

Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации

© А.В. Рогов,¹ Ю.В. Капустин,¹ Ю.В. Мартыненко^{1,2}

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, 123182 Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Россия

e-mail: alex-rogov@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 27 июня 2014 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента энергетической эффективности распыления K_w в планарном магнетронном распылительном устройстве на постоянном токе от мощности разряда, давления рабочего газа, величины магнитного поля, глубины эрозии катода, конструкции системы напуска газа и анода. Предложено использовать данный параметр для сравнения степени совершенства конструкции магнетронов вне зависимости от их размеров и конструктивных особенностей. Приведены результаты измерения K_w при распылении Al, Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Ta, W, Pt и Au. Разработан критерий оптимизации магнитной системы магнетрона, обеспечивающий минимальное рабочее давление и максимальную скорость распыления катода. Проведен теоретический анализ полученных данных.

Введение

Магнетронные распылительные устройства (МРУ), по сравнению с другими системами, использующими метод ионного распыления, отличаются высокой энергетической эффективностью процесса распыления (ξ). Численно этот параметр определяется как [1]

$$\xi = m_s / (j_i U_i), \quad (1)$$

где m_s — масса, распыляемая в единицу времени с единицы площади мишени; j_i — плотность ионного тока на поверхности распыляемого материала; U_i — напряжение, ускоряющее ионы. Данный параметр удобен для сравнения эффективности распылительных устройств с разными способами формирования потока распыляющих ионов. Однако его применение для анализа влияния конструктивных особенностей и эксплуатационных режимов МРУ на его эффективность затруднительно, поскольку плотность тока распыляющих ионов в разных точках зоны распыления различается на несколько порядков, а режим распыления изменяется по мере выработки катода. В настоящей работе для анализа энергетической эффективности этого типа устройств используется интегральный коэффициент энергетической эффективности K_w , равный

$$K_w = \Delta m / (tW), \quad (2)$$

где Δm — полная масса распыленного материала катода (mg), t — время распыления (min), W — средняя интегральная мощность магнетронного разряда (W). Такой выбор размерности удобен при экспериментальном измерении данного параметра. В отличие от ξ , K_w легко экспериментально измеряется и может использоваться

для исследования влияния различных факторов на эффективность распылительного устройства.

При разработке новых магнетронов возникает вопрос о влиянии таких параметров, как способ подачи рабочего газа в зону распыления и конструкция анода, на эффективность распыления. С учетом того что конструктивные особенности магнетронов являются предметом патентования и часто являются коммерческой тайной, получение исчерпывающей информации о функциональных особенностях и совершенстве заложенных технических решений для промышленных магнетронов в настоящее время затруднительно. Это создает трудности при разработке новых магнетронных устройств и при выборе конкретной модели магнетронного распылительного устройства.

В настоящей работе авторы исследуют комплекс факторов влияющих на эффективность распыления в магнетроне, работающем на постоянном токе. Представлен теоретический анализ полученных результатов. Авторы надеются, что полученные результаты будут способствовать дальнейшему развитию техники и технологии магнетронного распыления.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты проводились на вакуумной напылительной установке с безмасляной системой откачки. Все результаты получены на планарных магнетронах с дисковым катодом, магнитной системой на постоянных магнитах и в режиме постоянного тока. Далее в качестве максимальной толщины катода (или катодной вставки при косвенной системе охлаждения) принято предельное значение, при котором обеспечивается поджиг и стабильный режим магнетронного разряда при напряжении

менее 650 V и давлении аргона менее 8 mTorr. Использовались следующие магнетроны.

- Оригинальный магнетрон (минимагнетрон) с диаметром катода 25 mm, магнитной системой из SmCo магнитов (периферийный кольцевой магнит $\varnothing 25 \times \varnothing 15 \times 5$ mm, центральный цилиндрический магнит $\varnothing 10 \times 10$ mm), косвенной системой охлаждения катода, встроенным изолированным анодом и подачей газа в зону распыления. Максимальная толщина катодной вставки 2 mm;

- Тот же магнетрон с магнитной системой из NdFeB магнитов (периферийный кольцевой магнит $\varnothing 25 \times \varnothing 18 \times 5$ mm, центральный цилиндрический магнит $\varnothing 10 \times 10$ mm), максимальная толщина катодной вставки 4.5 mm;

- Коммерческий магнетрон ONIX-2 фирмы Angstrom Sciences, USA [2] диаметр катода 50 mm, косвенная система охлаждения, встроенный заземленный анод, максимальная толщина катодной вставки 9.6 mm, внешний напуск газа.

Совместно с магнетроном ONIX-2 использовался технологический источник питания (ИП) с режимом стабилизации по мощности, напряжению или току разряда GS 10/800 (Analog & Digitale Leitungselektronik, Germany) с максимальной мощностью 1 kW. Для минимагнетронов использовался ИП оригинальной конструкции с максимальной выходной мощностью 250 W и теми же режимами стабилизации. Скорость напыления измерялась кварцевым измерителем Q-rod [3].

Для определения коэффициента энергетической эффективности K_w проводилось взвешивание катода магнетронов на аналитических весах CAUW 220D. Масса распыленного материала определялась как разница начальной и конечной массы катода.

По рабочему давлению Ar и средней плотности тока распыляющих ионов на катоде, использованные в экспериментах режимы распыления соответствуют эксплуатационным режимам коммерческих распылительных устройств, широко применяемых при вакуумном напылении.

Результаты экспериментальных исследований

Зависимость K_w от мощности магнетронного разряда

Известно, что зависимость скорости распыления и соответственно скорости осаждения распыленного материала на подложку от мощности магнетронного разряда близка к линейной [4–7]. В современных источниках питания стабильность скорости напыления обеспечивается за счет режима стабилизации выходной мощности. Однако точная зависимость скорости распыления катода в магнетронном разряде на постоянном токе от его мощности и требования к точности стабилизации пока исследованы недостаточно.

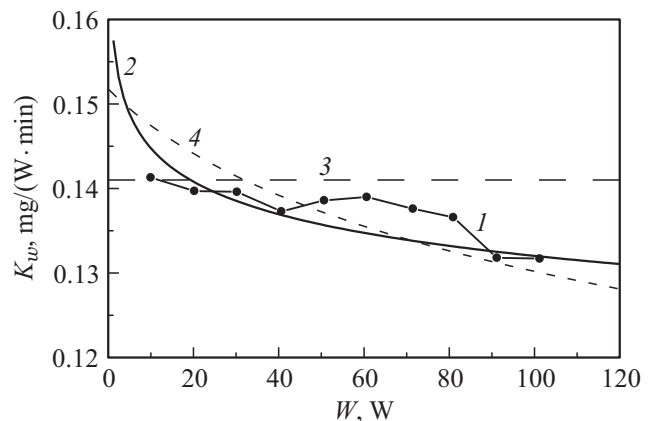


Рис. 1. Зависимость коэффициента эффективности распыления K_w медного катода от мощности магнетронного разряда при давлении $P_{Ar} = 4.5 \cdot 10^{-3}$ Torr: 1 — экспериментальная кривая; 2 — зависимость $K_w(W)$, рассчитанная по формуле (17) при $\alpha = 6.5$ и $\gamma = 0.7$; 3 — зависимость $K_w(W)$, рассчитанная по формуле (17) при $\alpha = 6.5$ и $\gamma = 1$; 4 — зависимость $K_w(W)$ при I (mA) = U (V) — 300.

Результаты измерения зависимости K_w от мощности разряда на минимагнетроне (NdFeB) методом взвешивания катода до и после распыления для Cu, а также возможные аппроксимирующие зависимости представлены на рис. 1. На том же магнетроне измерялась скорость напыления покрытия при фиксированном давлении и компонентном составе газа в вакуумной камере. Распыляемый материал — Cu и Mo. Для исключения влияния эрозии на результаты измерений использовались катоды без начальной выработки. Давление аргона $P_{Ar} = 4.5 \cdot 10^{-3}$ Torr. Кварцевый датчик измерителя скорости напыления располагался соосно с распыляемым катодом магнетрона на расстоянии 50 mm от него. Скорость напыления покрытия при фиксированном давлении и компонентном составе газа в вакуумной камере прямо пропорциональна скорости распыления катода. Таким образом, отношение скорости напыления (V_d) к мощности разряда (W) прямо пропорционально

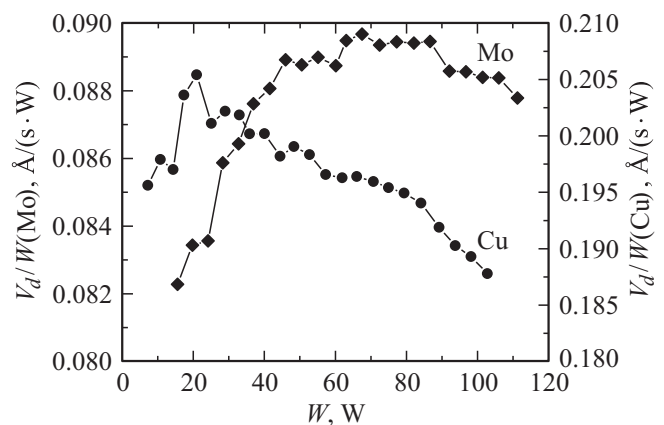


Рис. 2. Зависимость отношения скорости осаждения V_d (A/s) к мощности разряда W (W) при распылении Cu и Mo.

значению K_w . Это позволяет уточнить форму зависимости $K_w(W)$. Результаты измерений этой величины для Cu и Mo представлены на рис. 2, из которого видно, что коэффициент эффективности распыления K_w слабо зависит от мощности разряда и незначительно уменьшается в области больших значений мощности разряда как при распылении Cu, так и Mo.

Таким образом, оба метода измерений дали сходные результаты. Однако использование кварцевого измерителя позволяет существенно увеличить точность и сократить время измерений по сравнению с методом взвешивания. Отклонение K_w от среднего значения не превышает $\pm 5\%$, поэтому с точки зрения практического применения можно считать, что K_w не зависит от мощности магнетронного разряда.

Зависимость K_w от давления рабочего газа

При формировании особо чистых покрытий или при значительном удалении подложки от магнетрона необходимо производить напыление на предельно низких для используемого магнетрона давлениях рабочего газа. Известно, что влияние увеличения давления аргона при распылении аналогично увеличению напряженности магнитного поля [1]. С другой стороны, увеличение магнитного поля выше примерно 0.08 Т не дает положительного эффекта [8]. Однако уточнение влияния этих параметров на магнетронный разряд, с нашей точки зрения, представляет интерес. На рис. 3 представлены результаты измерения зависимости K_w от давления аргона для мини-магнетрона с SmCo магнитной системой при распылении Cu. Толщина катодной вставки 0.6 mm. Мощность разряда $W = 100$ W.

При давлениях от 1.8 до 4 mTorr для используемого магнетрона наблюдается рост K_w с увеличением давления P . В этом диапазоне давлений режим разряда является переходным от тлеющего к магнетронному. Первый тип разряда наблюдается при давлениях ниже порога зажигания магнетронного разряда и характеризуется слабым объемным свечением в прикатодной области магнитной ловушки и токами порядка 1 mA при максимальном напряжении источника питания. При этом распыление катода практически не наблюдается. С ростом рабочего давления степень ионизации в прикатодной области возрастает, разряд локализуется вблизи катода и соответственно увеличивается его распыление. Различие между максимальным и минимальным значением K_w составляет 17%.

В диапазоне 4–10 mTorr величину K_w можно считать постоянной (отклонение менее 3%). Этот участок соответствует магнетронному разряду. По форме зависимости K_w от P_{Ar} можно более точно установить область рабочих давлений, соответствующих истинному магнетронному разряду для используемого магнетрона.

Незначительное снижение K_w при давлении выше 7 mTorr можно объяснить влиянием обратного рассеяния и обратной диффузии распыленного материала на распыляемый катод магнетрона.

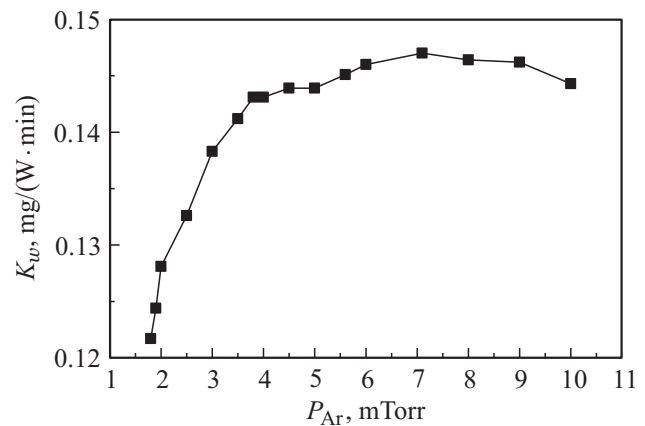


Рис. 3. Зависимость K_w от давления Ar.

Таким образом, влияние P_{Ar} на K_w необходимо учитывать при давлениях близких к минимальному рабочему давлению магнетрона.

Влияние конструкции системы напуска газа на эффективность распыления

Проведено исследование влияния способа напуска газа на эффективность распыления. В использованном магнетроне с изолированным анодом газ подавался непосредственно в зону распыления через кольцевой зазор между анодом и распыляемым катодом. Контрольный эксперимент проводился при напуске рабочего газа в вакуумную камеру на расстоянии примерно 350 mm от магнетрона. Давление аргона в области магнетронного разряда в этих двух случаях существенно отличается. Для проверки этого предположения при подаче газа на удалении от магнетрона подбиралось рабочее давление, обеспечивающее совпадение ВАХ с полученной при напуске газа в прикатодной области. Эксперимент проводился на мини-магнетроне с SmCo магнитной системой. Распыляемый материал — Cu. Результаты представлены на рис. 4.

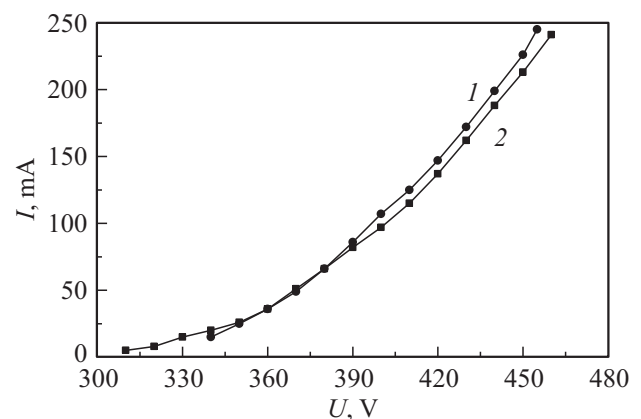


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика разряда: 1 — газо-напуск через магнетрон, $P_{Ar} = 5$ mTorr; 2 — внешний напуск газа, $P_{Ar} = 7$ mTorr.

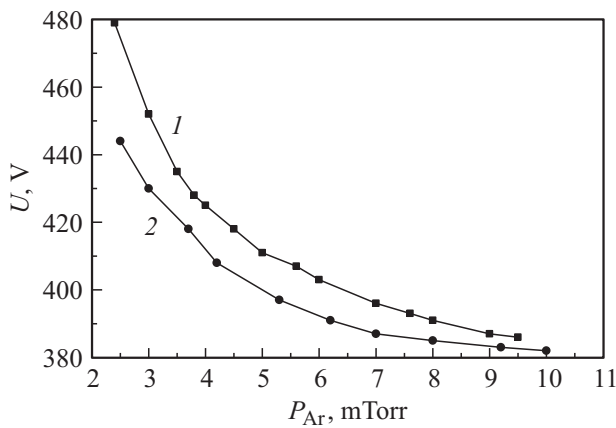


Рис. 5. Зависимость напряжения разряда от давления при фиксированном токе разряда: 1 — внешний напуск газа, 2 — напуск газа через магнетрон.

По результатам измерения ВАХ при разных давлениях построена зависимость напряжения разряда от давления при фиксированном токе разряда ($I = 100 \text{ mA}$) для обоих способов газонапуска. Данная зависимость представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, для использованного магнетрона совпадение ВАХ наблюдалось при повышении давления в $K_g = 1.3$ раза во всем диапазоне рабочих давлений. Поскольку этот параметр зависит только от конструктивных особенностей системы газонапуска, его можно назвать коэффициентом газовой эффективности. Он также может быть использован для оценки технического совершенства системы газонапуска при сравнении разных магнетронных напылительных устройств. Поскольку в области минимальных рабочих давлений (рис. 3) энергетическая эффективность распыления довольно сильно зависит от давления, то этот параметр важен при работе распылительной системы в области пониженных давлений. Таким образом, газонапуск непосредственно в зону напыления существенно улучшает эффективность магнетронного распылительного устройства и улучшает условия транспортировки распыленного материала от магнетрона к подложке, что существенно влияет на качество покрытия. Применительно к использованному магнетрону (рис. 3), за счет встроенной системы газонапуска в области минимальных давлений рабочего газа увеличение K_w может достигать примерно 7%.

Зависимость K_w от толщины катода

Измерение зависимости K_w от толщины катода проводилось на магнетроне ONIX-2 и минимагнетроне при распылении Cu. Толщина катодов была выбрана близкой к максимальной для данных магнетронов и равнялась 9 и 4.5 mm соответственно. Мощность разряда составляла соответственно 600 и 100 W. Распыление проводилось в режиме стабилизации мощности разряда. Рабочее давление $\sim 4 \text{ mTorr}$. Длительность одного цикла распыления в обоих случаях была одинаковой и составила $T = 30 \text{ min}$.

После каждого распыления с катода со стороны зоны эрозии на токарном станке удалялся слой толщиной материала больше максимальной глубины эрозии, так что следующий эксперимент проводился на плоском катоде без выработки. Полученные зависимости K_w от толщины катода h представлены на рис. 6.

Для обоих магнетронов наблюдается уменьшение K_w в области толщины катода, близкой к максимальному значению. Различие между максимальным и минимальным значением K_w для минимагнетрона и магнетрона ONIX-2 составляет 13 и 10% соответственно.

Зависимость K_w от величины магнитного поля на поверхности катода

Для определения зависимости K_w от величины магнитного поля можно воспользоваться полученными ранее зависимостями этого параметра от толщины катода (рис. 6). Зависимость величины магнитного поля на поверхности катода от его толщины измерялась экспериментально с помощью магнитометра ТПУ-02. Изменялось максимальное значение магнитного поля $|B|$ на

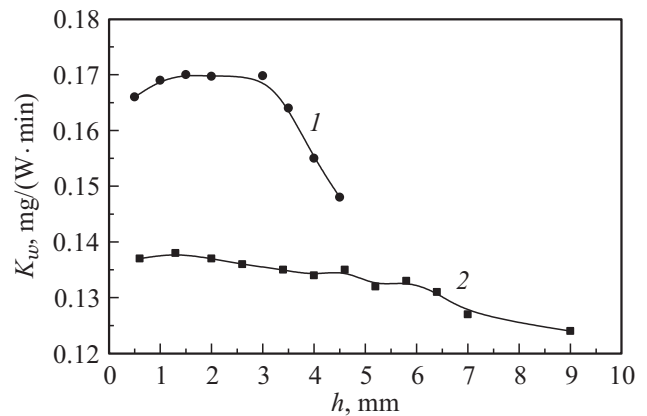


Рис. 6. Зависимость K_w от толщины Cu-катода h : 1 — минимагнетрон, 2 — ONIX-2.

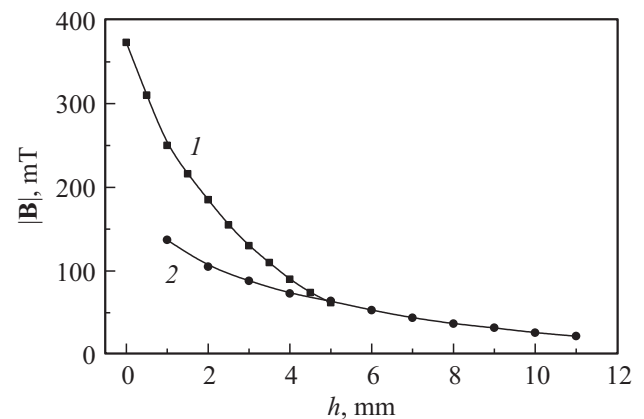


Рис. 7. Зависимость максимального значения магнитного поля $|B|$ от толщины катода: 1 — минимагнетрон (NdFeB), 2 — магнетрон ONIX-2.

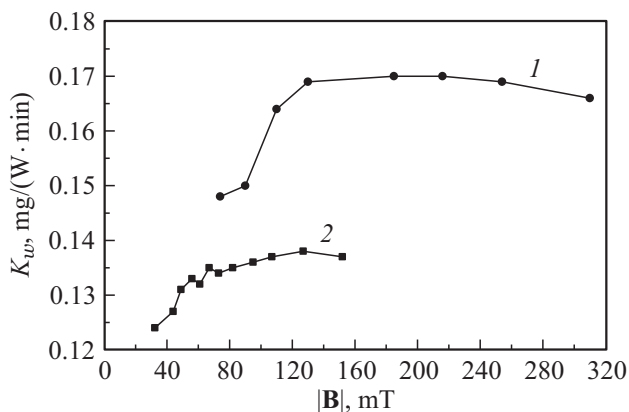


Рис. 8. Зависимость K_w от максимальной величины магнитного поля $|B|$ на поверхности катода: 1 — минимagnetрон, 2 — магнетрон ONIX-2.

поверхности катода в зависимости от его толщины h . Результаты измерений представлены на рис. 7.

На основании данных, приведенных на рис. 6, 7, для обоих магнетронов построена зависимость K_w от $|B|$. Она показана на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что K_w увеличивается при возрастании максимального значения магнитного поля до $|B| \approx 140$ мТ (на 14 и 10% соответственно). В диапазоне 140–240 мТ этот параметр стабилизируется. При дальнейшем росте магнитного поля наблюдается плавное уменьшение K_w .

Зависимость K_w от глубины эрозии катода

Результаты исследования зависимости K_w от глубины эрозии катода при распылении Си для минимagnetрона и магнетрона ONIX-2 представлены соответственно на рис. 9.

Возрастание эффективности распыления при малой глубине эрозии обусловлено увеличением площади катода, которая подвергается ионной бомбардировке, и росту магнитного поля по мере увеличения глубины эрозии.

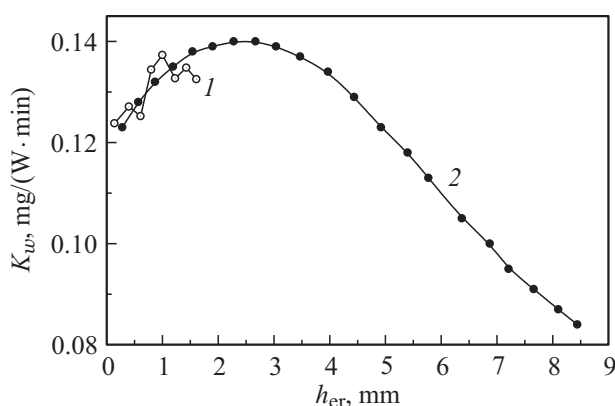


Рис. 9. Зависимость эффективности распыления K_w от глубины эрозии катода h_{er} : 1 — минимagnetрон, 2 — ONIX-2.

При этом углубление в катоде, вызванное распылением, заполняется плазмой (можно считать, что толщина темнового прикатодного пространства не изменяется). Ионы, выходящие из эмиссионной границы плазмы, бомбардируют катод по нормали к его поверхности. По мере увеличения глубины эрозии все большая часть распыленного материала переосаждается на противоположные стенки углубления. Этим объясняется снижение эффективности распыления при большой глубине зоны эрозии. Поскольку угловое распределение распыленных атомов зависит от состава и структуры распыляемого материала [9], положение экстремума также будет зависеть от этих параметров.

Для использованных минимagnetрона и магнетрона ONIX-2 изменение K_w по мере выработки катода составило 10 и 40% соответственно.

Отношение максимальной глубины эрозии катода (h_{er}) к ее среднему диаметру (D_k) для использованных магнетронов было примерно одинаковым и равнялось $h_{er}/D_k \approx 0.18$. По нашему мнению, основное влияние в этом случае оказывает абсолютное значение глубины эрозии катода и конструкция магнитной системы.

Влияние конструкции и формы анода на эффективность распыления

Эксперименты проводились на минимagnetроне с SmCo магнитной системой. Исследовалась зависимость ВАХ от диаметра отверстия в кольцевом аноде, расположенном с минимальным зазором над поверхностью распыляемого катода соосно с ним. Материалом катода являлась медь. Давление аргона $P_{Ar} = 4$ мТорр. Результаты измерений представлены на рис. 10, из которого видно, что для использованного магнетрона есть оптимальный диаметр отверстия в аноде, равный 22 мм. Для несбалансированных магнитных систем, как в нашем случае, оптимальный диаметр отверстия в аноде равен диаметру зоны, ограниченной в плоскости анодного электрода максимально удаленной от катода магнитной силовой линией, дважды пересекающей его поверхность.

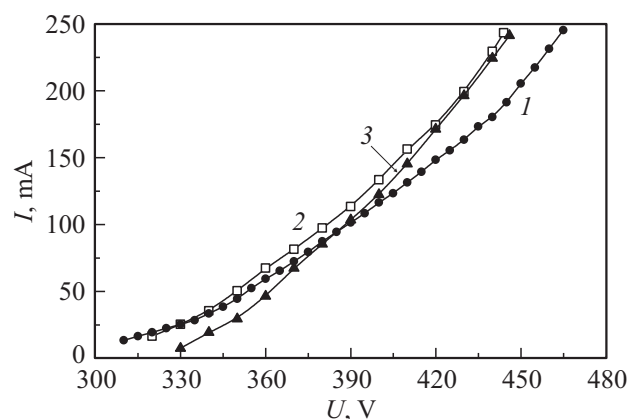


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика разряда при разных диаметрах отверстия в кольцевом аноде: 1 — 20, 2 — 22, 3 — 24 мм.

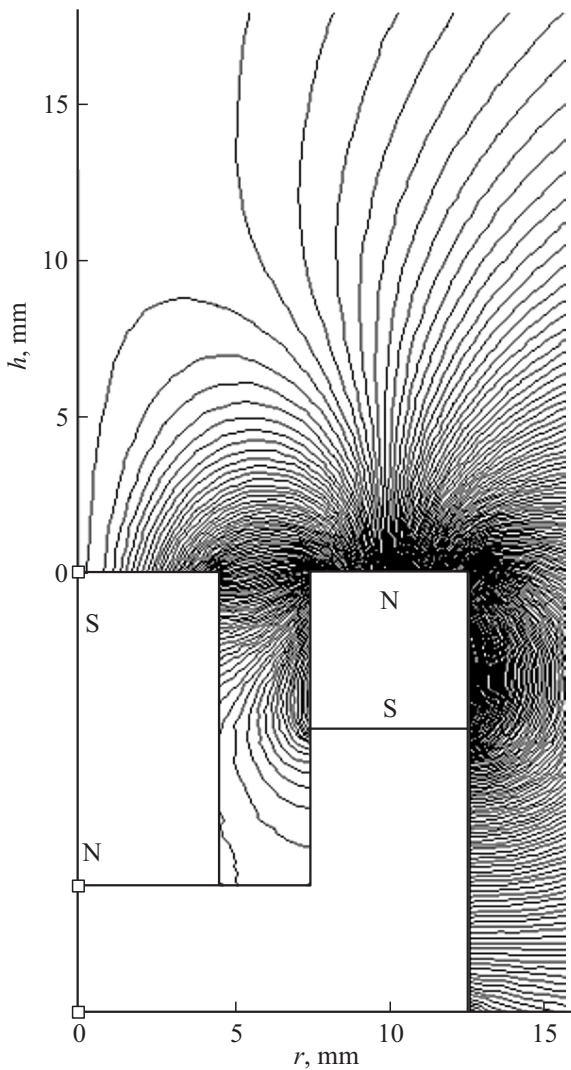


Рис. 11. Магнитная система и распределение магнитного поля в минимагнетроне (NdFeB).

Эта же магнитная силовая линия ограничивает область магнитной ловушки магнетронного разряда. Распределение магнитного поля рассчитывалось при помощи программы FEMM 4.2. Результаты расчета представлены на рис. 11.

Как видно из распределения магнитного поля, оптимальное значение диаметра анодной диафрагмы зависит от толщины катода (расстояния его поверхности от магнитной системы). Расчетное значение оптимального диаметра отверстия в аноде на высоте 3 mm (толщина катодной вставки 2 mm) равна примерно 20 mm, что близко к значению оптимального диаметра анода (22 mm), полученному в эксперименте. Такая геометрия анодного электрода обеспечивает отсечку электронов, уходящих из зоны магнитной ловушки за счет дрейфа поперек магнитного поля. При этом снижается тепловая нагрузка на подложку при напылении, что обеспечивает улучшение качества покрытий. Уменьшение диаметра отверстия относительно оптимального приводит к уху-

ду электронов из магнитной ловушки на анод вдоль магнитных силовых линий, что ухудшает параметры магнетронного разряда.

Зависимость K_w от распыляемого материала

Коэффициент распыления при облучении поверхности металла ионами сильно зависит от состава распыляемого материала и энергии падающих ионов. Для оценки средней энергии распыляющих ионов в магнетронном разряде использовался экспериментально измеренный спектр распыляющих ионов в магнетроне, полученный при распылении Ti катода ионами аргона на постоянном токе [10], представленный на рис. 12.

Спектр нормирован

$$\int_0^U P(E)dE = 1. \tag{3}$$

Средняя энергия бомбардирующих катод ионов равна

$$E_{av} = \int_0^U EP(E)dE. \tag{4}$$

При использовании зависимости, представленной на рис. 12, расчет дает значение

$$E_{av} \approx 0.6U. \tag{5}$$

Полученный коэффициент пропорциональности между средней энергией ионов и напряжением разряда далее использовался для расчета средней энергии распыляющих ионов применительно ко всем исследуемым материалам.

В таблице приведены значения K_w , полученные для 15 элементов при анализе технологических экспериментов в течение последних нескольких лет. Распыление проводилось при разной начальной толщине и эрозии катодов, поэтому эти данные носят качественный характер. Для каждого элемента с помощью программы

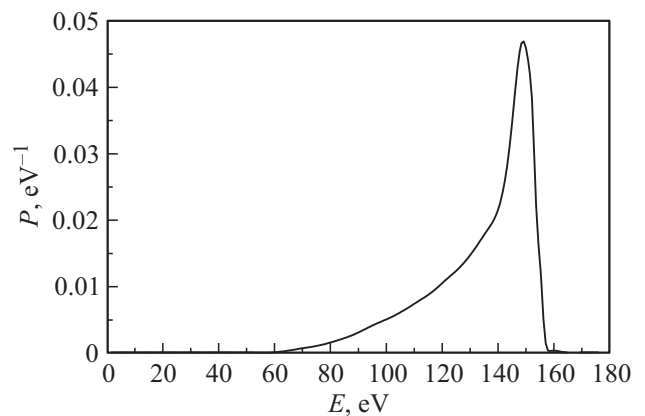


Рис. 12. Энергетический спектр ионов Ag при распылении Ti-катада. Напряжение разряда $U = 225$ V.

Экспериментально измеренные значения K_w для разных металлов

Элемент	Al	Ti	Cr	Cu	Zn	Zr	Nb	Mo	Ag	In	Sn	Ta	W	Pt	Au
K_w , mg/(W min)	0.024	0.029	0.065	0.13	0.33	0.058	0.054	0.083	0.33	0.19	0.20	0.11	0.12	0.27	0.41
U_p , V	412	370	407	310	539	361	373	325	430	384	367	366	415	400	455
E_{av} , eV	243	218	240	183	318	213	220	192	254	226	217	216	245	236	269
Y_{Ar} , at/ion	0.49	0.35	0.87	1.17	3.80	0.42	0.46	0.58	1.74	1.23	0.91	0.57	0.68	1.09	1.67
TRIM															
M , amu	27.0	47.9	52.0	63.6	65.4	91.2	92.9	95.4	108	115	119	181	184	195	197
$A \cdot 10^3$	1.81	1.73	1.44	1.74	1.33	1.51	1.26	1.50	1.76	1.34	1.85	1.07	1.04	1.27	1.25

Примечание. U_p — среднее напряжение магнетронного разряда за время распыления, E_{av} — средняя энергия распыляющих ионов, Y — коэффициент распыления, M — относительная атомная масса элемента.

TRIM-98 рассчитывался коэффициент распыления Y_{Ar} при средней энергии ионов аргона. В таблице также приведены значения параметра

$$A = K_w / (MY_{Ar}),$$

где M — атомная масса исследуемого элемента, Y_{Ar} — коэффициент распыления.

Все измерения проводились на минимагнетроне с диаметром катода 25 mm и SmCo магнитной системой при давлении $P_{Ar} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Из представленных данных видно, что величина A для всех исследованных материалов с достаточной для практического применения точностью является величиной постоянной. Среднее значение этого параметра равно $(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$. Погрешность в определении величины A может быть уменьшена, если провести все измерения при одинаковой толщине и выработке катода. Это позволяет использовать параметр A для расчета энергетической эффективности распыления K_w применительно к разным материалам катода, экспериментально измерив его значение для используемого магнетрона на одном из них.

Анализ полученных результатов

Полученные результаты можно объяснить на основе характерных для магнетрона вольт-амперных характеристик. На рис. 13 представлена данная характеристика, снятая на минимагнетроне.

Для магнетрона часто [4] используют степенную аппроксимацию ВАХ в виде

$$I \sim U^\alpha, \quad (6)$$

где $\alpha \sim 5-7$. Для использованного магнетрона с оптимальным диаметром анода

$$I(\text{mA}) = (U(V)/185)^{6.3}. \quad (6')$$

Как показали наши измерения, ВАХ в области собственно магнетронного разряда хорошо аппроксимируется линейной зависимостью

$$I = k(U - \Delta U), \quad (7)$$

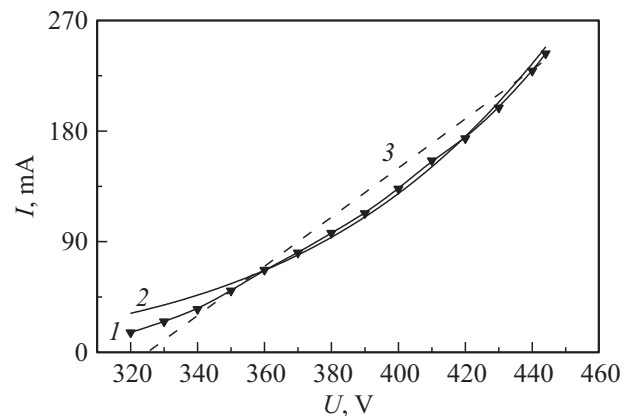


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики минимагнетрона при оптимальном диаметре отверстия в аноде: 1 — экспериментальная ВАХ, 2 — расчет по формуле (6'), 3 — расчет по формуле (7).

где $\Delta U = 330 \pm 30$ В, а $k \approx 0.5-3.5$ mA/V. Причем ΔU слабо зависит от величины магнитного поля, а k убывает с ростом магнитного поля. Наличие минимального напряжения ΔU , при котором возникает магнетронный разряд, можно связать с минимальным скачком катодного напряжения U_k ($U_k \approx 0.7U$, U — разрядное напряжение), при котором скорость дрейфа электронов достаточна для начала ионизации рабочего газа. Действительно, скорость дрейфа равна

$$V_D = E/B = U_k/(dB), \quad (8)$$

где $E = U_k/d$ — напряженность электрического поля на участке катодного падения шириной d . Отсюда получаем минимальное напряжение $U_{k,\min}$, необходимое для ионизации

$$\Delta U = U_{k,\min}/0.7 = 2(I/m_e)^{1/2}/(Bd), \quad (9)$$

где I — потенциал ионизации рабочего газа (для аргона $I = 15.7$ eV). При $B = 0.1$ Т и $d = 1.5$ mm $\Delta U \approx 300$ eV. Согласно [11], ширина слоя катодного падения d определяется ларморовским радиусом электрона $\rho = (2m_e U/e)^{1/2}/B$ (m_e и e — масса и заряд электрона соответственно) и длиной пробега электронов по отношению к ионизации атомов рабочего газа

$\lambda = 1/(n\sigma)$ (n — концентрация атомов рабочего газа, σ — сечение ионизации атомов рабочего газа электронным ударом)

$$\begin{aligned} 1/d &= 1/\rho + 1/\lambda, \\ d &= \rho/(1 + \rho/\lambda). \end{aligned} \quad (10)$$

Отсюда при $\rho/\lambda \ll 1$ получим

$$\Delta U = (8I/m_e B)(1 - 8n\sigma(I/e)^{1/2} B^{3/2}). \quad (11)$$

Из этого выражения видно, что ΔU убывает с ростом магнитного поля B и концентрации рабочего газа n , что соответствует измеренным ВАХ. Для использованного в экспериментах магнетрона $I(\text{mA}) = 2(U(\text{V}) - 325)$ (рис. 13).

Скорость распыления катода dm/dt в магнетроне равна произведению тока ионов I на катод, на коэффициент распыления катода ионами $Y(E_{\text{cf}})$, умноженному на массу атомов материала катода M :

$$dm/dt = IY(E_{\text{cf}})M. \quad (12)$$

В магнетронах ток I на катод сильно зависит от разрядного напряжения U . Если пользоваться простой аппроксимацией (6), то мощность разряда

$$\begin{aligned} W &\propto JU = k_1 U^{1+\alpha}, \\ J &= k_2 W^{\alpha/(1+\alpha)}, \end{aligned} \quad (13)$$

а напряжение разряда

$$U \propto W^{1/(1+\alpha)}. \quad (14)$$

Коэффициент распыления в области энергий 200–500 eV

$$Y \propto (E_{\text{cf}})^\gamma \propto (U)^\gamma \propto (W)^{\gamma/(1+\alpha)}, \quad (15)$$

где $\gamma \approx 1/2$. Скорость распыления катода dm/dt зависит от мощности разряда как

$$dm/dt \propto W^{(\alpha+\gamma)/(\alpha+1)}, \quad (16)$$

а коэффициент эффективности распыления

$$K_w = (dm/dt)/W \propto W^{(\gamma-1)/(1+\alpha)}. \quad (17)$$

В силу слабой зависимости напряжения от мощности зависимость K_w от W также очень слабая.

Коэффициент A также является слабой функцией мощности

$$A \propto W^{-1/(1+\alpha)}. \quad (18)$$

Для исследованной нами меди зависимость коэффициента распыления ионами аргона от энергии представлена на рис. 14 [12]. Там же даны аппроксимации: $Y = 3.75E$ при $E < 200$ eV и $Y = 2.4E^{0.7}$ при $E > 200$ eV.

Для использованного магнетрона при $\alpha = 6.5$ и $\gamma = 0.7$ коэффициент $K_w \sim W^{-0.04}$. Для малых энергий ионов, когда $\gamma = 1$ и $dh/dt \propto P$, $K_w = \text{const}$. Это хорошо

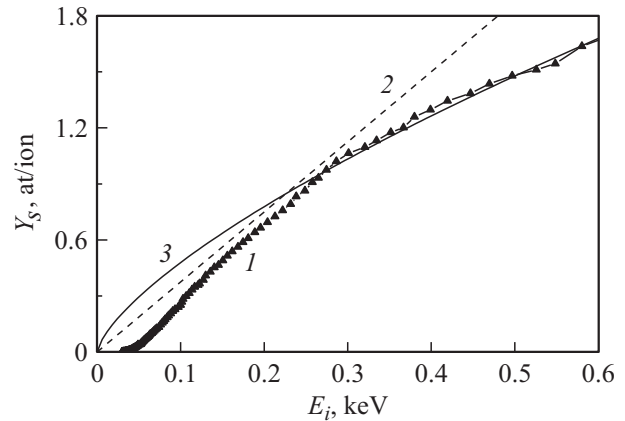


Рис. 14. Зависимость коэффициента распыления Cu от энергии падающих ионов: 1 — данные [12], 2 — аппроксимация $Y = 3.75E$, 3 — $Y = 2.4E^{0.7}$.

согласуется с экспериментальной зависимостью (рис. 1). При этом коэффициент $A \propto W^{-0.13}$.

Таким образом, зависимость скорости эрозии катода магнетрона от мощности разряда близка к линейной в силу сильной зависимости тока от напряжения разряда, а коэффициент K_w практически не зависит от мощности разряда.

Если использовать для ВАХ аппроксимацию (7), то при $W \ll 2k\Delta U^2$, напряжение разряда можно представить следующей функцией мощности разряда W :

$$U \approx \Delta U + W/(2k\Delta U), \quad (19)$$

а коэффициент эффективности распыления в магнетроне

$$K_w \propto \Delta U^{\gamma-1} [1 - (1-\gamma)W/(2k\Delta U^2)]. \quad (20)$$

Таким образом, при $W < [2/(1-\gamma)]k\Delta U^2$ зависимость $K_w(U)$ — слабо убывающая функция. Причем это убывание тем слабее, чем больше k и ΔU .

При $\Delta U \approx 325$ V и $k \approx (0.5-3.5) \cdot 10^{-3}$ A/V

$$[2/(1-\gamma)]k\Delta U^2 \approx 100 \text{ W}. \quad (21)$$

Как видно из рис. 1, выражение (20) также хорошо аппроксимирует зависимость K_w от мощности разряда W . В нашем случае при мощности разряда $W < 100$ W эффективность распыления K_w можно считать постоянной.

Заключение

Исследования эффективности магнетронного распыления K_w показали, что этот параметр удобен для проведения экспериментальных исследований влияния различных факторов на эффективность распыления в магнетронных распылительных устройствах и практически не зависит от мощности магнетронного разряда (отклонение от среднего значения менее $\pm 5\%$).

Наибольшее влияние на энергетическую эффективность распыления (до 40%) может оказывать изменение

глубины эрозии катода в процессе его эксплуатации. Эта зависимость имеет ярко выраженный максимум и определяется конструкцией магнитной системы магнетрона. Особенно сильно это проявляется при оптимизации магнитной системы магнетрона по критерию обеспечения максимальной толщины катода.

Вторым по значимости фактором является давление аргона в ходе распыления (до 17%). Особенно сильно это проявляется при работе в области минимальных для используемого магнетрона давлений.

Величина магнитного поля также сильно влияет на энергетическую эффективность распыления. В диапазоне значений $240 \text{ mT} \geq |\mathbf{B}| \geq 140 \text{ mT}$ K_w практически не изменяется. При меньшем магнитном поле наблюдается резкое уменьшение этого параметра. При больших магнитных полях он также уменьшается, но более плавно.

Толщина катода также влияет на величину K_w (до 10%). Это связано с тем, что в зависимости от данного параметра при одной и той же магнитной системе на поверхности катода разная величина магнитного поля и конфигурация магнитной ловушки. Следует отметить, что при использовании кольцевого изолированного анода от этого параметра также зависит оптимальный диаметр проходного отверстия в аноде, обеспечивающий максимальную эффективность распыления.

Существенное влияние также оказывает конструкция системы напуска газа. Так, при подаче рабочего газа непосредственно в зону магнитной ловушки, по сравнению с внешним напуском газа, выигрыш в энергетической эффективности составляет до 7%.

Расстояние между анодом и катодом при использовании кольцевого изолированного анода с проходным отверстием оптимального диаметра практически не влияет на K_w .

Представленные данные по измерению значений K_w для разных металлов могут быть использованы для практических оценок эффективности распыления применительно к любому магнетронному распылительному устройству. Для этого достаточно измерить значение этого параметра для одного из приведенных в таблице материалов. Коэффициент пропорциональности, равный отношению измеренного и приведенного в таблице значения, учитывающий конструктивные различия магнетронов, можно использовать для других материалов, представленных в таблице.

Параметр $A = K_w / (MY)$ (M — атомная масса элемента, Y — коэффициент распыления рабочим газом при энергии $0.6U_p$) практически не зависит от режима распыления и материала катода. Таким образом, применительно к используемому магнетрону, он может быть использован для расчета энергетической эффективности распыления K_w любого материала катода, если измерить его значение для одного из материалов.

С теоретической точки зрения, именно сильная зависимость тока от напряжения в магнетронном разряде обеспечивает зависимость скорости эрозии катода от

мощности разряда близкую к линейной, а коэффициент эффективности распыления K_w делает практически не зависящим от мощности разряда.

При использовании катода без начальной выработки величина K_w зависит только от распыляемого материала и эффективности удержания электронов в магнитной ловушке, т.е. степени ее совершенства. Его значение определяется конструкционными особенностями магнетрона, не зависит от размеров распыляемого катода и легко измеряется. Таким образом, этот параметр можно использовать для сравнения магнетронов с учетом требуемых эксплуатационных условий при выборе наилучшего.

Список литературы

- [1] Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 328 с.
- [2] www.angstromsciences.com
- [3] www.inficon.com
- [4] Капустин Ю.В., Смирнов Б.М., Хунпер Р. // УФН. 2007. Т. 177. Вып. 5. С. 473–510.
- [5] Jin-Hyo Booa, Min Jae Jungb, Heon Kyu Parkb, Kyung Hoon Namb, Jeon G. Han // Surf. Coat. Tech. 2004. Vol. 188–189. P. 721–727.
- [6] Posadowski W.M. // Thin Solid Films. 2001. Vol. 392. P. 201–207;
- [7] Li Gou, Changsong Qi, Junguo Ran, Changqiong Zheng // Thin Solid Films. 1999. Vol. 345. P. 42–44.
- [8] Goree J., Sheridan T.E. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59. N 9. P. 1052–1054.
- [9] Мартыненко Ю.В., Рогов А.В., Шульга В.И. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 13–18;
- [10] Czekaj D., Hollman E.K., Volpias V.A., Zaytsev A.G., Chernakova A., Goranchev B. // Bulg. J. Phys. 1991. Vol. 18. P. 63–67;
- [11] Барченко В.Т., Быстров Ю.А., Колгин Е.А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб: Энергоатомиздат, 2001. 332 с.
- [12] Eckstein W., Garcia-Rosales C., Roth J., Ottenberger W., Sputtering Data // Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, IPP 9/82, February, 1993.