

# 05, май 2016

УДК 621.793.182

## **Исследование профиля выработки плоского дискового катода магнетронной распылительной системы**

*Поздняков В.Г., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: Духопельников Д.В., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*[duh@power.bmstu.ru](mailto:duh@power.bmstu.ru)*

### **Введение**

Одними из наиболее распространенных устройств для нанесения тонких металлических покрытий являются магнетронные распылительные системы [1], [2].

Основным механизмом формирования потока наносимого материала в магнетронных распылительных системах является распыление поверхности катода-мишени ионами инертного газа (аргон), которые образуются в магнетронном разряде.

Плазма в таком разряде локализуется и удерживается около катода внутри арочного магнитного поля. Неоднородность магнитного поля такой конфигурации приводит к неоднородному распределению электрического поля и концентрации плазмы у поверхности катода. Это, в свою очередь, вызывает неравномерное распределение ионного тока по радиусу катода-мишени и его неравномерную выработку. В магнетронных распылительных системах с плоским дисковым катодом эта выработка имеет кольцевую форму, что приводит к снижению коэффициента использования материала катода [3]. Значительно изменяющаяся по радиусу катода плотность тока приводит к его неравномерному нагреву и проблемам при охлаждении в области максимальной плотности тока.

Поэтому для проектирования магнетронных распылительных систем необходимо знать характер профиля выработки катода, а, следовательно, распределение плотности мощности, приносимой из разряда. Также очень важно знать коэффициент использования

материала и профиль выработки катода при нанесении толстых качественных покрытий, особенно из дорогих материалов (серебро, золото) [4].

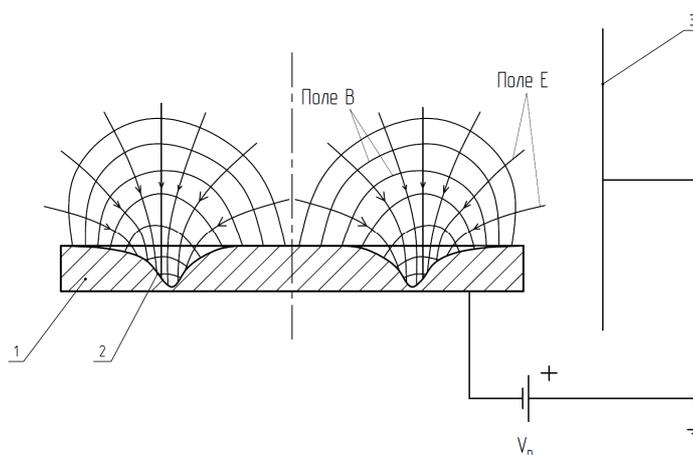


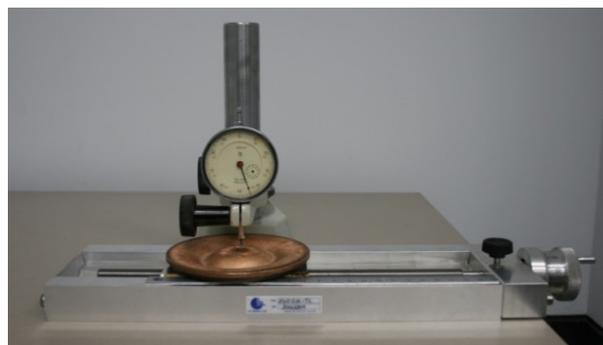
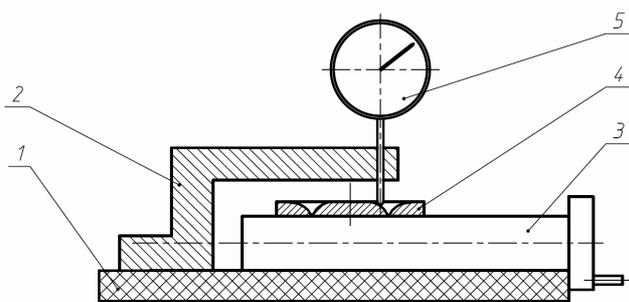
Рис. 1. Схема цилиндрического магнетрона: 1 – катод, 2 – профиль выработки катода, 3 – корпус вакуумной камеры (анод)

В данной работе проведено измерение профилей выработки двух катодов различных размеров, дана аппроксимация полученных данных, а также получено аналитическое выражение для коэффициента использования материала катода.

### **Измерение профиля выработки**

Измерение профиля выработки катода проводилось для двух медных катодов диаметрами 105 мм и 50 мм, толщиной 9 мм и 4 мм соответственно. Катоды были проработаны на двух различных магнетронных распылительных системах.

Для измерения профиля выработки был собран измерительный стенд (рис. 2). Измерение глубины выработки проводилось с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Перемещение катода осуществлялось с помощью микрометрического столика с точностью позиционирования 0,1 мм. Измерения проводились с шагом 1 мм по радиусу катода. На рис. 2б представлена фотография процесса измерения профиля катода диаметром 105 мм.



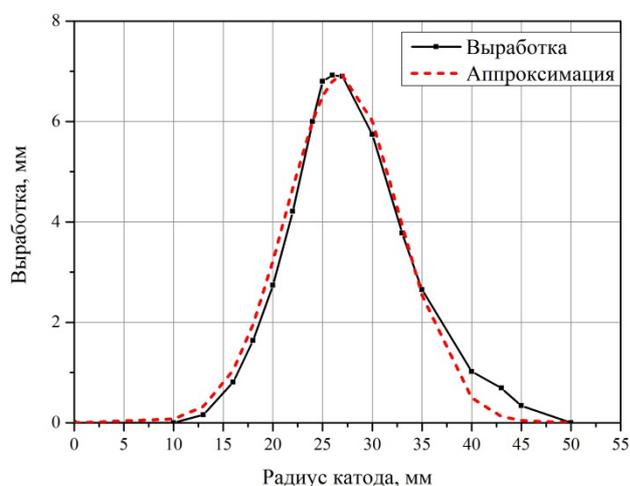
а)

б)

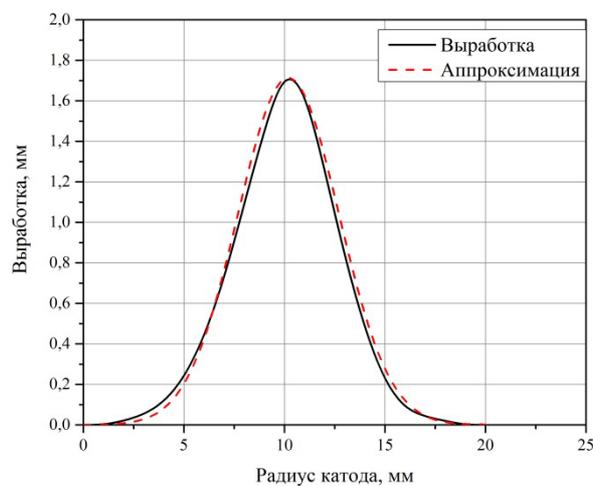
Рис. 2. Измерительный стенд для определения профиля выработки катода:

а) схема стенда: 1 – стол, 2 – держатель, 3 – микрометрический столик, 4 – катод, 5 – индикатор часового типа; б) фотография стенда

На рис. 3 представлены результаты измерения профиля выработки катодов диаметрами 105 мм (а) и 50 мм (б), а также аппроксимация полученных данных. Диаметр зоны распыления для катода диаметром 105 мм составлял 100 мм. Максимум выработки для этого катода находился на расстоянии 25 мм от центра катода и составлял 6,9 мм. Радиус максимальной выработки, как видно, был равен половине радиуса зоны распыления.



а)



б)

Рис. 3. Результаты измерения выработки катода и аппроксимация полученных

данных: а – диаметр катода 105 мм, б – диаметр катода 50 мм

У катода диаметром 50 мм диаметр зоны распыления был 40 мм. Максимум выработки при этом находился на расстоянии 10 мм от центра катода, и глубина выработки равнялась 1,8 мм. Радиус максимальной выработки, как и у катода диаметром 105 мм, был равен половине радиуса зоны распыления.

Полученные профили распыления хорошо аппроксимируются Гауссовой кривой. Профиль выработки катода в нашем случае аналогичен профилю выработки катода в вакуумно-дуговом испарителе с арочным магнитным полем [5] - [7]. Профиль выработки катода может быть аппроксимирован выражением вида:

$$h(r) = h_{max} \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{k^2}\right) \quad (1),$$

где  $h_{max}$  – максимальное значение глубины выработки катода,  $r$  – радиус катода,  $r_0$  – смещение максимума выработки относительно центра катода,  $k$  – полуширина выработки на глубине  $h_{max}/e$ ,  $r_p$  – радиус распыленной зоны катода (рис. 4).

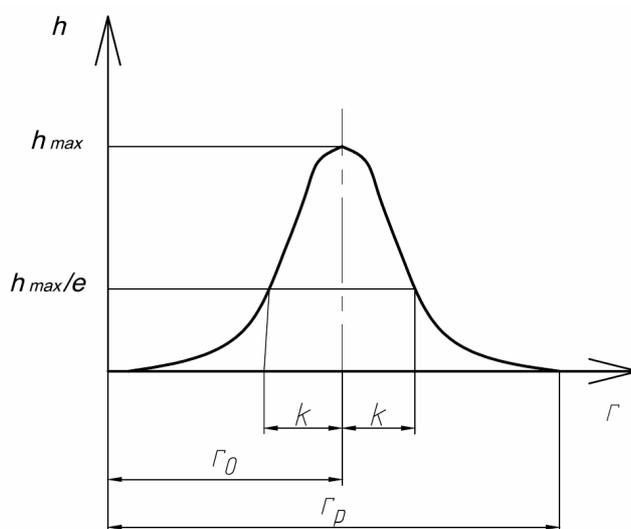


Рис. 4. Параметры профиля выработки катода

У обоих катодов обнаружилось, что полуширина выработки на глубине  $h_{max}/e$  равняется  $r_p/6$ .

### Расчет коэффициента использования материала катода

Коэффициент использования материала катода  $K$  определяется как отношение объема распыленного материала  $V_{расп}$  к исходному объему катода  $V_0$ :

$$K = \frac{V_{расп}}{V_0}. \quad (2)$$

Объем распыленного материала можно определить, зная профиль выработки катода (рис. 4). Вычислим объем выработки, интегрируя выражение (1) по радиусу катода с учетом того, что выработка является осесимметричной:

$$V_{расп} = \int_0^{r_p} 2\pi r h(r) dr. \quad (3)$$

Подставляем в (3) выражение (1) и, произведя замену  $y = r - r_0$ , получаем:

$$\begin{aligned} V_{\text{расп}} &= \int_0^{r_p} 2\pi r h_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{(r - r_0)^2}{k^2}\right) dr = \\ &= 2\pi h_{\text{max}} \int_{-r_0}^{r_p - r_0} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) \cdot (y + r_0) d(y + r_0) = \\ &= 2\pi h_{\text{max}} \left[ \int_{-r_0}^{r_p - r_0} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) y dy + r_0 \int_{-r_0}^{r_p - r_0} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) dy \right] \quad (4) \end{aligned}$$

Первое слагаемое полученной суммы легко интегрируется:

$$\int_{-r_0}^{r_p - r_0} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) y dy = \frac{-k^2}{2} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) \quad (5)$$

Интеграл от второго слагаемого не берется аналитически в простейших функциях, однако, можно принять [8]:

$$\int_{-r_0}^{r_p - r_0} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) dy \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{k^2}\right) dy = k\sqrt{\pi}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4), делаем обратную замену  $y = r - r_0$ , и, интегрируя по  $r$  в диапазоне  $0 \leq r \leq r_p$ , получаем:

$$V_{\text{расп}} = 2\pi h_{\text{max}} \left[ \frac{-k^2}{2} \left[ \exp\left(-\frac{(r_p - r_0)^2}{k^2}\right) - \exp\left(-\frac{r_0^2}{k^2}\right) \right] + r_0 k\sqrt{\pi} \right]. \quad (7)$$

При  $r_0 \approx r_p/2$ ,  $k \approx r_p/6$  выражение (7) упрощается:

$$V_{\text{расп}} = \pi^{3/2} h_{\text{max}} \frac{r_p^2}{6}. \quad (8)$$

Тогда для коэффициента использования материала плоского дискового катода с толщиной  $h_k$  и радиусом  $r_k$  из (2) с учетом (8) можно получить:

$$K = \frac{V_{\text{расп}}}{V_0} = \frac{\pi^{3/2} h_{\text{max}} r_p^2 / 6}{\pi r_k^2 h_k} = \frac{\sqrt{\pi} h_{\text{max}} r_p^2}{6 h_k r_k^2} \approx 0,295 \frac{h_{\text{max}} r_p^2}{h_k r_k^2}. \quad (9)$$

Считая глубину максимальной выработки равной толщине катода  $h_{\text{max}} = h_k$  и радиус зоны распыления равный радиусу катода, можно получить значение максимального коэффициента использования материала плоского дискового катода.

$$K = 0,295.$$

## Выводы

Профиль выработки катода магнетронной распылительной системы имеет вид Гауссовой кривой.

Из анализа полученных результатов следует, что коэффициент использования материала определяется отношением глубины максимальной выработки к толщине катода и квадратом отношения радиуса зоны распыления к радиусу катода.

Максимально достижимый коэффициент использования материала при таком профиле выработки не превосходит 0,3.

## Список литературы

- [1] Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. В 2 кн. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
- [2] Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
- [3] Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1: Устройство, принципы работы, применение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
- [4] Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Воробьёв Е.В., Кириллов Д.В. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления // Наноинженерия. 2014. № 9 (39). С. 30-32
- [5] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №11. DOI: 10.7463/1112.0482485
- [6] Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А., Чжо Вин Наинг. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10 (22). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-1042
- [7] Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя при различных токах разряда и индукции магнитного поля // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/568240.html> (дата обращения 10.03.2016).
- [8] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2010. 608 с.