

## Краткие сообщения

04

### Повышение точности аппроксимации профиля зоны эрозии планарных магнетронов

© А.В. Рогов,<sup>1,2</sup> Ю.В. Капустин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия

<sup>2</sup> Координационный центр „Управляемый термоядерный синтез–международные проекты“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: alex-rogov@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2017 г.)

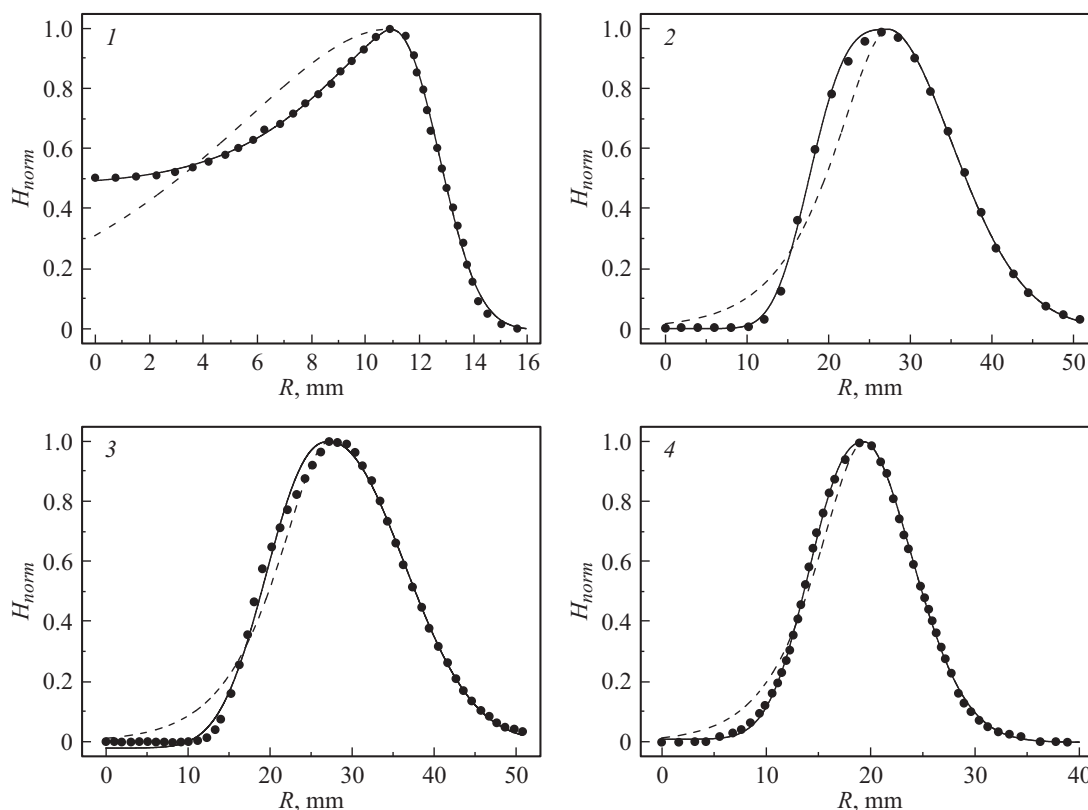
Показано, что использование смещенной по оси ординат функции выживания распределения Вейбулла позволяет повысить точность аппроксимации нормированного профиля зоны эрозии в области от оси до максимума распыления по сравнению с предложенной ранее функцией распределения экстремальных значений. В области от максимума до внешней границы зоны эрозии используется функция выживания распределения Вейбулла. Наибольшее преимущество использования новой аппроксимации проявляется для магнетронов с большим центральным нераспыляемым пятном и для магнетронов со значительным распылением в приосевой зоне.

DOI: 10.21883/JTF.2017.09.44923.2162

#### Введение

Для аппроксимации нормированного в максимуме на единицу профиля зоны эрозии планарных магнетро-

нов в работе [1] была использована функция в виде сдвоенной гауссианы. Как было показано в [2], более точное приближение можно получить при применении составной функции, включающей функцию распреде-



Сравнение экспериментально измеренного профиля зоны эрозии с аппроксимирующими кривыми: ●●● — экспериментальные данные, --- — аппроксимация функций  $F_1(r)$ , — — аппроксимация функций  $F_2(r)$ .

Рассчитанные значения параметров аппроксимации

| №  | Магнетрон                                                                                                                           | $\sigma_1$ | $\delta_1$ | $\sigma_2$ | $n_2$ | $\delta_2$ | $\sigma_3$ | $n_3$ | $K$   | $\delta_3$ | $r_{\max}$ , mm |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|-------|------------|------------|-------|-------|------------|-----------------|
| 1  | Типа „Orbitorr“ [4]                                                                                                                 | 5.38       | 0.09       | 2.39       | 2.28  | 0.02       | 4.30       | 1.34  | 0.48  | 0.006      | 10.9            |
| 2  | Протяженный планарный, вблизи центра, по длинной стороне [5]                                                                        | 5.85       | 0.10       | 11.52      | 1.85  | 0.008      | 10.96      | 3.29  | 0.00  | 0.020      | 27.4            |
| 3  | Протяженный, вблизи центра, по короткой стороне [5]                                                                                 | 5.05       | 0.08       | 12.52      | 2.10  | 0.009      | 9.75       | 2.37  | -0.02 | 0.030      | 27.2            |
| 4  | МАС-80 [1]                                                                                                                          | 3.70       | 0.06       | 6.76       | 1.86  | 0.01       | 6.70       | 2.38  | 0.01  | 0.010      | 19.4            |
| 5  | Несбалансированный [6]                                                                                                              | 1.84       | 0.01       | 3.41       | 2.05  | 0.01       | 3.46       | 1.64  | -0.01 | 0.005      | 9.9             |
| 6  | Сбалансированный [6]                                                                                                                | 1.06       | 0.02       | 1.94       | 1.61  | 0.01       | 1.99       | 1.41  | 0.00  | 0.007      | 10.1            |
| 7  | Onix-2 [2]                                                                                                                          | 2.53       | 0.02       | 4.06       | 2.01  | 0.009      | 4.83       | 1.47  | -0.01 | 0.007      | 12.4            |
| 8  | Катод: $\varnothing 25$ mm<br>SmCo: $\varnothing 25 \times \varnothing 15 \times 10$ mm<br>SmCo: $\varnothing 9 \times 10$ mm [2]   | 1.26       | 0.01       | 2.20       | 1.99  | 0.01       | 2.30       | 1.50  | 0.02  | 0.002      | 5.9             |
| 9  | Катод: $\varnothing 25$ mm<br>NdFeB: $\varnothing 25 \times \varnothing 18 \times 5$ mm<br>NdFeB: $\varnothing 10 \times 10$ mm [2] | 1.16       | 0.009      | 1.61       | 1.66  | 0.006      | 2.2        | 1.54  | 0     | 0.006      | 7.0             |
| 10 | Катод: $\varnothing 65$ mm<br>SmCo: 12 шт $8 \times 8 \times 8$ mm<br>SmCo: $\varnothing 20 \times 10$ mm [2]                       | 3.09       | 0.02       | 3.96       | 1.96  | 0.01       | 5.77       | 1.78  | 0     | 0.007      | 15.5            |
| 11 | Катод: $\varnothing 65$ mm<br>NdFeB: 16 шт $8 \times 8 \times 8$ mm<br>NdFeB: $\varnothing 20 \times 10$ mm                         | 1.57       | 0.02       | 3.35       | 1.70  | 0.009      | 2.91       | 1.29  | 0     | 0.006      | 15.5            |
| 12 | Катод: $\varnothing 65$ mm<br>NdFeB: 12 шт $10 \times 10 \times 10$ mm<br>NdFeB: $\varnothing 25 \times 10$ mm                      | 2.17       | 0.01       | 3.19       | 1.61  | 0.005      | 4.01       | 1.70  | 0.01  | 0.009      | 16.1            |
| 13 | Катод: $\varnothing 115$ mm<br>SmCo: 10 шт $25 \times 10 \times 10$ mm<br>SmCo: $\varnothing 40 \times 10$ mm [2]                   | 4.36       | 0.01       | 6.62       | 1.62  | 0.009      | 7.93       | 1.58  | 0.02  | 0.004      | 31              |

ления экстремальных значений и функцию выживания распределения Вейбулла [3]:

$$F_1(r) = \begin{cases} \exp \left[ \left( \frac{r-r_{\max}}{\sigma_1} \right) - \exp \left( \frac{r-r_{\max}}{\sigma_1} \right) + 1 \right], & r \leq r_{\max}, \\ \exp \left[ - \left( \frac{r-r_{\max}}{\sigma_2} \right)^{n_2} \right], & r > r_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r$  — смещение от центра распределения,  $r_{\max}$  — расстояние между центром распределения и максимумом зоны эрозии,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $n_2$  — параметры аппроксимации.

Последующие исследования показали, что при наличии существенного распыления или большого нераспыляемого пятна в приосевой области зоны эрозии (при  $0 \leq r \leq r_{\max}$ ), такая аппроксимация не дает удовлетворительной точности. Ниже предлагается аппроксимация, значительно повышающая точность приближения как для магнетронов с профилем зоны эрозии этих типов, так и для обычных магнетронов с минимальным (ну-

левым) распылением на оси распыляемого катода, не имеющих центрального нераспыляемого пятна.

## Анализ экспериментальных данных

Было выявлено, что в приосевой области профиля зоны эрозии существенно более точное приближение по сравнению с предложенной ранее аппроксимацией можно получить при использовании функции выживания распределения Вейбулла, смещенной по вертикальной оси. Такая аппроксимирующая функция имеет вид

$$F_2(r) = \begin{cases} (1 - K) \exp \left[ - \left( \frac{r_{\max}-r}{\sigma_3} \right)^{n_3} \right] + K, & r \leq r_{\max}, \\ \exp \left[ - \left( \frac{r-r_{\max}}{\sigma_2} \right)^{n_2} \right], & r > r_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $K$  — параметры аппроксимации. Поскольку правая часть аппроксимирующей функции по

сравнению с [2] не изменилась, для нее сохранены индексы параметров приближения, использованные ранее.

Сравнительный анализ точности приближения предложенной ранее и новой аппроксимации проводился как на основе данных, использованных в [2], так и посредством обработки экспериментальных данных, представленных в литературных источниках [3–6]. Оцифровка графиков для последующей обработки проводилась с использованием программы Grafula 3. Точность приближения оценивалась путем расчета среднеквадратичного отклонения аппроксимации от экспериментально измеренных значений ( $\delta$ ):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F(r_i) - Y_i)^2}, \quad (3)$$

где  $N$  — количество точек в анализируемой выборке экспериментальных данных,  $i$  — индекс экспериментальной точки,  $F(r)$  — использованная аппроксимационная зависимость,  $r_i$  — расстояние от оси магнетрона до точки измерения,  $Y_i$  — относительная глубина травления при  $r = r_i$ .

Аппроксимационные параметры и значения  $\delta$  для  $F_1(r)$  и  $F_2(r)$  рассчитывались в Mathcad 14. Для поиска коэффициентов использовался метод обобщенного регрессионного анализа — функция „genfit“ (в [2] они подбирались вручную). Параметры приближения и среднеквадратические отклонения  $\delta_1$  и  $\delta_3$  в области  $0 \leq r \leq r_{\max}$  и  $\delta_2$  при  $r > r_{\max}$  представлены в таблице.

Для иллюстрации преимущества использования  $F_2(r)$  на рисунке представлены исходные данные и результаты аппроксимации профилей зоны эрозии с максимальной ошибкой фиттинга при использовании  $F_1(r)$ . Номера на рисунке соответствуют номерам магнетронов в таблице.

Из представленных результатов видно, что существенное повышение точности аппроксимации с использованием  $F_2(r)$  наблюдается при наличии большого центрального нераспыляемого пятна. Наибольший выигрыш проявился для магнетрона с повышенной эффективностью использования распыляемого материала (типа „Orbitorr“) со значительным распылением в приосевой зоне. В этом случае точность аппроксимации повысилась более чем в 15 раз.

## Заключение

Проведенный сравнительный анализ аппроксимации профиля зоны эрозии показал, что применение зависимости  $F_2(r)$  дает существенное увеличение точности приближения в области  $0 \leq r \leq r_{\max}$  для всех использованных в ходе анализа экспериментальных данных. Она применима как для магнетронов с дисковым катодом, так и для протяженных планарных магнетронов. Наибольшее преимущество использования новой аппроксимации по сравнению с предложенной ранее проявляется при наличии значительного распыления

вблизи оси профиля зоны эрозии, что характерно для магнетронов с повышенной эффективностью использования материала катода. Полученную аппроксимацию удобно использовать для расчета эффективности использования распыляемого материала катода магнетрона [2], глубины эрозии катода в ходе распыления, профиля покрытия, формируемого на подложке при магнетронном напылении, и распределения плотности потока ионов при исследовании их взаимодействия с поверхностью распыляемого катода.

## Список литературы

- [1] *Голосов Д.А., Мельников С.Н., Достанко А.П.* // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 1. С. 63–72.
- [2] *Рогов А.В., Капустин Ю.В.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 10. С. 142–145.
- [3] *Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B.* Statistical Distributions. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. P. 98, 193.
- [4] *Данилин Б.С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 85–89.
- [5] [http://operafea.com/wp-content/uploads/2013/06/EUGM2013\\_Day2\\_5\\_SE\\_Plasma-Simulation-of-target-Erosion-and-Film-Deposition-in-a-Magnetron-Sputter-Coater-CCC.pdf](http://operafea.com/wp-content/uploads/2013/06/EUGM2013_Day2_5_SE_Plasma-Simulation-of-target-Erosion-and-Film-Deposition-in-a-Magnetron-Sputter-Coater-CCC.pdf)
- [6] *Достанко А.П., Голосов Д.А., Мельников С.Н.* // Матер. 11-й Междунар. конф. „Взаимодействие излучений с твердым телом“. Минск, 2015. С. 398–400.