

## ТЕХНОЛОГИИ

УДК 533.9.924+621.793.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

С.Н. МЕЛЬНИКОВ, С.П. КУНДАС, И.В. СВАДКОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 7 марта 2007*

Представлены результаты моделирования нескольких типов магнетронных распылительных систем. Методом сравнительного анализа конфигураций магнитных полей определены параметры, которые могут служить критериями степени несбалансированности.

*Ключевые слова:* магнетрон, моделирование, коэффициенты несбалансированности.

## Введение

Современные магнетронные распылительные системы характеризуются большим многообразием конструкций и характеристик. Существуют различные виды конструкций магнетронов: Circular magnetron cathodes, Rectangular magnetron cathodes, Variable magnetron cathodes, UHV circular magnetron cathode, Full face erosion magnetron cathodes, Double rectangular magnetron cathodes [1]. В магнетронных распылительных системах постоянного тока (MSS) можно выделить: MSS пониженного давления с компрессией магнитного поля, планарную MSS фланцевой конструкции, планарную MSS с протяженной прямоугольной мишенью [2]. Кроме катодных узлов с плоской планарной мишенью, используются узлы с конической мишенью, плоской фасонной мишенью, цилиндрической мишенью, подвижной магнитной системой и др. [3]. Все типы магнетронов нашли применение и используются на предприятиях и в лабораториях. Однако практическое применение современных магнетронных распылительных систем сопряжено с трудностями в воспроизводимости параметров тонкопленочных слоев из-за существующих проблем в обеспечении заданного соотношения ион/атом на поверхности конденсации. Это соотношение, в свою очередь, зависит от степени несбалансированности магнетронных распылительных систем.

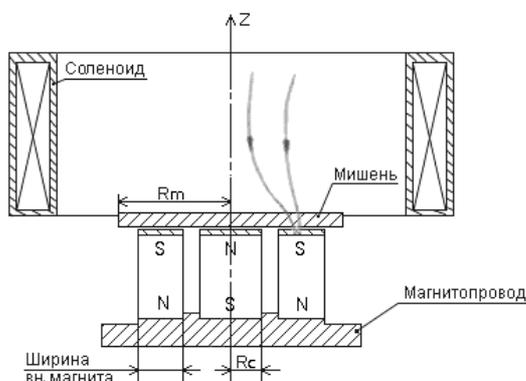


Рис. 1. Схема магнетронной системы с дополнительным соленоидом

сопряжено с трудностями в воспроизводимости параметров тонкопленочных слоев из-за существующих проблем в обеспечении заданного соотношения ион/атом на поверхности конденсации. Это соотношение, в свою очередь, зависит от степени несбалансированности магнетронных распылительных систем.

## Объект исследований и особенности его моделирования

Общий вид схемы магнетронной распылительной системы представлен на рис. 1.

В сбалансированном магнетроне плазменный разряд с высокой концентрацией частиц ограничивается областью мишени. Зона с

повышенной концентрацией электронов распространяется на расстоянии не более нескольких сантиметров от поверхности мишени. Если подложка установлена за пределами этой области, она подвергается воздействию области низкой плотности плазмы, а потока ионов, бомбардирующих подложку, чаще всего недостаточно для модификации структуры пленки [5].

В несбалансированных магнетронных распылительных системах (UBM), в отличие от сбалансированных MSS, не все линии магнитного поля замкнуты между центральным и внешним полюсами магнитной системы. UBM бывают 1-го и 2-го типа [2]. Большой интерес представляют UBM 2-го типа. В этих системах внешний полюс усилен относительно центрального полюса. В этом случае незамкнутые линии магнитного поля с периферии катода направлены к подложке. Выбитые из мишени электроны ускоряются в области темного катодного пространства и входят в область плазмы по циклоидальной траектории. Электроны циркулируют в ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электроны теряют полученную от электрического поля энергию. В UBM область распространения покинувших ловушку электронов ограничена усиленным боковым магнитным полем. Осевое магнитное поле заставляет электроны, покинувшие область разряда, двигаться по спирали вдоль силовой линии. При этом примерно в 2 раза возрастает концентрация электронов в области мишень–подложка и увеличивается электронная температура. В результате наблюдается немаксвелловское распределение электронов по энергиям с более высокой концентрацией высокоэнергетичных групп электронов [6]. Возникающее электрическое поле поляризации препятствует дальнейшему нарушению квазинейтральности. Для компенсации возникающего объемного отрицательного заряда ионы за счет амбиполярной диффузии вытягиваются из области разряда и ускоряются в направлении подложки. Использование дополнительного соленоида, установленного в промежутке мишень–подложка [2], позволяет управлять соотношением ион/атом в процессе нанесения.

В MSS практически все линии магнитного поля над поверхностью мишени замкнуты между полюсными наконечниками. В прикатодной области существует широкая область сильного магнитного поля, силовые линии которого почти параллельны распыляемой мишени. Увеличение объема боковых магнитов в UBM приводит к искривлению формы магнитной ловушки и возникновению "незамкнутых" силовых линий магнитного поля.

Отношение потока ионов к потоку осаждаемого материала является одним из основных параметров, во многих случаях определяющих структуру и свойства пленок формируемых ионно-стимулированными методами. Отношение ион/атом имеет вид [2]

$$\frac{i}{a} = \frac{j}{e\rho V}. \quad (1)$$

Отличительной особенностью несбалансированных магнетронов является наличие на оси устройства области с противоположным направлением вертикальной составляющей магнитного поля  $B_{\perp}$ . Было экспериментально определено, что расстояние от мишени до точки на оси UBM, в которой  $B_{\perp}$  изменяет направление на противоположное,  $Z_0$  (рис. 2 [1]) зависит от соотношения периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени [2].

Для количественной оценки степени несбалансированности введены [4] понятия коэффициентов несбалансированности и геометрической несбалансированности UBM, которые характеризуют конфигурацию магнитного поля и, следовательно, величину ионного тока на подложку.

Коэффициент несбалансированности  $K$  равен отношению периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени:

$$K = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}. \quad (2)$$

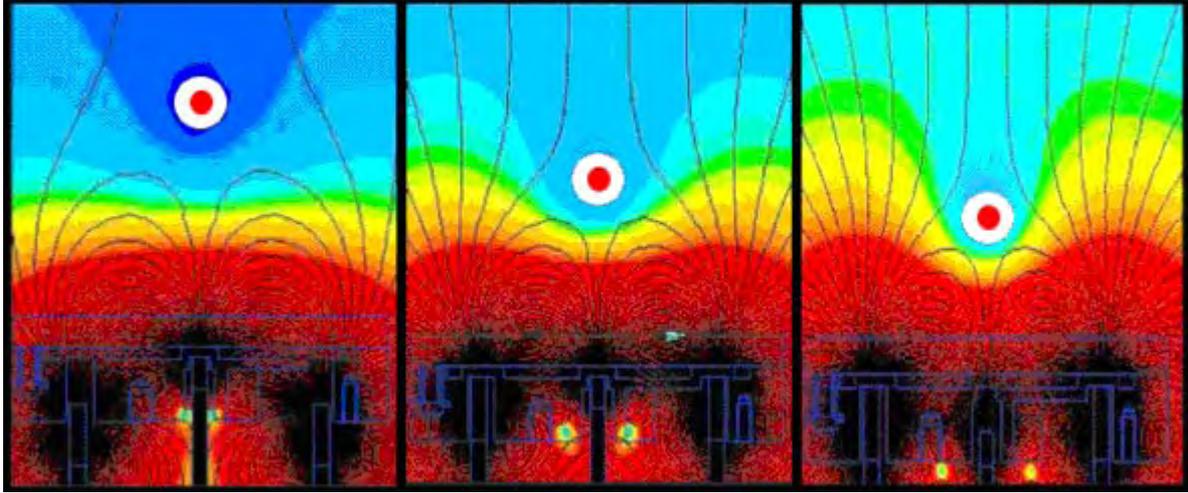


Рис. 2. Положение точки  $Z_0$  для разных конфигураций магнетронов

Для UBM [2]:

$$K = \frac{\int_{S_1} B_{\perp 1} dS}{\int_{S_2} B_{\perp 2} dS}, \quad (3)$$

где  $B_{\perp 1}$  и  $S_1$  — соответственно осевая составляющая магнитного поля на поверхности мишени и площадь поперечного сечения боковых магнитов;  $B_{\perp 2}$  и  $S_2$  — соответственно, осевая составляющая магнитного поля на поверхности мишени и площадь поперечного сечения центральных магнитов. В случае равенства магнитных потоков бокового и центрального полюсных наконечников ( $K=1$ ) практически все линии магнитного поля замыкаются над поверхностью мишени. При увеличении  $K$  магнитный поток внешнего полюса превышает центральный магнитный поток и часть магнитных линий замыкается через внешний контур магнитной системы. В случае МАС периферийный магнитный поток будет представлять собой сумму магнитных потоков полюсного наконечника и магнитного потока соленоида.

Коэффициент геометрической несбалансированности  $K_G$  рассчитывается с помощью выражения (см. рис. 1) [2]:

$$K_G = Z_0 / 2\bar{R}, \quad (4)$$

где  $\bar{R}$  — радиус средней линии зоны распыления.

Расстояние от мишени до точки на оси UBM, в которой  $B_{\perp}$  изменяет направление на противоположное, может быть определено расчетом конфигурации магнитного поля с помощью уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала  $A$  ( $\mathbf{B} = \text{rot } A$ ,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции).

Для количественной оценки степени несбалансированности введены понятия коэффициентов несбалансированности и геометрической несбалансированности UBM [4], которые количественно характеризуют конфигурацию магнитного поля и, следовательно, величину ионного тока на подложку. Кроме того, для оценки степени несбалансированности, используется величина магнитного интеграла  $A_{mag}$ , которая характеризует работу, затрачиваемую электроном, для выхода из магнитной ловушки. Чтобы найти этот параметр необходимо определить две характерные точки несбалансированного магнетрона: координаты точки на поверхности мишени, где  $E_{\perp}H$  и координаты точки  $Z_0$ . Эти точки соединяются отрезком прямой и производится интегрирование этого участка согласно выражению:

$$A_{mag} = \int \vec{B} x d\vec{x} = \sum_{i=1}^n |\vec{B}| \cdot \vec{x} \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где  $\vec{B}$  — вектор индукции магнитного поля в заданной точке.

### Результаты моделирования и их анализ

Для исследования влияния конструктивных параметров магнетронов на их выходные характеристики проведено моделирование магнетронов с помощью программы ELCUT [7]. Результаты расчета семейства силовых линий и семейства графиков вертикальной составляющей индукции магнитного поля на оси магнетрона показаны на рис. 3 и 4. Моделирование проведено исходя из использования в магнетронах самарий-кобальтовых постоянных магнитов.

Первоначально проводилось исследование влияния геометрии магнетронной системы на положение точки  $Z_0$  при отключенном соленоиде (рис. 3). Установлено, что на оси несбалансированного магнетрона имеется область с противоположным направлением магнитного поля. По полученным данным можно определить ширину внешнего магнита ( $l$ ), при которой магнетронная система переходит из несбалансированного в сбалансированный тип. Максимальное расстояние до точки  $Z_0$  наблюдается при ширине внешнего магнита 6 мм. Дальнейшее уменьшение внешнего магнита приведет к резкому удалению точки  $Z_0$  от поверхности мишени. Следовательно, вычисление показателя степени несбалансированности  $K_G$  по формуле, указанной в [2] становится нецелесообразным. При этом можно выяснить, как будет себя вести коэффициент  $K$  в момент перехода магнетрона к сбалансированному типу. Так как на практике чаще всего применяются мишени с радиусом не более 150 мм, то этот размер принят в качестве максимального. К достоинству использования для оценки несбалансированности магнетронов коэффициента  $K$  можно отнести возможность его вычисления при различных положениях магнитной системы. Однако у параметра есть ряд недостатков. Как видно из рис. 3, относительная стабильность коэффициента  $K$  наблюдается в диапазоне радиуса мишени от 40 до 75 мм.

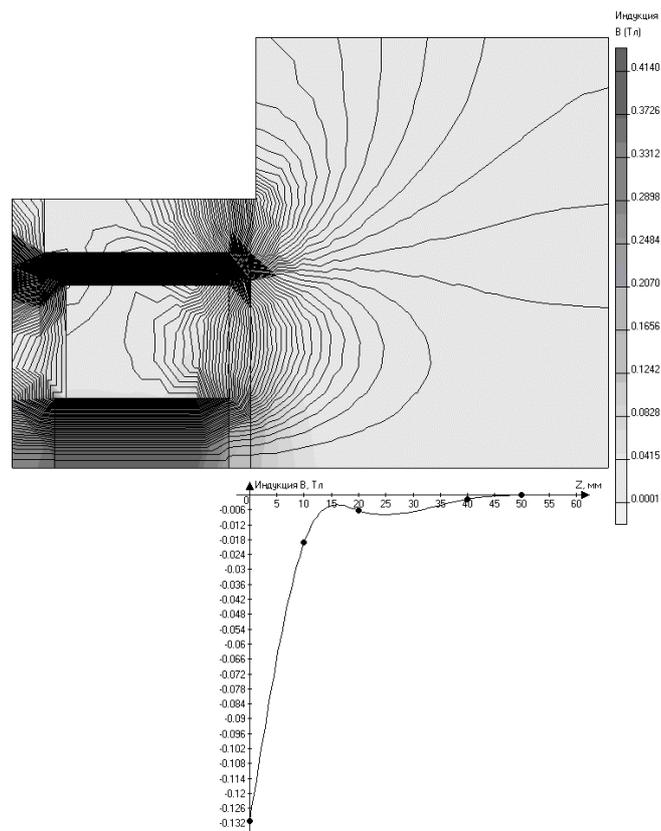


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования распределения индукции магнитного поля над поверхностью МАС и вертикальной составляющей индукции магнитного поля на оси магнетрона при радиусе центрального магнита 13 мм, радиусе мишени 40 мм, ширине внешнего магнита 6 мм



Более тщательное исследование было проведено при радиусе центрального магнита 13 мм (рис. 6). Выяснилось, что при определенном радиусе мишени, в данном случае 85 мм, происходит резкое падение коэффициента  $K$  и параллельно с ним ширины внешнего магнита.

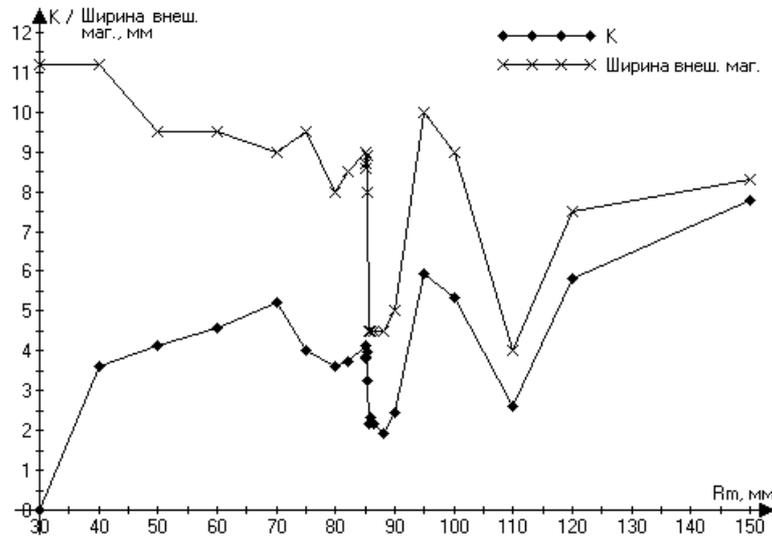


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования коэффициента  $K$  при  $K_G$ , устремляемся в бесконечность,  $R_c=13$ мм.

Дальнейшее исследование проводилось на магнетроне типа МАС, все геометрические параметры были взяты с действующей магнетронной установки. В этом случае управление распределением  $B_{\perp}$  на оси устройства достигается за счет изменения тока соленоида (рис. 7).

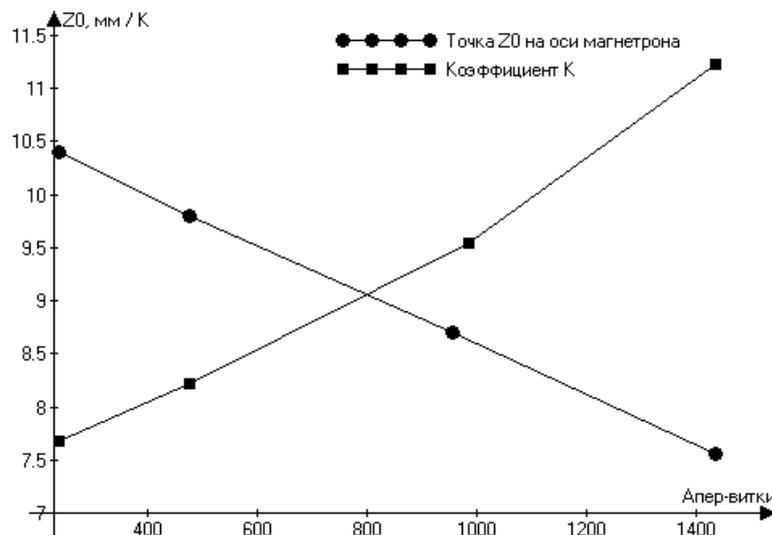


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования МАС,  $R_c=40$ мм

Воздействие дополнительного поля соленоида привело к тому, что точка  $Z_0$  находится в пределах между поверхностью мишени и высотой соленоида (рис. 8). Уменьшение подаваемого на соленоид напряжения до 5 В и моделирование при прежних параметрах геометрии показало, что магнетрон нельзя привести в состояние близкое к сбалансированному. Поэтому для магнетрона типа МАС соотношение (4) всегда выполняется.

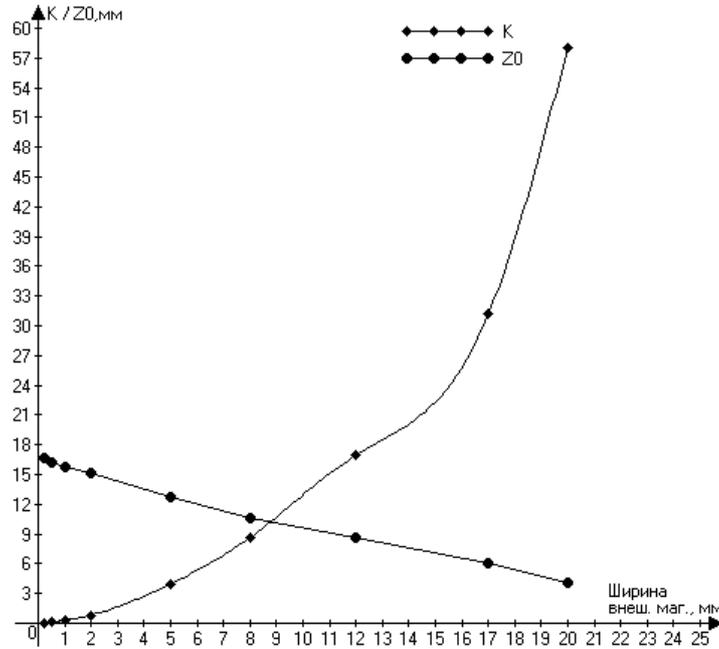


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования магнетрона типа МАС с дополнительным соленоидом (1434 ампер-витков)

На рис. 9 представлены зависимости трех основных параметров, характеризующих степень несбалансированности, от  $l$ , полученные в результате моделирования магнетронной распылительной системы с дополнительным соленоидом. Напряжение на соленоиде составляло 30 В.

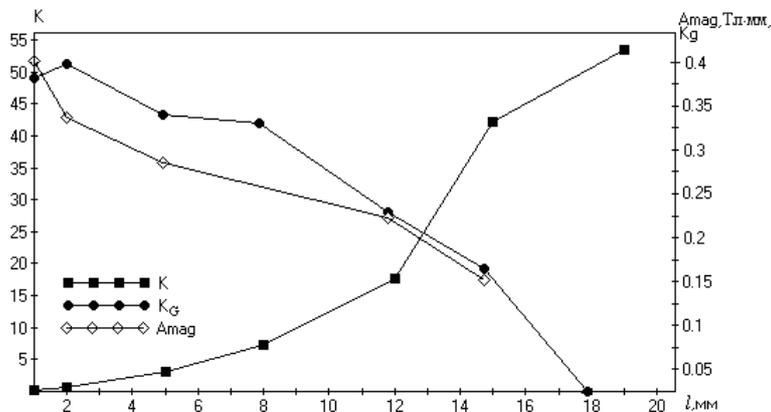


Рис. 9. Влияние изменения ширины внешнего магнита на параметры  $K$ ,  $K_G$ ,  $A_{mag}$  магнетронной системы с дополнительным соленоидом

### Заключение

На основе анализа различных конфигураций магнетронных распылительных систем установлено, что отношение ион/атом имеет связь с компоновочными характеристиками и зависит от параметров несбалансированности магнетронов и пропорционально увеличивается с ростом  $K$ . Ключевым параметром в прикатодной области УВМ является конфигурация магнитного поля. Осевая составляющая магнитного поля играет основную роль в создании эффекта несбалансированности и, как следствие, оказывает непосредственное влияние на параметры потоков заряженных частиц на подложку. Проведенный анализ результатов показывает, что параметр  $A_{mag}$  наилучшим образом характеризует степень несбалансированности магнетронной

распылительной системы, так как физический смысл магнитного интеграла в этом случае определяет энергозатраты на транспортировку электронов из разрядного слоя. Для оценки степени несбалансированности оптимальным параметром представляется величина магнитного интеграла  $A_{mag}$ .

## SIMULATION AND NUMERICAL RESEARCH PARAMETERS OF MAGNETRON SPUTTERING SYSTEMS

S.N. MELNIKOV, S.P. KUNDAS, I.V. SVADKOVSKY

### Abstract

Introduced results of simulation a few types magnetron sputtering systems. Comparative analysis configuration of the magnetic field allow to determine parameters, that can be used for criterion of unbalance degree.

### Литература

1. Gencoa Magnetron Sputtering Cathodes, Web address: <http://www.gencoa.com/>
2. Свядковский И.В., Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий: Монография / Под ред. А.П. Достанко. Минск, 2002. 242 с.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М., 1989.
4. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // Vacuum. 2002. Vol. 68, № 4. P. 283–290.
5. Musil J., Kadlec S. // Vacuum. 1990. Vol. 40, № 5. P. 435–444.
6. Sproul W.D. // Vacuum. 1998. Vol. 51, № 4. P. 641–646.
7. Руководство пользователя программы ELCUT, адрес сайта программы <http://www.tor.ru/elcut>