

7. Miika Mattinen. Atomic Layer Deposition of Crystalline MoS₂ Thin Films: New Molybdenum Precursor for Low-Temperature Film Growth. Adv. Mater. Interfaces 2017, 4, 1700123.

Модернизация магнитной системы жидкофазного магнетрона для повышения мощности разряда

*А.А. Храмова, А.Р. Матанин, Д.А. Полин, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail: annakhramova3@gmail.com*

В статье предложен метод сравнения магнитных систем магнетрона для процесса жидкофазного магнетронного распыления. Проведено компьютерное моделирование существующей и разработанной систем, а также проведен эксперимент по сравнению магнитных систем по мощности разряда. Определено, какие характеристики магнитной системы оказывают большее влияние на значение мощности разряда.

Comparison of magnet systems of the magnetron with liquid-phase target for power improvement. A.A. Khramova, A.R. Matanin, D.A. Polin, D.D. Vasiliev, K.M. Moiseev. The method of magnet systems comparison for magnetron sputtering process with liquid-phase target has been proposed. A computer simulation of the existing and proposed systems has been carried out, as well as an experiment comparing magnetic systems due to their discharge power. The characteristics of the magnetic system are determined which produce a greater effect on the value of the discharge power.

Введение

В настоящее время толсто пленочные проводящие покрытия получили широкое применение в таких областях, как ветроэнергетика, гибридная энергетика, силовая микроэлектроника, а также производство термоэлектрических модулей.

Метод магнетронного распыления является одним из наиболее распространенных для формирования проводящих покрытий в вакууме [1]. Развитием метода магнетронного распыления является формирование покрытий с помощью магнетрона с жидкой мишенью. Катодом в этом методе является расплавленный материал мишени, который находится в изолированном от системы охлаждения тугоплавком тигле (рисунок 1). При изолировании мишени от системы охлаждения магнетрона происходит ее расплавление, вследствие чего начинается активное испарение материала мишени, что увеличивает скорость осаждения частиц. Высокое давление насыщенного пара материала мишени позволяет проводить процесс ее «самораспыления» при отсутствии инертного газа, что снижает концентрацию примесей в формируемом покрытии [1, 2]. Так же к преимуществам данного метода относят практически 100% использование материала мишени и низкие энергозатраты [3].

Для того чтобы расплавить мишень в процессе жидкофазного магнетронного распыления, нужно обеспечить необходимую мощность разряда. На мощность разряда при магнетронном распылении влияют такие параметры процесса, как напряжение разряда, рабочее давление и величина магнитной индукции на поверхности мишени. При этом под мощностью разряда подразумевается результат снятой ВАХ процесса, а именно произведение напряжения разряда на ионный ток [2]. При рассмотрении параметров, влияющих на мощность разряда, напряжение разряда и рабочее давление процесса ограничены характеристиками установки, в то время как величина магнитной индукции на поверхности мишени может быть изменена за счет конструктивных особенностей магнитной системы магнетрона.

В магнитной системе магнетрона НМСА-52М производства АО «НИИТМ» (рис. 1) установлены магниты из SmCo. Одним из возможных вариантов повышения магнитной индукции на поверхности мишени является замена существующих магнитов на более сильные по магнитным свойствам магниты из NdFeB. Однако изготовление кольцевых магнитов из NdFeB нецелесообразно по экономическим соображениям, а так же этот процесс занимает большое коли-

чество времени, поэтому было предложено составить разрабатываемую магнитную систему из составных цилиндрических магнитов, а затем сравнить кольцевую и составленную из отдельных цилиндров системы с помощью компьютерного моделирования и экспериментального сравнения ВАХ.

Компьютерное моделирование кольцевой и составленной из цилиндрических магнитов магнитных систем для магнетрона НМСА-52М

Существующая магнитная система состоит из цилиндрического и кольцевого магнитов, изготовленных из материала SmCo (остаточная магнитная индукция $B_r=1,07$ Тл)(рис. 2, а). Предлагаемая магнитная система состоит из цилиндрических составных магнитов, при этом размер составных магнитов не позволяет использовать крышку для кольцевых магнитов, а конструкция используемой крышки предполагает различие высот на 3 мм между центральным (15 мм) и периферийными (12 мм) магнитами (рис. 2, б).

Центральные магниты изготовлены из материала NdFeB марки N45 (остаточная магнитная индукция $B_r=1,35$ Тл). Магниты, из которых состоит кольцо, изготовлены из материала NdFeB марки N38H (остаточная магнитная индукция $B_r=1,17$ Тл).

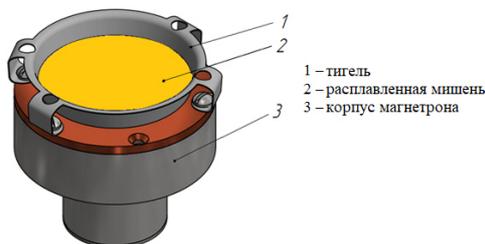


Рис. 1. Жидкофазный магнетрон НМСА-52М.

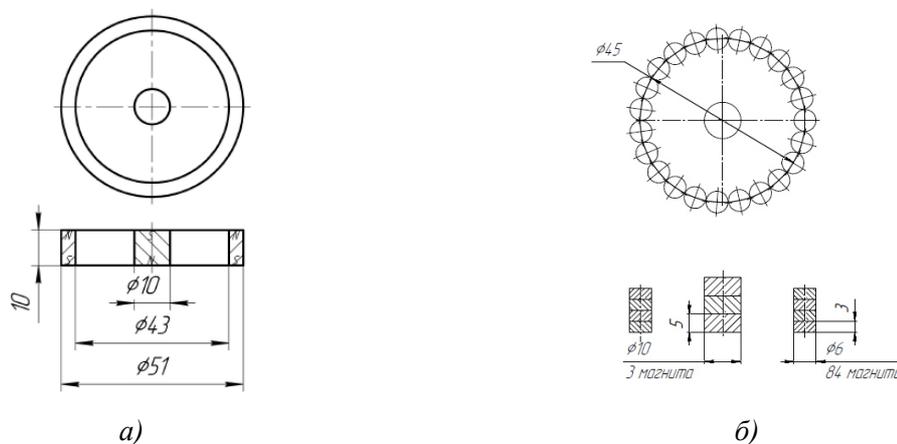


Рис. 2. Магнитные системы магнетрона НМСА-52М: а) кольцевая магнитная система из SmCo; б) составленная из цилиндров магнитная система из NdFeB.

Для сравнения магнитных систем необходимо ввести количественные показатели, характеризующие размеры области, в которой тангенциальной составляющей индукции магнитного поля достаточно для захвата электронов (области магнитной «ловушки»), и значения индукции магнитного поля для каждой из систем на расстояниях 3 мм и 5 мм от поверхности крышки магнетрона, которые обусловлены существующей толщиной медной мишени и возможностью ее утолщения. Для возможности реализации процесса жидкофазного магнетронного распыления необходимо, чтобы на поверхности мишени индукция магнитного поля была выше минимального значения, которое лежит в пределах от 30 мТл до 100 мТл [4]. Это значение также зависит от прикладываемого напряжения и давления рабочего газа. Поэтому для оценки размеров области магнитной «ловушки» можно сделать следующее приближение: область магнитной ловушки считать область, в которой значение тангенциальной составляющей индукции магнитного поля превышает 65 мТл, что обусловлено средним из диапазона значений от 30 мТл до 100 мТл.

В случае осесимметричной конструкции магнитной системы область магнитной ловушки имеет форму кольца, поэтому в качестве количественного показателя, определяющего размеры магнитной «ловушки», можно взять толщину такого кольца.

Наибольший интерес представляют значения тангенциальной составляющей индукции магнитного поля в области магнитной ловушки, так как именно в этой области в основном происходит процесс ионизации молекул рабочего газа. В качестве количественного показателя, характеризующего индукцию магнитного поля в области магнитной «ловушки», можно использовать среднее значение между экстремумом функции, соответствующим максимальному значению индукции магнитного поля, и экстремумом функции, соответствующим минимальному значению индукции магнитного поля индукции магнитного поля, в области магнитной ловушки. Результаты моделирования приведены на рис. 3 и в таблице 1.

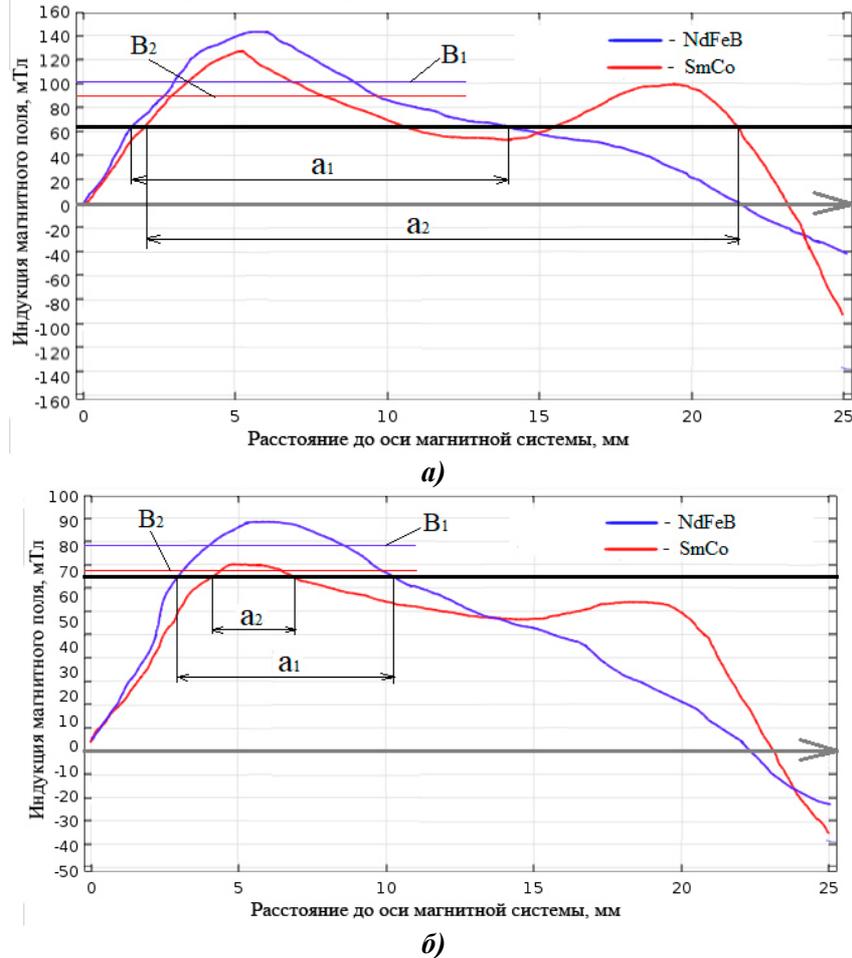


Рис. 3. Сравнение кольцевой и составленной из цилиндров магнитных систем по размеру области магнитной «ловушки» по среднему значению магнитной индукции в области магнитной «ловушки»: а) для высоты 3 мм; б) для высоты 5 мм.

Размер магнитной «ловушки» соответствует размерам a_1 и a_2 , значение индукции магнитного поля в области магнитной «ловушки» обозначены B_1 и B_2 (рис. 3).

Таблица 1 – Характеристики магнитных систем.

Магнитная система	Высота над поверхностью крышки, мм	Размер магнитной «ловушки», мм	Значение индукции магнитного поля, мТл
Составные магниты, материал NdFeB	3,0	12,10	105,0
	5,0	7,26	78,5
Кольцевые магниты, материал SmCo	3,0	18,70	92,5
	5,0	2,86	67,5

Компьютерное моделирование показало, что для высоты над поверхностью магнетрона, равной 3 мм, размер кольца магнитной «ловушки» для кольцевых магнитов из SmCo на 35% больше, чем для системы, составленной из цилиндрических магнитов из NdFeB, однако среднее значение индукции магнитного поля оказалось на 12% меньше. Для высоты над крышкой магнетрона 5 мм, размер кольца магнитной «ловушки» и среднего значения тангенциальной составляющей магнитной индукции в этой зоне для системы из NdFeB на 60,6% и 14% соответственно больше, чем для системы из SmCo (таблица 1).

Экспериментальное сравнение кольцевой и составленной из цилиндров магнитных систем магнетрона НМСА-52М

Компьютерное моделирование показало, что магнитная система, составленная из цилиндрических магнитов NdFeB, имеет большие значения магнитной индукции в зоне магнитной «ловушки». Для дальнейшего исследования разработанной системы необходимо осуществить ее сборку и провести эксперименты по сравнению мощности разряда магнитных систем: существующей кольцевой и предложенной, собранной из цилиндрических магнитов.

Для двух сравниваемых систем используются разные крышки, вследствие чего разность расстояний между магнитами и поверхностью крышки при сравнении двух конструкций крышек составила 0,7 мм. Для компенсации разности расстояний от поверхности магнитов до поверхности крышки, для системы из SmCo использовалась медная мишень толщиной 0,5 мм.

Был проведен запуск и снятие ВАХ магнетрона с установленными магнитными системами: кольцевой из SmCo с медной мишенью толщиной 0,5 мм и составленной из цилиндрических магнитов NdFeB без мишени. По результатам экспериментов были построены ВАХ разряда (рис. 4).

Сравнение ВАХ магнитных систем магнетрона НМСА-52М показало, что при различии величины расстояния между поверхностями крышек и магнитов на 0,2 мм, максимальная мощность разряда для магнетрона с магнитами NdFeB при давлении 7,0 мТорр на 12% больше, для давлений 1, 3, 5 мТорр максимальная мощность больше у магнетрона с магнитами из SmCo на 2,5%, 6,5% и 17,1% соответственно (рис. 4).

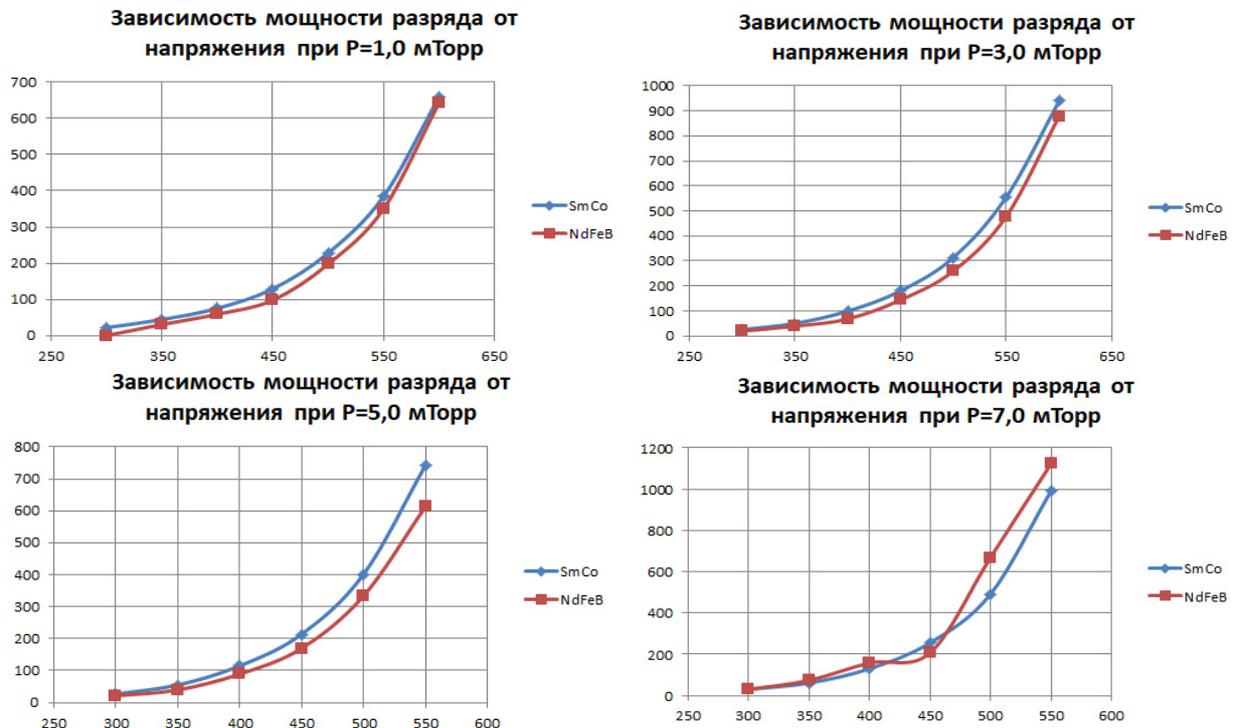


Рис. 4. Зависимость мощности разряда от напряжения для магнитных систем из SmCo и NdFeB при различных рабочих давлениях.

Заключение

В результате проделанной работы были сняты ВАХ разрядов магнетронов с двумя конфигурациями магнитных систем из SmCo и NdFeB. Значения максимальной мощности разряда для более сильных по магнитным свойствам NdFeB магнитов оказались на 2,5%, 6,5% и 17,1% ниже для давлений 1, 3, 5 мТорр соответственно. Этот факт может быть объяснен различием толщин крышек на 0,2 мм для исследуемых систем, а также использованием составных цилиндрических магнитов из NdFeB вместо кольцевого.

Таким образом, установлено, что величина остаточной магнитной индукции вносит не существенный вклад в мощность разряда. Толщина материала крышки и конфигурация магнитной системы оказывают большое влияние на мощность разряда при жидкофазном магнетронном распылении.

В дальнейшем планируется проведение работ для увеличения значений индукции магнитного поля магнетрона НМСА-52М. Одним из возможных вариантов для достижения этой цели рассматривается замена существующих магнитов из SmCo на более сильные по магнитным свойствам магниты из NdFeB в форме кольца. Так же планируется моделирование других конструкций магнитных систем для определения конструкции с наибольшей величиной магнитной индукции.

Литература

1. Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы / Б.С. Данилин [и др.] // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. – 1978. – № 2. – С. 84 – 87.
2. Магнетронный разряд с расплавленным катодом / А.В. Тумаркин [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 276 – 282.
3. Духопельников Д.В., Булычев В.С., Воробьев Е.В. Магнетронный разряд с жидкофазным катодом. – «Вакуумная техника, материалы и технология». Коллективная монография. Материалы XI Международной научно-технической конференции. Под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М.: НОВЕЛЛА. 2016 – с. 108–112.
4. Николаев М. В. Магнетронная распылительная система с жидкофазным катодом / М.В. Николаев, Д.А. Зайцев; науч. рук. А. В. Юрьева // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции, г. Томск, 22-24 апреля 2015 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – [С. 193-200].