cos^2 \varphi(x_2, r_1, \alpha)}{L^2(x_2, r_1, \alpha)} dr_1 d\alpha \quad (8)$$

где α – полярный угол, φ – угол распыления (конденсации), L – расстояние от точки распыления до точки конденсации.

Для определения вклада в скорость нанесения от основы и вставок возможно использовать два метода расчета: 1) на каждом радиусе зоны распыления определяется часть окружности, занятая вставками, и считается, что скорость распыления вставок пропорциональна соотношению между длиной окружности и суммарной длиной вставок; 2) положение вставок задается аналитически с помощью уравнения.

Первый метод является более простым для расчета. При данном методе зона распыления разделяется на три участка (рис. 3): участок I – от R_{min} до R_{min1} и участок III – от R_{max1} до R_{max} , где присутствует только материал основы, и участок II – от R_{min1} до R_{max1} , где окружность текущего радиуса пересекает вставки. На каждом радиусе участка II зоны распыления определяется часть длины окружности, занятая вставками материала В:

$$M(r_1) = n \frac{\sqrt{R_v^2 - (R_s - r_1)^2}}{\pi r_1} \quad (9)$$

где n – количество вставок, R_v – радиус вставки, R_s – радиус расположения центров вставок.

Скорость нанесения материала основы с I и III участков $F_1(x_2)$ и $F_1(x_2)$ рассчитывается по

формуле (8) с учетом пределов интегрирования от R_{min} до R_{min1} для I участка и от R_{max1} до R_{max} для III участка. На участке II, где располагаются вставки, часть окружности $M(r_1)$ занята вставками. Скорость нанесения материала основы будет

$$F_2(x_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min1}}^{R_{max1}} \int_0^{2\pi} \frac{v_o(r_1)r_1(1-M(r_1))\cos^2\varphi(x_2, r_1, \alpha)}{L^2(x_2, r_1, \alpha)} dr_1 d\alpha \quad (10)$$

где v_o – скорость распыления основы. Общая скорость нанесения материала основы рассчитывается как сумма скоростей нанесения из всех трех участков мишени:

$$F_o(x_2) = F_1(x_2) + F_2(x_2) + F_3(x_2) \quad (11)$$

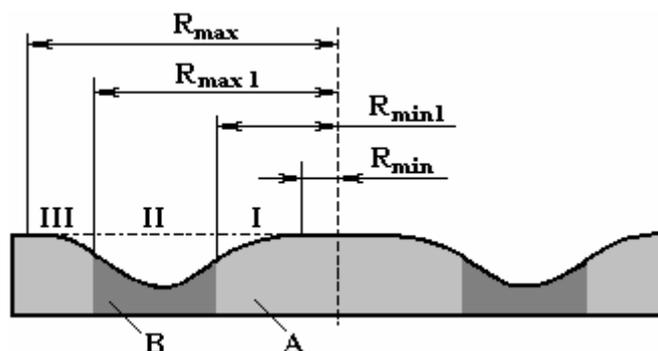


Рис. 3. Зона распыления мозаичной мишени магнетрона

Скорость нанесения материала вставок рассчитывается по формуле

$$F_v(x_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min1}}^{R_{max1}} \int_0^{2\pi} \frac{v_v(r_1)r_1M(r_1)\cos^2\varphi(x_2, r_1, \alpha)}{L^2(x_2, r_1, \alpha)} dr_1 d\alpha, \quad (12)$$

где v_v – скорость распыления вставок.

Процентный состав материала вставок в нанесенной пленке рассчитывается как

$$T(x_2)\% = \frac{F_v(x_2) \times 100}{F_o(x_2) + F_v(x_2)} \quad (13)$$

Скорость нанесения компонентной пленки по толщине определялась как сумма скоростей нанесения материала основы и вставок:

$$V(x_2) = F_o(x_2) \frac{A_o}{N_A \rho_o} + F_v(x_2) \frac{A_v}{N_A \rho_v} \quad (14)$$

где A_o , ρ_o , A_v , ρ_v – атомная масса и плотность материалов основы и вставок соответственно.

Представленный выше метод позволяет рассчитать элементный состав и скорость нанесения пленки при распылении мишени, состоящей из произвольного количества цилиндрических вставок различных элементов. Однако он не позволяет определить неравномерность распределения концентраций элементов при малом расстоянии мишень–подложка, когда начинают играть роль эффекты преимущественного нанесения материала вставки на участке подложки, расположенном напротив вставки. В данном случае более предпочтительным является метод, при котором размещение вставок задается аналитически с помощью уравнения

$$(x_1 - x_k)^2 + (y_1 - y_k)^2 < R_v^2, \quad (15)$$

где (x_k, y_k) – координаты k -й вставки, (x_1, y_1) – текущие координаты. В процессе интегрирования определяется, относится ли текущая координата к основе или вставкам, и в зависимости от распыляемого материала суммируется вклад в скорость нанесения основы или вставок.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для верификации предложенной модели проведены исследования по распылению Ti-Zr (рис. 4,а) и Ti-Zr-Pb (рис. 5) мозаичных мишеней. Ti-Zr мозаичная мишень представляла собой Ti основу (99,95% чистоты) \varnothing 80 мм и толщиной 5 мм, в которую впрессованы восемь цилиндрических Zr вставок \varnothing 13 мм. Вставки равномерно распределены по диаметру 42,5 мм. Ti-Zr-Pb мозаичная мишень состояла из Ti основы (99,95% чистоты) \varnothing 80 мм и толщиной 5 мм, в которую впрессованы четыре циркониевые \varnothing 12 мм и четыре свинцовые вставки \varnothing 10,5 мм. Вставки равномерно распределены по диаметру 42,5 мм.

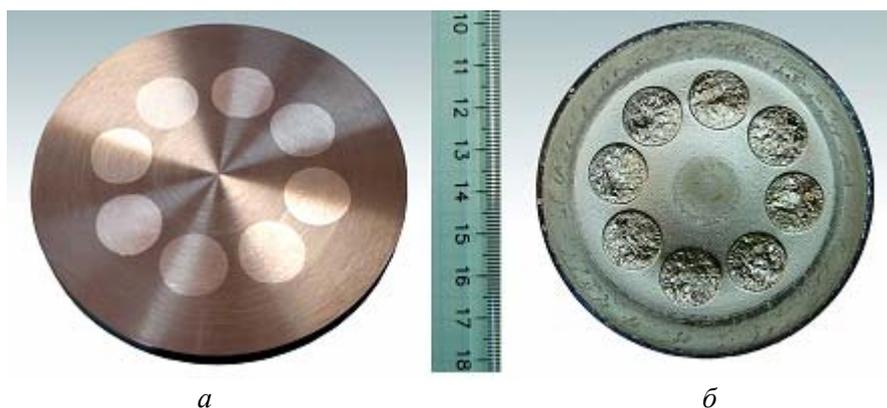


Рис. 4. Внешний вид Ti-Zr мозаичной мишени до (а) и после распыления (б)



Рис. 5. Внешний вид Ti-Zr-Pb мозаичной мишени

Схема экспериментальной установки для нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления мозаичных мишеней приведена на рис. 6. Камера вакуумной установки ВУ-2МП была оборудована магнетронной распылительной системой МАС-80 и ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. Ионный источник использовался для предварительной ионной очистки поверхности подложек.

Подложками служили Si (100). Они устанавливались на вращаемый барабанный подложкодержатель \varnothing 215 мм и последовательно подводились в зоны очистки и нанесения. При этом расстояние мишень магнетрона–подложка на оси магнетрона составляло 85 мм.

Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления $2 \cdot 10^{-3}$ Па и производилась ионная очистка подложек. Для этого в ассистирующую ступень ионного источника подавался Ar до рабочего давления $2,0 \cdot 10^{-2}$ Па ($Q_{Ar} = 25$ мл/мин). Очистка производилась в режиме вращения барабанного подложкодержателя. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли 3 мин, 500 эВ, 70 мА соответственно.

Затем производилась предварительная очистка поверхности мишени. Для этого подложки отводились от зоны распыления. В газораспределительную систему магнетрона подавался Ar. Поток аргона в камеру $Q_{Ar} = 65$ мл/мин и контролировался автоматическим регулятором расхода газа РРГ-1.

Мишень очищалась в режиме стабилизации мощности разряда $P_t = 500$ Вт. При этом напряжение разряда составляло $U_t = 400\text{--}450$ В при токе разряда $I_t = 1,1\text{--}1,25$ А, время очистки мишени 4 мин.

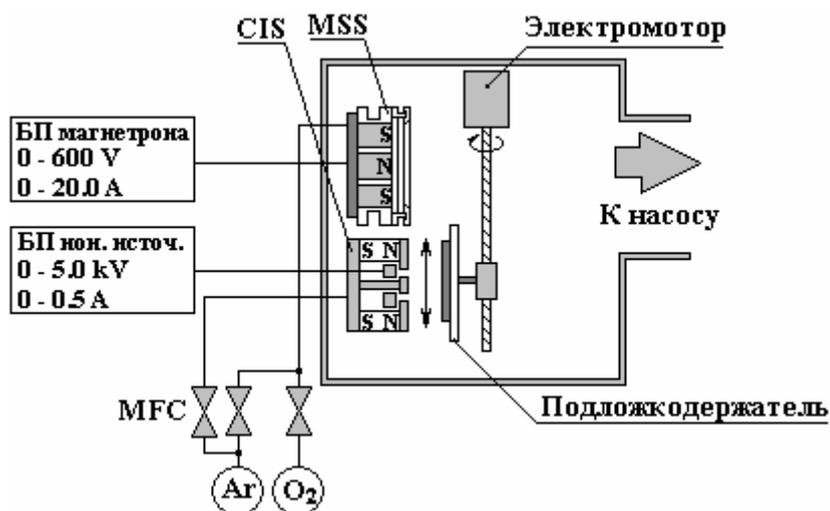


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для распыления мозаичных мишеней методом магнетронного распыления: CIS – ионный источник для очистки; MSS – магнетронная распылительная система; МФС – измеритель-регулятор расхода газа

Распыление мозаичных мишеней осуществлялось методом магнетронного распыления в режиме стабилизации тока разряда. Поток Ar в камеру при распылении Ti-Zr и Ti-Zr-Pb мишеней составлял соответственно 50 и 65 мл/мин. Время нанесения слоев – 10 мин. Распыление Ti-Zr мишени осуществлялось при следующих условиях: ток разряда $I_t = 3,0$ А, напряжение разряда $U_t = 445$ В. При распылении Ti-Zr-Pb мишени напряжение $U_t = 402$ В и ток разряда $I_t = 1,0$ А.

Распределение толщины нанесенных слоев определялось с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Элементный состав нанесенных пленок анализировался методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) при помощи рентгеновского флуоресцентного спектрометра Oxford ED-2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены исследования распределения скорости нанесения и элементного состава нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени. Отмечено, что вследствие различия скоростей распыления материалов мишени в процессе выработки мишени в зависимости от скорости их распыления происходит заглубление вставок или основы (рис. 4,б). Эти процессы могут влиять на изменение соотношения элементов в нанесенной пленке в процессе эксплуатации мишени.

На рис. 7 (а) представлены результаты измерения распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени. Скорость нанесения на оси магнетрона составила 0,46 нм/с. Полученный профиль практически не отличается от профилей скорости нанесения однокомпонентных мишеней. Для сравнения на рис. 7 (кривая б) представлены результаты моделирования профиля распределения толщины Ti-Zr пленки. При расчетах использовались следующие параметры мишени: основа Ti $\varnothing 80$ мм, коэффициент распыления $Y_{Ti} = 0,26$ (0,5 при 500 эВ), плотность $\rho_{Ti} = 4,54$ г/см³, вставки Zr $\varnothing 13$ мм, количество - 8 штук (коэффициент распыления $Y_{Zr} = 0,3$ (0,63 при 500 эВ), плотность $\rho_{Ti} = 6,50$ г/см³). Вставки расположены по диаметру 42,5 мм.

Параметры зоны распыления: $R_{min} = 4,5$ мм, $\bar{R} = 19,5$ мм, $R_{max} = 32,6$ мм. Ток разряда $I_t = 3,0$ А, время нанесения – 10 мин. Расстояние мишень–подложка – 85 мм. Как видно, рассчитанный профиль практически совпадает с экспериментальными данными. На рис. 8 представлены результаты моделирования распределения скорости нанесения Ti и Zr. В результате моделирования (рис. 8) получены следующие концентрации элементов в нанесенной пленке, ат. %: Ti – 39,04, Zr – 60,96, что в пересчете на весовые проценты дает содержание, вес. %: Ti 25,5 и Zr 74,85. Измерения элементного состава нанесенных пленок методом рентгенофлуоресцентного анализа показали, что в нанесенной пленке содержание Ti составляло 73,42 ат. % и содержание Zr – 26,3 ат. %. Результаты моделирования показывают, что на расстоянии 85 мм от поверхности мишени распределение элементов

имеет высокую равномерность по площади подложки. При анализе результатов верификации модели выяснилось, что погрешность метода при расчете двухкомпонентной мишени не превышает 10%.

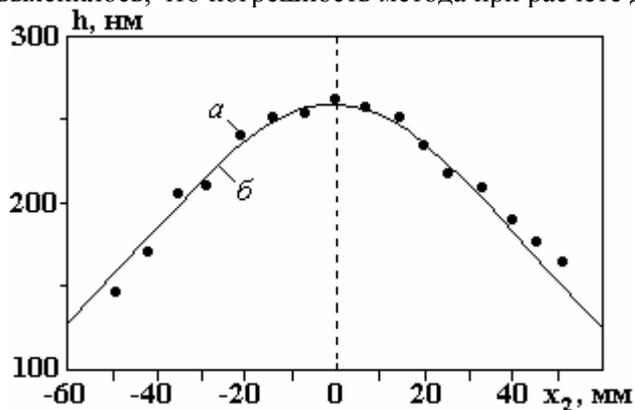


Рис. 7. Профиль распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr мозаичной мишени: а – результаты измерения; б – результаты моделирования

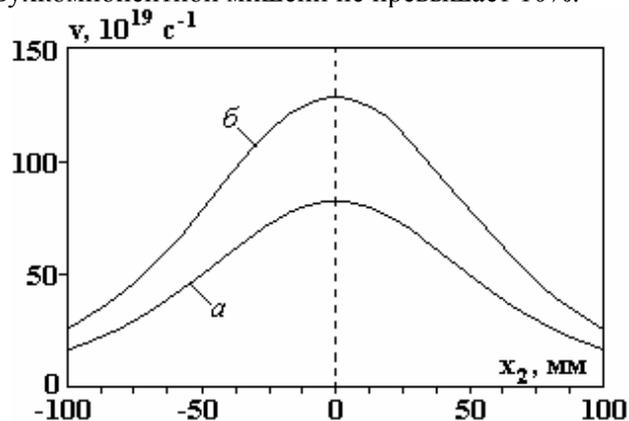


Рис. 8. Рассчитанные распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr мозаичной мишени: а – скорость нанесения Ti; б – скорость нанесения Zr

Проведены исследования распределения скорости нанесения и элементного состава нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. На рис. 9 (кривая а) представлены результаты измерения толщины нанесенных слоев при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. Скорость нанесения на оси магнетрона составляла 1,55 нм/с. На рис. 9 (кривая б) представлены результаты моделирования профиля распределения толщины нанесенной пленки при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени.

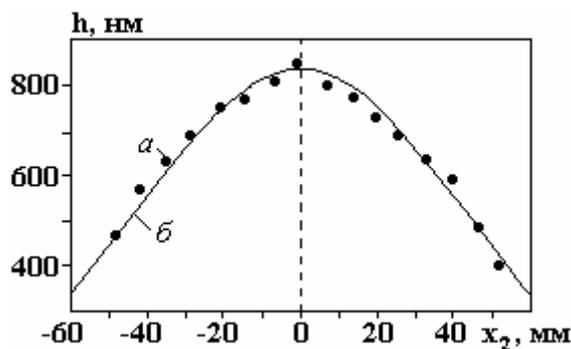


Рис. 9. Профили распределения толщины нанесенной пленки при магнетронном распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени: а – результаты измерений; б – результаты моделирования

При расчетах использовались следующие параметры мишени: основа Ti \varnothing 80 мм, вставки Zr \varnothing 12 мм, количество – 4 штуки, вставки Pb \varnothing 10,5 мм, количество – 4 штуки. Вставки расположены по диаметру 42,5 мм. Для Pb вставок при расчетах использовались следующие исходные данные: атомная масса $A_{Pb} = 207,2$ а.е.м., плотность $\rho_{Pb} = 11,34$ г/см³, коэффициент распыления $Y_{Pb} = 0,32$ (2,3 при 500 эВ). Ток разряда $I_t = 1,0$ А, время нанесения – 10 мин. Остальные характеристики материалов и параметры зоны распыления представлены выше. Рассчитанный профиль распределения скорости нанесения достаточно точно совпадает с экспериментальными данными. На рис. 10 представлены результаты моделирования распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени. Рассчитана следующая концентрация элементов в пленке, ат.‰: Ti – 50,7 Zr – 26,71%, Pb – 22,58, что в пересчете на весовые проценты дает содержание, вес.‰: Ti 25,43 и Zr 25,53, Pb 49,035 соответственно. Анализ нанесенных слоев методом РФА показал, что в состав нанесенной пленки, полученной методом магнетронного распыления Ti-Zr-Pb мозаичной мишени, входят следующие элементы, вес.‰: Ti 25,25, Zr 26,30, Pb 48,45. Как видно, для трехкомпонентной мишени погрешность моделирования тоже составила менее 10%, что позволяет использовать предложенные модели для предсказания концентрации элементов в нанесенной пленке при распылении мозаичных мишеней.

Для формирования сегнетоэлектрических тонких пленок со структурой перовскита оптимальным считается состав $PbZr_{0,54}Ti_{0,46}O_3$. Соотношение материалов в нанесенной пленке должно

быть следующим Pb:Zr:Ti 1:0,54:0,46. По отношению к Ti это $Pb/Ti = 2,174$, $Zr/Ti = 1,174$. Результаты РФА показывают отношение элементов в нанесенной пленке $Pb/Ti = 0,44$, $Zr/Ti = 1,23$. Как видно, при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени, отмечается значительный недостаток свинца. Согласно результатам моделирования коэффициент распыления Pb оказался значительно меньше табличных значений $Y_{Pb} = 0,32$ (табличное значение $Y_{Pb} = 2,3$ при 500 эВ). Это, по-видимому, связано с образованием пленки соединения на поверхности вставок в результате взаимодействия Pb с остаточной атмосферой и высокой термализацией атомов свинца.

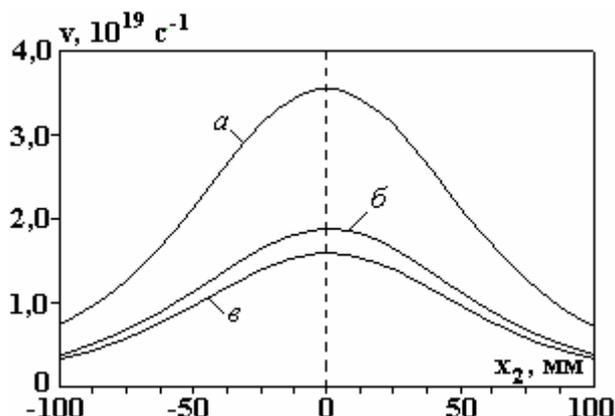


Рис. 10. Результаты моделирования распределения скорости нанесения элементов при распылении Ti-Zr-Pb мозаичной мишени: а – скорость нанесения Ti; б – скорость нанесения Zr; в – скорость нанесения Pb

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель процесса магнетронного распыления мозаичных мишеней, которая позволяет прогнозировать элементный состав нанесенных пленок при распылении составных мишеней с цилиндрическими вставками аксиальными магнетронными распылительными системами.

Для верификации предложенной модели проведены экспериментальные исследования по нанесению тонкопленочных слоев методом магнетронного распыления Ti/Zr и Ti/Zr/Pb мозаичных мишеней. Анализ результатов моделирования показывает, что погрешность моделирования не превышает 10%, это позволяет использовать предложенные модели для предсказания концентрации элементов в нанесенной пленке при распылении мозаичных мишеней. На основе результатов моделирования установлено, что при расчетах скорости распыления необходимо учитывать термализацию распыленных атомов и использовать эффективный коэффициент распыления материала мишени, который зависит от распределения энергии бомбардирующих ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Musil J. Hard and Superhard Nanocomposite Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2000, **125**, 322–330.
2. Yang Q., Zhao L.R., McKellar R., Patnaik P.C. Microstructure and Mechanical Properties of Multi-constituent Superlattice Coatings. *Vacuum*. 2006, **81**, 101–105.
3. Youl-Moon Sung, Hee-Je Kim. Sputter Deposition and Surface Treatment of TiO₂ Films for Dye-sensitized Solar Cells Using Reactive RF Plasma. *Thin Solid Films*. 2007, **515**, 4996–4999.
4. Huidong Tanga, Shouhong Tana, Zhengren Huang, Shaoming Donga, Dongliang Jiang. Surface Morphology of a-SiC Coatings Deposited by RF Magnetron Sputtering. *Surface & Coatings Technology*. 2005, **197**, 161–167.
5. Jia-Ming Ye, Yu-Pin Lin, Yueh-Ting Yang, Jing-Tang Chang, Ju-Liang He. Electrochromic Properties of Ni(V)O_x Films Deposited Via Reactive Magnetron Sputtering with a 8V–92Ni Alloy Target. *Thin Solid Films*. 2010, **59**, 1578–1582.
6. Hui-Wen Chang, Ping-Kang Huang, Andrew Davison, Jien-Wei Yeh, Chun-Huei Tsau, Chih-Chao Yang. Nitride Films Deposited from an Equimolar Al–Cr–Mo–Si–Ti Alloy Target by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*. 2008, **516**, 6402–6408.
7. Vidyarthi V.S., Lin W.-M., Suchaneck G., Gerlach G., Thiele C., Hoffmann V. Plasma Emission Controlled Multi-Target Reactive Sputtering for in-situ Crystallized Pb(Zr, Ti)O₃ thin Films on 6" Si-wafers. *Thin Solid Films*. 2007, **515**, 3547–3553.
8. Suchaneck G., Lin W.-M., Vidyarthi V.S., Gerlach G. Hartung Multi-target Reactive Sputtering – a Promising Technology for Large-area Pb(Zr, Ti)O₃ thin Film Deposition. *J. Journal of the European Ceramic Society*. 2007, **27**, 3789–3792.

9. Nakano J., Miyazaki H., Kimura T., Goto T., Zhang S. Thermal Conductivity of Yttria-stabilized Zirconia thin Films Prepared by Magnetron Sputtering. *J. Ceram. Soc. of Jap.* 2004, **112**, 908–911.
10. Czekaj D., Goranchev B., Hollmann E.K. Incident Ion Energy Spectrum and Target Sputtering Rate in dc Planar Magnetron. *Vacuum*. 1991, **42**(1–2), 43–45.
11. Kusumoto Y., Iwata K. Numerical Study of the Characteristics of Erosion in Magnetron Sputtering. *Vacuum*. 2004, **74**, 359–365.
12. Nanbu K., Kondo S. Analysis of Three-Dimensional DC Magnetron Discharge by the Particle-in-cell/Monte Carlo Method. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997, **36**(1), 4808–4814.
13. Nanbu K., Segawa S., Kondo S. Self-consistent Particle Simulation of Three-dimensional dc Magnetron Discharge. *Vacuum*. 1996, **47**, 1013–1016.
14. Голосов Д.А., Мельников С.Н., Кундас С.П., Достанко А.П. Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем. *Проблемы физики, математики и техники*. 2010, **2**(3), 62–67.

Поступила 09.06.11

Summary

A model simulating the magnetron sputtering process of array targets is suggested. This model allows to predict the ultimate composition of the deposited films when extensive or axial magnetron sputtering systems (MSS) are used to process array targets with arbitrary positions of the insertion blocks. The model is based on integration of the sputtered flow from each point of the sputtering area, and takes into consideration the sputtering yield and electron-ion emission ratio of both base and insertions. The discharge current-density distribution curve can be approximated using the third central moment in the “binary Gaussian”-type of distribution, thus allowing the use of actual parameters of the sputtering area and magnetron discharge current. Also it provides a sufficient accuracy in mathematical description of the ion current density distribution. In order to verify the suggested model experimental deposition of thin films was performed by means of magnetron sputtering of Ti/Zr and Ti/Zr/Pb array targets. The analysis of simulation data showed that the model error does not exceed 10.0%.
