

04
Аппроксимация профиля зоны эрозии планарных магнетронов с дисковым катодом

© А.В. Рогов, Ю.В. Капустин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
 123182 Москва, Россия
 e-mail: alex-rogov@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2016 г.)

Предложена универсальная аппроксимация нормированного профиля зоны эрозии планарных магнетронов с дисковым катодом составной функцией, включающей функцию плотности вероятности минимального значения распределения экстремальных значений для области от центра дискового катода до максимума зоны эрозии и функцию выживания распределения Вейбулла — от максимума до внешней границы зоны распыления. Проверка точности аппроксимации проводилась для шести магнетронов, отличающихся размерами катодов или конструкцией магнитных систем. Во всех случаях получено хорошее соответствие аппроксимации и экспериментально измеренных значений. Представленные результаты могут быть использованы для анализа процессов на катоде при распылении и для уточнения расчета профиля покрытий.

Введение

Магнетронные распылительные устройства широко применяются для напыления как декоративных, так и функциональных покрытий различного назначения. Также они могут быть использованы для проведения экспериментальных исследований по распылению различных материалов, например, при экспериментальных исследованиях устойчивости к распылению металлических зеркал в условиях, имитирующих распыление атомами перезарядки в термоядерных установках [1], и при проведении технологических исследований по модификации рельефа распыляемой поверхности, например, при исследовании режимов формирования вискерсов на катоде в режиме частичного переосаждения распыляемого материала [2].

Профиль зоны эрозии планарных магнетронов с дисковым катодом обладает осевой симметрией. Как было показано в [3], нормированный профиль зоны эрозии не зависит от глубины выработки и материала катода. Использование аналитической аппроксимации позволяет описать зависимость глубины эрозии катода магнетрона и плотности потока распыляющих ионов от расстояния до оси магнетрона с помощью значений нескольких подгоночных параметров, которые могут быть получены от разработчика магнетрона или подобраны по результатам измерения профиля эродированного катода. Такая аппроксимация позволяет проводить анализ процессов при распылении катода, а также более точный расчет профиля покрытий при магнетронном напылении. В работе [4] для аналитического описания профиля зоны эрозии использовалась составная функция, содержащая две гауссианы, отличающиеся масштабными параметрами. Целью настоящей работы был выбор аппроксимирующей функции с минимальным числом варьируемых параметров, обеспечивающей более точную аппроксимацию вне зависимости от конструктивных особенностей и размера магнетронного распылительного устройства с аксиально-симметричным профилем зоны эрозии.

Методика эксперимента

Профиль зоны эрозии для использованных магнетронов измерялся с помощью профилометра на основе механического микрометра с точностью измерения 0.01 mm. Для линейного перемещения катода использовалась микрометрическая подача с точностью позиционирования 0.01 mm. Исследовались профили зоны эрозии шести планарных магнетронов с дисковыми катодами и магнитными системами, выполненными из NdFeB (марка N38) и SmCo (марка YX20) постоянных магнитов. Параметры магнетронов представлены в табл. 1.

Магнетроны, отмеченные (*) и (**), имели одинаковую конструкцию и отличались только магнитной системой. Эксперименты по распылению проводились с использованием Ar в качестве рабочего газа.

Результаты и обсуждение

Все измеренные профили зоны эрозии нормировались в максимуме на единицу. В работе [4] в качестве аппроксимирующей функции для профиля зоны эрозии использовалась двойная гауссиана, имеющая вид

$$F(r) = \begin{cases} \exp \left[-\frac{(r-r_{\max})^2}{2\sigma_1^2} \right], & r \leq r_{\max}, \\ \exp \left[-\frac{(r-r_{\max})^2}{2\sigma_2^2} \right], & r > r_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где r_{\max} — радиус максимума зоны эрозии, σ_1 и σ_2 — масштабные параметры. Проверка такого приближения показала его недостаточную точность, особенно при наличии центрального нераспыляемого пятна. Подстановка различных функций, сходных по форме с полученными зависимостями, выявила, что более качественную аппроксимацию обеспечивает составная функция, включающая функцию плотности вероятности

Таблица 1. Характерные параметры использования магнетронов

№	Магнетрон	Диаметр катода, mm	Внутренний радиус зоны эрозии r_0 , mm	Внешний радиус зоны эрозии R_0 , mm	Радиус максимума зоны эрозии r_{max} , mm	Магнитная система	
						центральный магнит	периферийный магнит
1	Оригинальная конструкция 1*	25	0	11	5.88	SmCo Ø9 × 10 mm	SmCo Ø25 × Ø15 × 10 mm
2	Оригинальная конструкция 1*	25	1.2	11	6.95	NdFeB Ø10 × 10 mm	NdFeB Ø25 × Ø18 × 5 mm
3	Onix-2 Angstrom Sciences [5]	50	0	21	12.40	Нет данных	Нет данных
4	Оригинальная конструкция 2**	65	0	23	15.51	SmCo Ø20 × 10 mm	SmCo составной (12 шт) 10 × 10 × 10 mm
5	Оригинальная конструкция 2**	65	7.3	25	15.50	NdFeB Ø20 × 10 mm	NdFeB составной (16 шт) 8 × 8 × 8 mm
6	Оригинальная конструкция 3	115	9	49	31.00	SmCo Ø40 × 10 mm	SmCo составной (10 шт) 25 × 10 × 10 mm

минимального значения распределения экстремальных значений в области от центра дискового катода до максимума зоны эрозии и функцию выживания распределения Вейбулла [6] — от максимума до внешней границы зоны распыления. Такая аппроксимирующая функция (с учетом нормировки) имеет вид

$$F_1(r) = \begin{cases} \exp \left[\left(\frac{r-r_{max}}{\sigma_3} \right) - \exp \left(\frac{r-r_{max}}{\sigma_3} \right) + 1 \right], & r \leq r_{max}, \\ \exp \left[-\frac{(r-r_{max})^n}{2\sigma_4^n} \right], & r > r_{max}. \end{cases} \quad (2)$$

Параметры σ_3 , σ_4 и n являются подгоночными. Для сравнительного анализа точности аппроксимации экспериментально снятых профилей функциями $F(r)$ и $F_1(r)$ были подобраны оптимальные значения этих параметров по критерию минимизации среднеквадратичного отклонения значений функции от экспериментально измеренных значений.

Зная параметры приближения, может быть легко рассчитан коэффициент использования материала катода [7]. Без учета крепежных элементов и при наличии центрального нераспыляемого пятна, предельное (максимальное) значение коэффициента использования материала катода K_m можно записать в виде

$$K_m = \frac{2 \int_{r_0}^{R_0} F_1(r) r dr}{R_0^2 - r_0^2}. \quad (3)$$

Этот параметр удобен для оценки степени совершенства магнитной системы магнетрона по критерию эффективности использования материала катода.

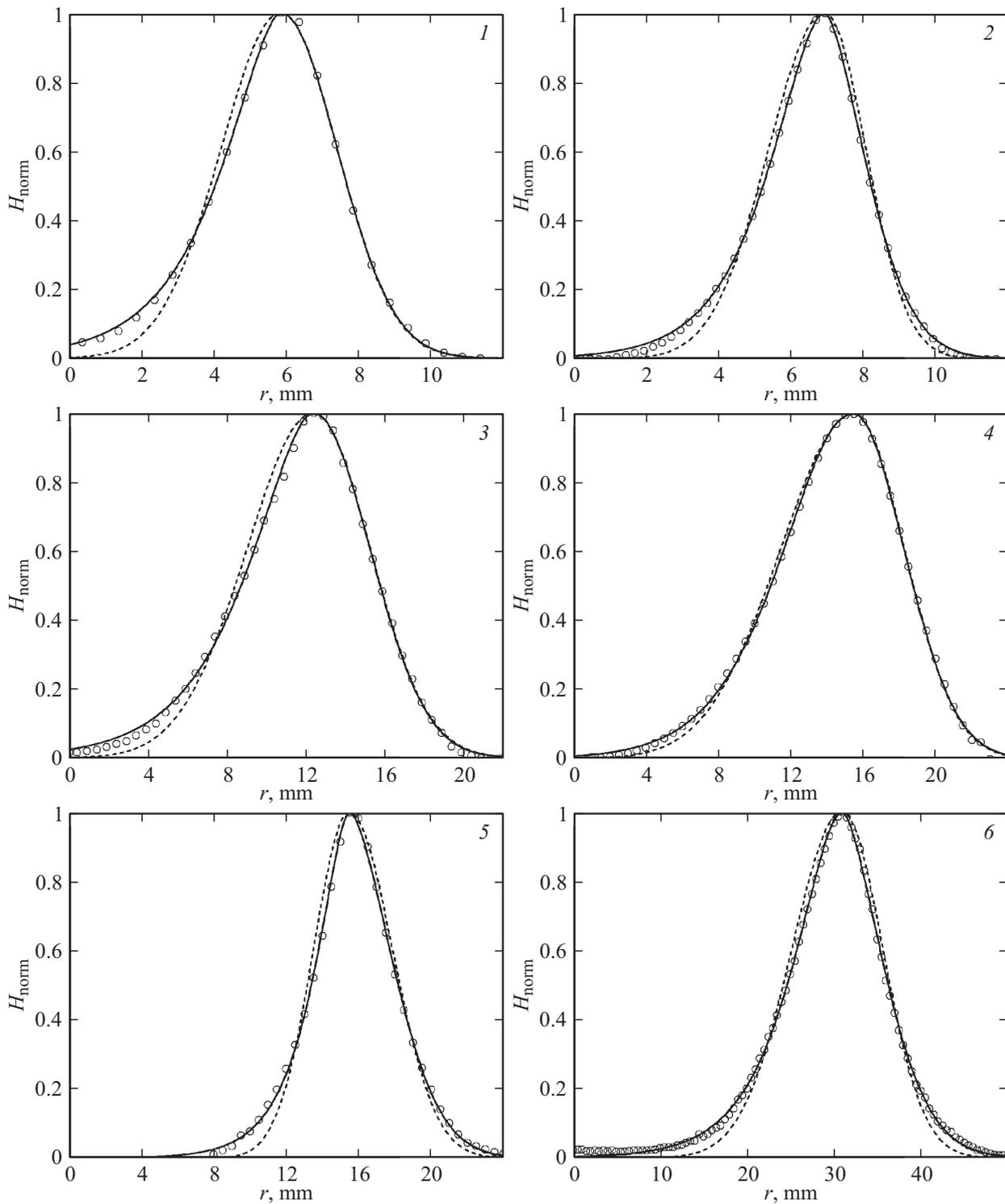
Таблица 2. Рассчитанные значения параметров аппроксимации

№	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	n	K_m
1	1.666	1.550	1.260	1.550	1.985	0.383
2	1.550	1.637	1.173	1.057	1.637	0.371
3	3.376	2.884	2.536	2.869	2.011	0.384
4	4.074	2.797	3.000	2.768	1.956	0.444
5	1.982	2.362	1.460	1.492	2.217	0.306
6	5.782	4.654	4.357	4.309	1.608	0.361

В табл. 2 представлены полученные значения параметров аппроксимации и расчетное значение K_m для использованных магнетронов.

Результаты измерений и соответствующие аппроксимационные зависимости для использованных магнетронов представлены на рисунке.

Анализ полученных данных показывает, что функция $F_1(r)$ во всех рассмотренных случаях дает более хорошее приближение по сравнению с аппроксимацией $F(r)$. При отсутствии центрального не распыляемого пятна (магнетроны 1, 3 и 4) оптимальное значение для n в функции $F_1(r)$ мало отличается от двойки (табл. 2). В этом случае для аппроксимации внешней области зоны распыления ($r > r_{max}$) без существенной потери точности приближения можно принять $n = 2$, т.е. функция приобретает вид нормального распределения Гаусса. При этом количество варьируемых параметров уменьшается до двух.



Нормированный профиль зоны эрозии: \odot — эксперимент, -- — аппроксимация функцией $F(r)$, — — аппроксимация функцией $F_1(r)$. Номер графика соответствует номеру магнетрона в табл. 1.

Заключение

На основании представленных данных можно сделать вывод, что для планарных магнетронов с дисковым катодом использование составной функции, включающей функцию плотности вероятности минимального значе-

ния распределения экстремальных значений и функцию выживания распределения Вейбулла, позволяет получить высокую точность аппроксимации нормированного профиля зоны эрозии. Показано, что при отсутствии центрального нераспыляемого пятна или при распылении центральной зоны катода вторая функция без

существенной потери точности аппроксимации, может быть заменена нормальным распределением Гаусса. При этом число коэффициентов аппроксимации снижается с трех до двух. Поскольку в предложенной аппроксимации используется малое число подгоночных параметров, их подбор не вызывает затруднений. Представленные результаты могут быть использованы для анализа процессов на поверхности катода при его распылении и для расчета профиля покрытий с учетом распределения плотности потока распыляющих ионов.

Список литературы

- [1] *Рогов А.В., Вуколов К.Ю.* // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2005. Вып. 1. С. 9–25.
- [2] *Rogov A.V., Fanchenko S.S., Varfolomeev A.E.* // Phys. Stat. Sol. (a) Appl. and Mater. 2005. Vol. 202. № 14. P. 273–274. DOI: 10.1002/pssa.200521217.
- [3] *Мельников С.Н.* // Междунар. научно-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 г.): Материалы конф. В 2 ч. Ч. 2. Минск, 2014. С. 198–199.
- [4] *Голосов Д.А., Мельников С.Н., Достанко А.П.* // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 1. С. 63–72.
- [5] <http://www.angstromsciences.com/Magnetron-Technical-Specifications>.
- [6] *Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B.* Statistical Distributions. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. P. 98, 193.
- [7] *Данилин Б.С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 85–89.