

04

## Вакуумный (безгазовый) магнетронный разряд с многокомпонентным катодом-мишенью

© М.В. Шандриков, Е.М. Окс, А.А. Черкасов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: shandrikov@hcei.ru

Поступило в Редакцию 27 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 27 февраля 2026 г.

Принято к публикации 24 марта 2026 г.

Показано, что перечень материалов для катода-мишени, обеспечивающих устойчивое функционирование планарной магнетронной распылительной системы в вакуумном (безгазовом) режиме без термического испарения или сублимации материала катода, может быть существенно расширен за счет использования многокомпонентных мишеней, в состав которых входят металлы как с относительно высоким (Cu, Zn, Pb и др.), так и с относительно низким (Al, Ti и др.) коэффициентом распыления, для которых вакуумный режим не реализуется.

**Ключевые слова:** магнетронная распылительная система, самораспыление, вакуумный (безгазовый) режим, многокомпонентные мишени.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.12.62983.20662

Магнетронное распыление является одним из наиболее распространенных методов осаждения тонких металлических покрытий. Типичный диапазон рабочего давления в процессе магнетронного осаждения составляет  $(1-10) \cdot 10^{-3}$  Торр. В отличие от традиционных процессов магнетронного распыления в атмосфере рабочего газа вакуумный (безгазовый) магнетрон функционирует при предельном остаточном давлении без напуска газа и поддерживается за счет режима самораспыления [1]. В условиях интенсивного охлаждения поверхность катода-мишени в области рейстрека магнетрона остается относительно холодной (ниже 300 °C) [2], так что основным механизмом поставки атомов металла в зону ионизации является процесс ионного распыления, а не сублимация или термическое испарение, свойственные магнетронам с жидкофазной мишенью [3].

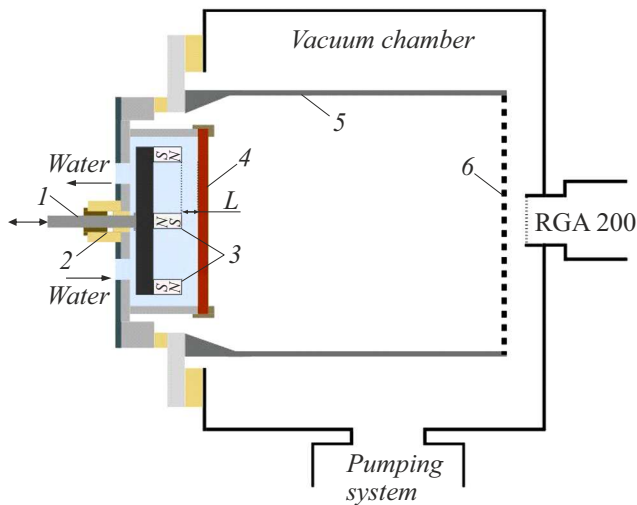
Ранее безгазовый режим магнетронного разряда был реализован в непрерывной форме только на чистых металлах (Cu, Ag, Pb), обладающих относительно высоким коэффициентом распыления  $S_{\text{sputt}}$  (больше 2 atom/ion при  $E_i = 600$  eV) [4,5]. Относительно низкие значения напряжения магнетронного разряда (300–600 V) и соответственно невысокие значения  $S_{\text{sputt}}$  существенно сужают круг потенциальных материалов катода-мишени из чистых металлов для вакуумного режима магнетрона. Альтернативным направлением для вакуумного магнетрона может стать применение многокомпонентных распыляемых мишеней, в состав которых входят металлы с различным  $S_{\text{sputt}}$ . Проведенные ранее исследования показали, что пороговые параметры перехода магнетронного разряда в вакуумный режим на таких мишенях могут быть даже ниже, чем на чистых медных мишенях [5]. Многокомпонентные мишени сегодня уже широко применяются в магнетронном осаждении в „обычном“ газо-

вом режиме (например, сухие смазки или датчики глюкозы [6,7]). Большие перспективы имеет использование так называемых высокоэнтропийных сплавов [8]. В ряде случаев такие составы (сплавы) имеют высокую долю металлов, обладающих относительно высоким  $S_{\text{sputt}}$ , которые потенциально могут обеспечить поддержание вакуумного режима магнетрона [9]. Использование широкого класса многокомпонентных мишеней открывает новые перспективы применения вакуумного режима магнетрона и баллистического процесса осаждения в технологиях нанесения проводящих покрытий.

Цель настоящей работы состоит в реализации вакуумного режима магнетрона на многокомпонентных мишенях, содержащих в составе металлы с различным  $S_{\text{sputt}}$  (от 0.5 до 3 atom/ion при  $E_i = 600$  eV), и определении влияния доли этих металлов на параметры разряда.

В работе использовалась разработанная нами ранее [10] планарная магнетронная распылительная система (рис. 1). Корпус магнетрона был выполнен из нержавеющей стали. В качестве катода-мишени 4 использовались как чистые металлы (Cu, Al, Ni), так и многокомпонентные: композиционные (латунь, бронза) и мозаичные (Cu–Al, Cu–Ti). Диаметр мишени составлял 100 mm. Арочное магнитное поле в области рейстрека обеспечивалось набором NdFeB-магнитов 3 размером  $10 \times 10 \times 10$  mm. Количество магнитов варьировалось для изменения конфигурации и регулирования величины магнитного поля в области рейстрека. Используемая разрядная система была оснащена возможностью аксиального смещения магнитной системы относительно мишени магнетрона, задающего расстояние  $L$  от торца магнитной системы до тыльной стороны мишени.

Для эффективного отвода тепла использовалось прямое охлаждение мишени с расходом воды не ме-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — держатель, 2 — уплотнение Вильсона, 3 — магнитная система, 4 — мишень (катод) магнетрона, 5 — экспандер (анод магнетрона), 6 — сетка.

нее 22 l/min. При этом температура поверхности мишени составляла порядка 250–300 °С. Первоначальное инициирование магнетронного разряда осуществлялось при давлении рабочего газа (аргона) на уровне  $1 \cdot 10^{-3}$  Торг и напряжении между электродами порядка 800–900 В. Для электрического питания магнетронного разряда использовался специализированный блок APPL-M-20DC-1000SS (ООО „Прикладная электроника“, Россия). После зажигания разряда ток магнетрона устанавливался на уровне 10 А и напуск аргона в камеру прекращался. При этом давление в вакуумной камере снижалось до величины порядка  $2 \cdot 10^{-5}$  Торг. Откачка вакуумной камеры производилась с помощью турбомолекулярного насоса ТМН-500. Измерение рабочего давления происходило в непосредственной близости от магнетронной разрядной системы. При функционировании магнетронного разряда в вакуумном режиме давление не превышало  $5 \cdot 10^{-5}$  Торг. Анализ масс-зарядового состава ионов плазмы магнетронного разряда производился на расстоянии 20 см от мишени магнетрона с помощью квадрупольного масс-спектрометра на основе модифицированного анализатора остаточных газов RGA-200 (SRS), методика измерения которым подробно представлена ранее [11].

Ключевым условием реализации безгазового режима самораспыления в магнетронном разряде является выполнение полуэмпирического выражения [12]:

$$S_{\text{sputt}} \alpha \beta > 1, \quad (1)$$

где  $S_{\text{sputt}}$  — коэффициент распыления мишени,  $\alpha$  — вероятность ионизации распыленного атома металла,  $\beta$  — вероятность возврата образованного иона металла на катод.

С учетом того, что при типичных значениях напряжения магнетронного разряда уровня 500–600 В для медной мишени  $S_{\text{sputt}}$  составляет порядка 2.3 atom/ion [13], требуемые значения вероятности ионизации атома меди и возврата образованного иона обратно на катод должны составлять не менее 0.7. В свою очередь для алюминия в указанном диапазоне энергий ионов  $S_{\text{sputt}}$  в среднем не превышает 1.2 atom/ion, в связи с чем требуемые значения  $\alpha$  и  $\beta$  должны быть не менее 0.95, что трудно реализуемо в магнетронном разряде с плоской мишенью с учетом малой массы и высокой скорости пролета атомом алюминия зоны ионизации. Для титана при  $S_{\text{sputt}}$  порядка 0.6 atom/ion значения  $\alpha$  и  $\beta$  должны быть не менее 1.3, что физически невыполнимо.

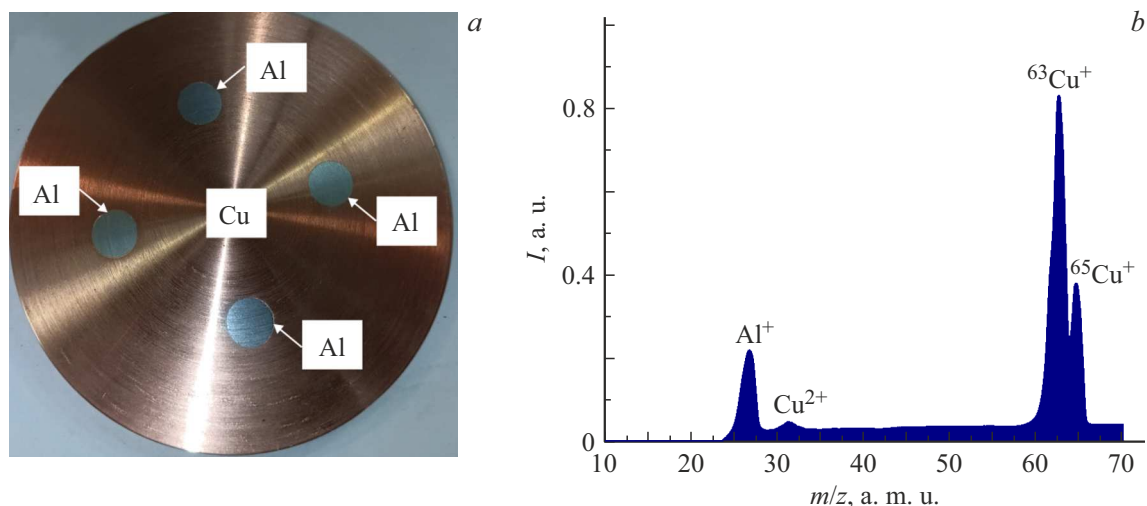
Использование в вакуумном режиме многокомпонентных мишеней, в составе которых присутствуют металлы как с низким, так и с высоким  $S_{\text{sputt}}$ , позволяет создать условия, в которых металл с высоким  $S_{\text{sputt}}$  (например, Cu или Zn) берет на себя функцию самоподдержания разряда и выступает своего рода „донором“ для входящих в состав мишени металлов с низким  $S_{\text{sputt}}$  (например, Al или Ti).

При использовании многокомпонентной мишени, состоящей из нескольких элементов (A, B и т.д.), результирующий коэффициент распыления мишени  $S_{\Sigma}$  может быть оценен с помощью выражения

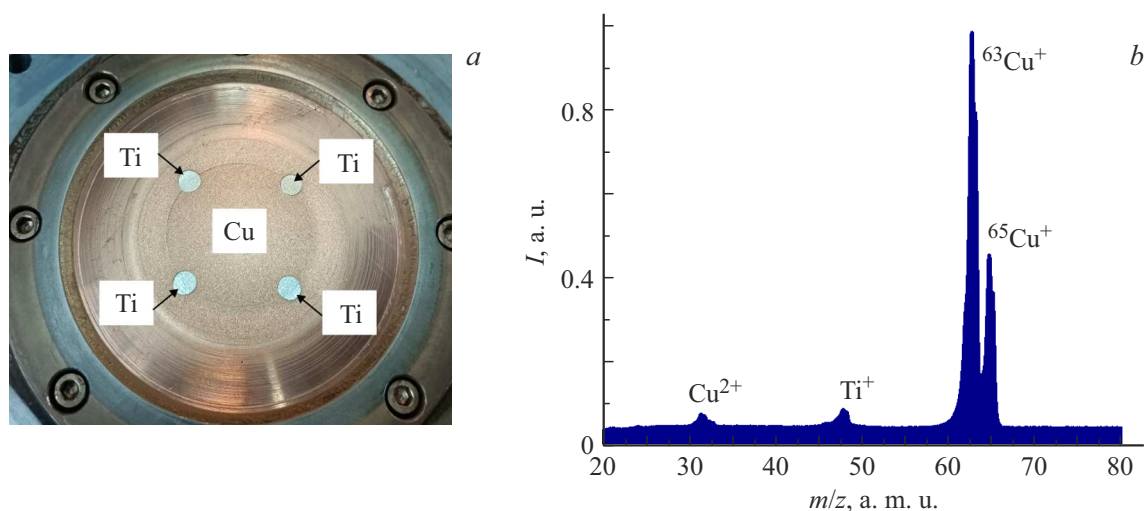
$$S_{\Sigma} = S_{\text{sputt}}^A \omega_A + S_{\text{sputt}}^B \omega_B + \dots, \quad (2)$$

где  $S_{\text{sputt}}^A$  и  $S_{\text{sputt}}^B$  — коэффициенты распыления элементов A и B;  $\omega_A$  и  $\omega_B$  — доли элементов A и B в составе мишени соответственно, причем  $\omega_A + \omega_B + \dots = 1$ .

Для экспериментального исследования предложенного подхода в качестве модельного материала были изготовлены мозаичные мишени, в которых цилиндрические вставки диаметром 5–10 мм и толщиной 2–3 мм из металлов с низким  $S_{\text{sputt}}$  (алюминий и титан) запрессовывались в медной мишени толщиной 5 мм вдоль рейстрека (рис. 2, а и 3, а). Плотная запрессовка вставок обеспечивала хороший их электрический и тепловой контакт. Доля металла с низким  $S_{\text{sputt}}$  в разряде регулировалась как диаметром вставок, так и их количеством вдоль рейстрека. Визуальные наблюдения показали, что свечение плазмы по длине рейстрека было менее ярким в области расположения вставок алюминия и титана, что, по-видимому, можно объяснить меньшей концентрацией атомов металла в данных областях. Тем не менее магнетронный разряд с алюминиевыми и титановыми вставками демонстрировал устойчивое функционирование в вакуумном режиме в течение продолжительного времени. Исследования показали, что долевой состав ионов металла в плазме магнетрона, функционирующего в вакуумном режиме на мозаичных мишенях Cu–Al и Cu–Ti, приблизительно соответствует отношению площадей каждого металла в зоне рейстрека с учетом различия их  $S_{\text{sputt}}$  (рис. 2, б и 3, б). В экспериментах с двукратным увеличением количества вставок алюминия



**Рис. 2.** Фотография мозаичной медной мишени с алюминиевыми вставками (а) и масс-зарядовый состав ионов (b) в непрерывном вакуумном магнетронном разряде. Ток магнетрона 10 А.



**Рис. 3.** Фотография мозаичной медной мишени с титановыми вставками (а) и масс-зарядовый состав ионов (b) в непрерывном вакуумном магнетронном разряде. Ток магнетрона 10 А.

доля ионов алюминия в плазме увеличивалась практически в 2 раза.

Предложенный подход также был исследован применительно к многокомпонентным мишеням в виде готовых сплавов (композиционных составов) на примере латуни и бронзы. В таблице представлены данные по составу чистых и многокомпонентных мишеней, а также по влиянию входящих в состав мишени металлов с высоким  $S_{\text{sputt}}$  на результирующий коэффициент распыления многокомпонентной мишени и пороговые параметры вакуумного режима магнетрона. Анализ экспериментальных данных показывает, что присутствие в составе мишени (например, латуни или бронзы) металлов с высоким  $S_{\text{sputt}}$  („донора“), например Zn или Pb, приводит к увеличению результирующего  $S_{\text{sputt}}$  мишени с 2.4 atom/ion для чистой медной мишени до 2.7 и

2.5 atom/ion для латунной и бронзовой мишеней соответственно. Это обеспечивает практически двукратное снижение порогового тока вакуумного режима магнетрона для латунной и бронзовой мишеней (4.8 и 4.3 А соответственно) по сравнению с пороговым током чистой медной мишени (7–8 А).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что возможности и процессы осаждения проводящих покрытий в вакуумном (безгазовом) режиме магнетронной распылительной системы могут быть существенно расширены в результате использования многокомпонентных катодов-мишеней, в состав которых входят металлы как с относительно высоким, так и с относительно низким коэффициентом распыления. Ключевым условием в этом случае является присутствие в составе мишени металла-„донора“ с высоким коэф-

Состав материалов мишеней и параметры вакуумного магнетронного разряда

Материал мишени	Элементный состав мишени, %	$S_{\text{sputt}}$ , atom/ion ( $E_i = 600 \text{ eV}$ ) [14]	$S_{\Sigma}$ , atom/ion	Напряжение разряда, V (при 10 A)	Пороговый ток, A
Медь	Cu: 99.9	Cu: 2.4–2.5	–	600–650	7–8
Никель	Ni: 99.9	Ni: 1.7–1.8	–	700–720	17
Алюминий	Al: 99.9	Al: 1.1–1.2	–	Не реализуется	Не реализуется
Латунь	Cu: 60 Zn: 40	Cu: 2.4–2.5 Zn: 3.0–3.2	2.7	580–640	4.8
Бронза	Cu: 85 Zn: 5 Sn: 5 Pb: 5	Cu: 2.4–2.5 Zn: 3.0–3.1 Sn: 2.5–2.7 Pb: 2.5– 2.8	2.5	580–640	4.3
Cu–Ti	Cu: 90 Ti: 10	Cu: 2.4–2.5 Ti: 0.6–0.7	2.3	615–630	8.5
Cu–Al	Cu: 80 Al: 20	Cu: 2.4–2.5 Al: 1.1–1.2	2.1	630–646	9

фициентом распыления в количестве, достаточном для обеспечения устойчивого функционирования вакуумного режима магнетрона.

### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научно-го фонда (проект 24-19-00031).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] W. Posadowski, Surf. Coat. Technol., **49** (1-3), 290 (1991). DOI: 10.1016/0257-8972(91)90071-4
- [2] M.V. Shandrikov, M.I. Azhgikhin, E.M. Oks, A.A. Cherkasov, Russ. Phys. J., **68** (6), 933 (2025). DOI: 10.1007/s11182-025-03512-1
- [3] A.V. Tumarkin, A.V. Kaziev, M.M. Kharkov, D.V. Kolodko, I.V. Ilychev, V.G. Khodachenko, Surf. Coat. Technol., **293**, 42 (2016). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.070
- [4] W.M. Posadowski, Vacuum, **46** (8-10), 1017 (1995). DOI: 10.1016/0042-207X(95)00096-8
- [5] S. Kadlec, J. Musil, Vacuum, **47** (3), 307 (1996). DOI: 10.1016/0042-207X(96)80013-3
- [6] M. Cao, L. Zhao, L. Wu, W. Wang, Coatings, **8** (4), 134 (2018). DOI: 10.3390/coatings8040134
- [7] Y. Yin, T. Zhang, L. Feng, J. Ran, C. Ma, Y. Tan, B. Yang, RSC Adv., **13** (21), 14641 (2023). DOI: 10.1039/D3RA02076B
- [8] D.B. Miracle, O.N. Senkov, Acta Mater., **122**, 448 (2017). DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081
- [9] M. Sadeghi, B. Niroumand, Intermetallics, **151**, 107658 (2022). DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107658
- [10] M.B. Шандриков, Е.М. Окс, В.О. Оскирко, А.А. Черкасов, Письма в ЖТФ, **49** (22), 19 (2023). DOI: 10.61011/PJTf.2023.22.56594.19716 [M.V. Shandrikov, E.M. Oks, V.O. Oskirko, A.A. Cherkasov, Tech. Phys. Lett., **49** (11), 55 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.11.57201.19716].
- [11] M.V. Shandrikov, A.A. Cherkasov, E.M. Oks, A.V. Vizir, AIP Adv., **12** (2), 025017 (2022). DOI: 10.1063/5.0081234
- [12] A. Anders, J. Andersson, in *2008 23rd Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum* (IEEE, 2008), p. 561–566. DOI: 10.1109/DEIV.2008.4676856
- [13] W.H. Hayward, A.R. Wolter, J. Appl. Phys., **40** (7), 2911 (1969). DOI: 10.1063/1.1658100
- [14] *Sputtering by particle bombardment: experiments and computer calculations from threshold to MeV energies*, ed. by R. Behrisch, W. Eckstein (Springer, Berlin–Heidelberg, 2007), p. 110.