

УДК 533.9.07

## Повышение эффективности цилиндрических магнетронных распылительных систем с вращающимся катодом

А. Н. Захаров, А. А. Соловьев, Н. С. Сочугов

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

*Цель работы — повышение эффективности цилиндрических магнетронных распылительных систем с вращающимся катодом за счет расширения области однородного нанесения покрытий и снижения ускоренной эрозии концевых частей катода. Разработана конструкция магнитной системы с увеличенным на ее концах магнитным полем (на 5–15 %) и модифицированными поворотными частями, позволяющая расширить область нанесения покрытия с однородностью  $\pm 1$  % на 13 см и полностью устранить ускоренную эрозию концевых частей катода.*

Существует широкая область применений пленочных покрытий, наносимых методом магнетронного распыления. Некоторые покрытия, например низкоэмиссионные, оптические, в основном наносятся на подложки большой площади и требуют высокой степени однородности толщины по всей площади подложки. Для нанесения этих покрытий в промышленных масштабах наилучшим образом подходят цилиндрические магнетроны с вращающимися катодами [1].

Они имеют более высокие, по сравнению с плоскими магнетронами, степень утилизации катода, уровень используемой мощности и стабильность работы в процессах реактивного нанесения покрытий. Однако цилиндрические магнетроны с вращающимися катодами имеют и некоторые недостатки, обусловленные их характерной геометрией. Первым недостатком, типичным для всех протяженных магнетронов, является то, что область однородного нанесения

покрытий значительно меньше длины распыляемого катода [2]. Это происходит вследствие меньшей скорости нанесения покрытия на концах подложки, чем на ее центральной части, по причине несимметричной диаграммы напыления. Поэтому в зависимости от требуемой однородности приходится изготавливать магнетроны с размерами катода на 30–60 см большими, чем размеры обрабатываемых подложек. Это ведет к увеличению стоимости не только самих магнетронов, но и всей вакуумной установки. Вторым недостатком — ускоренная эрозия концевых частей катода [3, 4] вследствие большей удельной мощности, приходящейся на эти участки, по сравнению с остальной частью катода мишени. Для уменьшения эрозии на концах катода иногда используют увеличение его толщины или ширины распыляемой канавки в местах с ускоренной эрозией [4, 5]. Однако недостатком этих методов является уменьшение магнитного поля на поверхности катода, приводящее к потерям электронов и появлению неустойчивостей в плазме магнетронного разряда. Использование катодов с концевыми частями, изготовленными из материала с низкой скоростью распыления, также нежелательно, так как неизбежно попадание этого материала на подложку.

В данной статье представлены результаты экспериментов, направленных на создание конструкции магнитной системы, позволяющей повысить однородность нанесения покрытий и однородность эрозии мишени в цилиндрическом магнетроне с вращающимся катодом.

### Экспериментальная часть

Схематическое изображение установки, на которой проводились эксперименты, представлено на рис. 1. Вакуумная камера установки имеет размеры 600х600х600 мм и откачивается диффузионным насосом. Внутри вакуумной камеры вертикально располагается цилиндрический магнетрон с вращающимся катодом. Цилиндрический катод магнетрона, имеющий внешний диаметр 80 мм и длину 600 мм, может вращаться вокруг магнитной системы с частотой до 50 об/мин. Вращение катода осуществляется двигателем посредством ременной передачи. В экспериментах использовались катоды из алюминия и титана. Внутри катода находится магнитная система, изображенная на рис. 2. Она состоит из линейной и поворотной частей, формирующих замкнутый контур силовых линий магнитного поля над поверхностью катода. Линейная часть в свою очередь состоит из трех параллельных цепочек постоянных магнитов, размещенных на магнитопроводе. Боковые магниты 4 соединяются на

концах магнитной системы концевыми магнитами 5. Между боковыми магнитами и цепочкой центральных магнитов существует зазор  $\Delta X$ .

В качестве анода использовались стенки вакуумной камеры. Нанесение покрытия осуществлялось при давлении 1 мторр, при этом электрическая мощность источника питания составляла 3 кВт. Для однородного нанесения покрытия по ширине подложки осуществлялось ее сканирование на расстоянии 4 см от поверхности распыляемого катода.

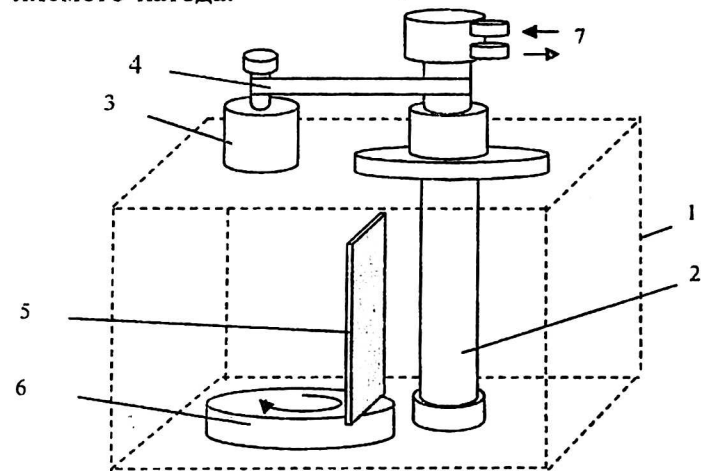


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
1 — вакуумная камера; 2 — вращающийся катод;  
3 — двигатель; 4 — ременная передача; 5 — подложка;  
6 — вращающийся стол; 7 — охлаждающая вода

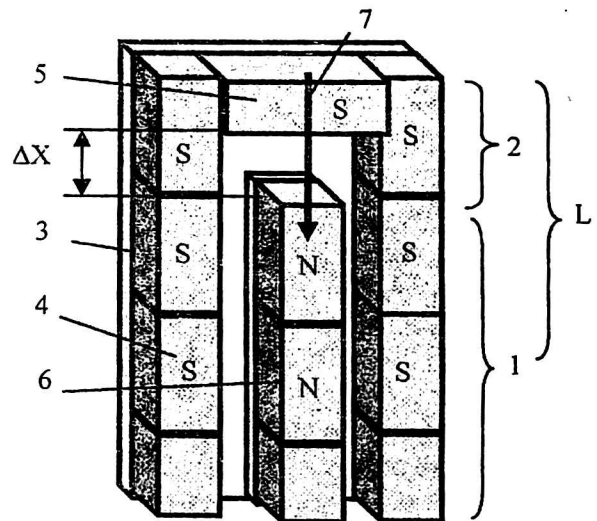


Рис. 2. Магнитная система:  
1 — линейная часть; 2 — поворотная часть;  
3 — магнитопровод; 4 — боковые магниты; 5 — концевые магниты; 6 — центральные магниты;  
7 — направление измерения магнитного поля

Величина магнитного поля на поверхности катода определялась измерителем магнитной индукции РШ1-10, который имеет стандартную погрешность измерения  $\pm 1,5\%$ . Толщина нанесенной пленки измерялась с помощью интерфе-

рениционного микроскопа МИИ-4. Погрешность измерения составляла не более  $\pm 0,5\%$ . Однородность эрозии катода по его длине определялась микрометром глубины эрозии катода и последующим вычислением площади поперечного сечения эрозионной канавки, которая образовывалась на неподвижном катоде после нескольких часов непрерывной работы магнетрона.

### Экспериментальные результаты

Первая серия экспериментов была посвящена исследованию ширины области однородного нанесения покрытия протяженными магнетронами. Для них характерна меньшая скорость нанесения покрытия у концевых частей катода, причина этого исключительно геометрическая. В центральной части подложки суммируются потоки распыленных атомов с обеих сторон от точки осаждения, а крайние части напыляются только с одной стороны. Подтверждением этого является эксперимент, проведенный с магнитной системой длиной 52 см, обеспечивающей традиционно используемое [6] однородное по всей ее длине магнитное поле.

Измеренное распределение толщины покрытия по длине подложки для такой магнитной системы показано на рис. 3, кривая 1. Из графика видно, что область нанесения покрытия с однородностью  $\pm 1\%$  составляет только 20 см.

Таким образом, крайние части катода размером около 15 см используются неэффективно с точки зрения однородности нанесения покрытий.

Расширить зону однородного нанесения покрытий без увеличения размеров магнетрона можно, увеличив скорость распыления на концах катода для компенсации меньшей скорости напыления на краях подложки. Этого можно добиться увеличением магнитного поля на поворотных частях магнитной системы [2]. Однако такое локальное увеличение магнитного поля приведет к очень быстрому износу концевых частей катода. Предпочтительнее использовать сравнительно небольшое увеличение магнитного поля, но на протяженных по длине участках магнитной системы. Такая конструкция магнитной системы реализуется заменой на ее концах боковых магнитов на магниты с большей на 5–15% индукцией магнитного поля. Варьируя число таких магнитов в магнитной системе, можно менять длину  $L$  областей с увеличенным магнитным полем (см. рис. 2). Распределение толщины покрытия по длине подложки, нанесенного с использованием магнитной системы, имеющей  $L = 10$  см, показано на рис. 3, кривая 2. Область нанесения покрытия с однородностью  $\pm 1\%$  увеличилась с 20 до 30 см. Увеличение  $L$  до величины более 10 см не дает положительного эффекта, так как при этом увеличение скорости распыления происходит уже не на краях катода.

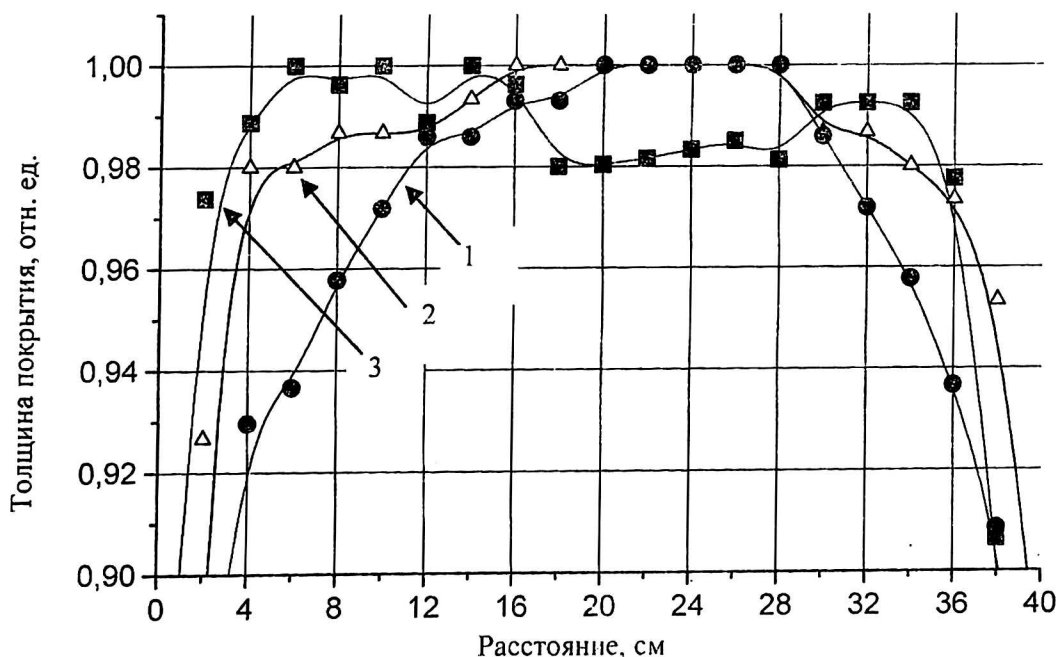


Рис. 3. Распределение толщины покрытия вдоль длины подложки:

- 1 — магнитная система с однородным магнитным полем; 2 — магнитная система с увеличенным на концах магнитным полем;
- 3 — магнитная система с увеличенным на концах магнитным полем и модифицированными поворотными частями

В следующей серии экспериментов исследовалась однородность распыления катода по его длине при разных конструкциях магнитной системы. В первом эксперименте магнитная система обеспечивала однородное по своей длине магнитное поле и имела зазор между концевым и центральным магнитами  $\Delta X = 16$  мм. Получившееся распределение измеренной площади сечения эрозионных канавок по длине катода для этого случая показано на рис. 4, кривая 1. Слева на кривой находится область с максимальной площадью сечения, которая соответствует области ускоренной эрозии над поворотной частью магнитной системы. Аналогичная область имеется на противоположном конце катода, но на рисунке она не показана.

Для выяснения причин ускоренной эрозии были проведены измерения компоненты магнитного поля  $B$ , параллельной поверхности распыляемого катода, в области поворотной части магнитной системы. Измерения проводились в направлении от краевого магнита к центральному, как показано стрелкой на рис. 2. На рис. 5, а объединены результаты измерения магнитного поля и площадей профилей эрозии в зоне ускоренной эрозии. Пунктирными линиями показаны границы зазора  $\Delta X$ . Из графиков видно, что из-за геометрических особенностей магнитной системы максимум магнитного поля смещен в сторону центрального магнита. Такое

распределение магнитного поля приводит к нахождению максимума эрозии также в непосредственной близости от края центрального магнита.

Конструкция поворотной части магнитной системы была модифицирована расширением зазора  $\Delta X$  и введением в него дополнительного магнита. Это позволило сдвинуть максимум магнитного поля и максимум эрозии к центру зазора  $\Delta X$  (см. рис. 5, б).

Однородность распыления катода по длине для магнитной системы с модифицированными поворотными частями показана на рис. 4, кривая 2. В этом случае скорость распыления на концах катода всего на 5 % превышает среднюю.

Использование модифицированной поворотной части в магнитной системе с увеличенным на концах магнитным полем ( $L = 12$  см) позволило полностью устранить ускоренную эрозию на концах катода. При такой конструкции магнитной системы скорость распыления на его концах даже меньше, чем на линейной части (см. рис. 4, кривая 3). Магнитная система с увеличенным на концах магнитным полем и модифицированными поворотными частями имеет преимущество и с точки зрения однородности нанесения покрытий. Кривая 3 на рис. 3 показывает, что область нанесения покрытий с однородностью  $\pm 1\%$  в случае использования этой магнитной системы расширяется от 20 до 33 см.

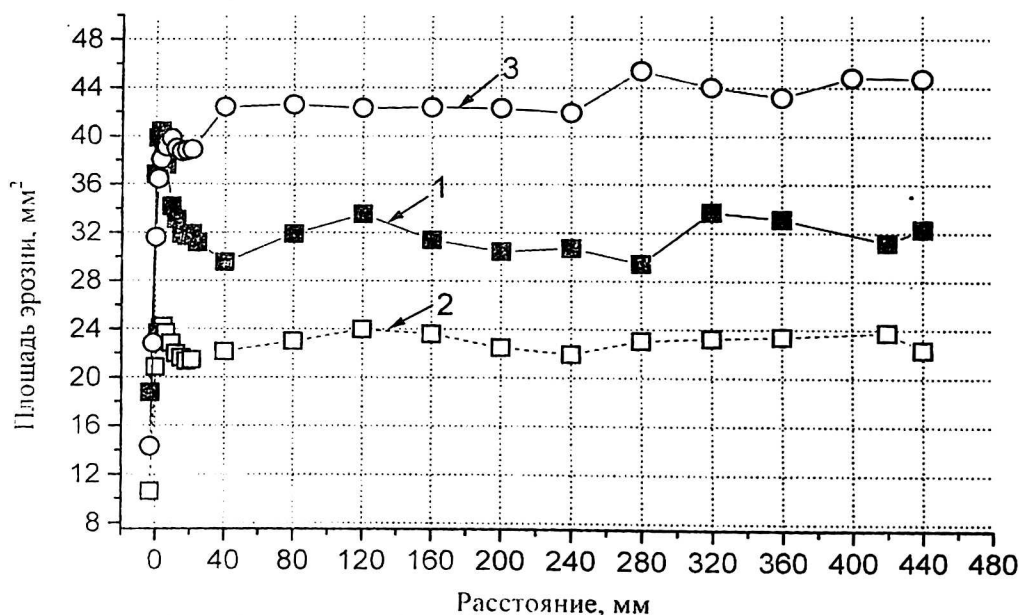


Рис. 4. Распределение площади сечения эрозионных канавок по длине катода:

1 — начальная магнитная система (с однородным магнитным полем); 2 — магнитная система с модифицированными поворотными частями; 3 — магнитная система с увеличенным на концах магнитным полем и модифицированными поворотными частями

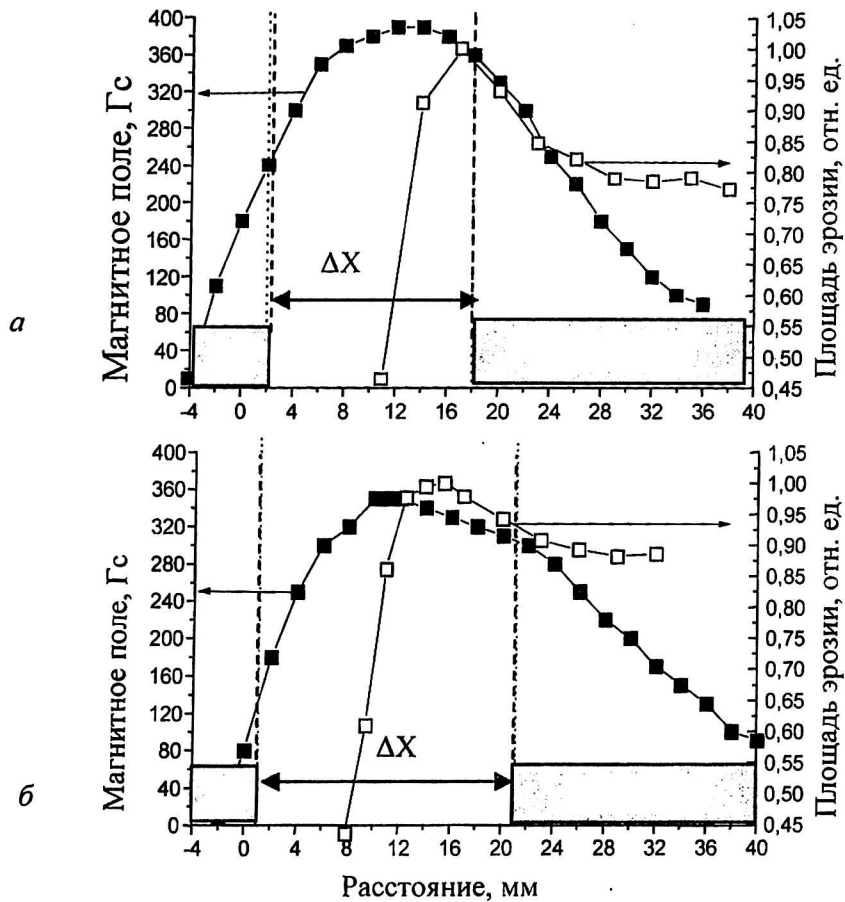


Рис. 5. Распределение магнитного поля и площади эрозии над поворотной частью магнитной системы: а — начальная конструкция; б — модифицированная конструкция поворотной части магнитной системы

**Заключение**

Экспериментально показано, что в магнетронных распылительных системах с однородным магнитным полем крайние части катода размером около 15 см не эффективно используются с точки зрения однородности нанесения покрытий.

Установлено, что использование магнитной системы с увеличенным на ее концах (на 5—15 %) магнитным полем и модифицированными поворотными частями позволило уменьшить размеры неэффективно используемых областей катода и расширить область нанесения покрытия с однородностью  $\pm 1\%$  на 13 см. Измерения площади эрозии по длине катода показали, что при этом не происходит заметного увеличения скорости эрозии на участках с увеличенным магнитным полем, а ускоренная эрозия на концах катода полностью устраняется. Внесенные в конструкцию магнитной системы изменения позволяют повысить возможности цилиндрических магне-

тронов с вращающимися катодами в достижении однородности покрытий на подложках большой площади и увеличении степени утилизации материала катода.

*Данная работа была выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках проекта CRDF TO-016-02.*

**Литература**

1. Kukla R./Surf. Coat. Technol. 1997. № 93. P. 1—6.
2. Пат. 2107971. РФ/Ананьин П. С., Кривобоков В. П., Кузьмин Ш. С., Легостаев В. Н., 1998.
3. United States Patent 6,375,814/De Bosscher W., Lievens H., 2002.
4. Patent of Canada, WO98/35070/Vanderstraeten E., Morgan S., Vanderstraeten J., Gobin, G., 1998.
5. United States Patent 5,364,518/Hartig K., Dietrich A., Szczyrbowski J., 1994.
6. Shidoji E., Nemoto M., Nomura T./J. Vac. Sci. Technol. 2000. A 18(6), P. 2858—2863.

## **Increase of efficiency of cylindrical magnetron sputtering system with a rotating cathode**

*A. N. Zakharov, A. A. Soloviev, N. S. Sochugov*

High Current Electronics Institute SD RAS, Tomsk, Russia

*The aim of the present work was increase of efficiency of cylindrical magnetron sputtering system with a rotating cathode due to extension of the area of uniform coating deposition and reduction of the rapid erosion at the end parts of the target. The design of the magnetic system with increased magnetic field at its ends and modified turn-around parts has been developed. It allows to extend the coating deposition region with the uniformity of  $\pm 1$  % by 13 cm and completely eliminate rapid erosion of the end cathode parts.*