

УДК 537.525
EDN: THAGKS

PACS: 52.80.Hc

Процессы осаждения покрытий в газовом и вакуумном режимах работы планарной магнетронной распылительной системы

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

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Томск, 634055 Россия*** E-mail: cherkasov.a@hcei.ru**Статья поступила в редакцию 11.03.2026; после редактирования 24.03.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 1.3.5*

Представлены результаты сравнительного исследования процесса осаждения покрытий в газовом и вакуумном режимах функционирования планарной магнетронной распылительной системы. В качестве модельного материала распыляемого катода-мишени использовалась медь. Показано, что в вакуумном режиме обеспечиваются более высокие скорости осаждения покрытий, улучшаются их адгезионные свойства и снижается шероховатость.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, самораспыление, плазма, вакуумный (безгазовый) режим, магнетронный разряд.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-40-45

Введение

С момента своего появления в середине 1970-х годов [1] планарные магнетронные распылительные системы (МРС) активно развиваются и совершенствуются. Это развитие обусловлено постоянно растущими требованиями к качеству покрытий и производительности оборудования. Снижение рабочего давления магнетронных распылительных систем является одним из основных направлений исследований, поскольку позволяет уменьшить количество транспортных потерь распылённых атомов и тем самым увеличить энергетическую эффективность процесса осаждения, а также повысить энергетическое воздействие на подложку в процессе осаждения покрытия. Предельным случаем снижения рабочего давления является вакуумный или безгазовый режим МРС, при котором магнетронный разряд поддерживается в т. н. режиме самораспыления [2]. В отличие от известных безгазовых МРС с жидкофазным катодом [3, 4] в вакуумном магнетроне температура распы-

ляемого катода мишени оказывается намного ниже пороговых значений температуры испарения или сублимации материала катода [5]. От магнетронов с термическим испарением вакуумный режим МРС с «холодной» мишенью выгодно отличается более высокими значениями направленной энергии распыленных атомов (более 10 эВ против 0,1 эВ) [6], а также повышенной степенью ионизации атомов распыляемой мишени. При этом скорость осаждения покрытий в вакуумном режиме МРС сопоставима с вакуумно-дуговым методом, но вместе с тем не требует фильтрации генерируемого потока от микрокапельной фракции.

Проведенные нами ранее исследования [6] были ориентированы преимущественно на сравнение параметров магнетронного разряда и разрядной плазмы в газовом и вакуумном режимах функционирования. Целью данной работы являлось сравнение процессов осаждения и ряда параметров покрытий в этих режимах при фиксированном значении тока разряда.

Методика и техника эксперимента

Магнетрон с катодом-мишенью прямого водяного охлаждения [6] располагался на вакуумной камере длиной 60 см и диаметром 40 см (рис. 1). В качестве модельного материала катода-мишени магнетрона использовалась медь. Диаметр мишени 2 составлял 100 мм. Анод 3 магнетрона соединялся с заземленными стенками вакуумной камеры. Арочное магнитное поле магнетрона обеспечивалось набором NdFeB магнитов 1. Корпус магнетрона и вакуумная камера были выполнены из нержавеющей немагнитной стали. Откачка вакуумной камеры до остаточного давления уровня 2×10^{-5} Торр осуществлялась турбомолекулярным насосом производительностью 500 л/с. Для электрического питания магнетронного разряда использовался специализированный блок питания APEL-M-20DC-1000SS (ООО «Прикладная электроника»).

В газовом режиме МРС в качестве рабочего газа использовался аргон. Рабочее давление составляло 3×10^{-3} Торр. Для реализации вакуумного режима магнетрона первоначальное инициирование осуществлялось в присутствии рабочего газа при давлении 3×10^{-3} Торр, после чего ток магнетронного разряда устанавливался на уровне 10 А и напуск рабочего газа в камеру перекрывался механическим клапаном, установленным непосредственно на вакуумной камере. При этом давление в вакуумной камере снижалось до значений, близких к остаточному давлению (2×10^{-5} Торр).

В режиме осаждения № 1 для измерения аксиального и радиального распределения скорости осаждения покрытий использовался подвижный держатель с линейкой образцов 4, позволяющий менять расстояние до мишени от 20 до 50 см. Образцы размером 3×3 см² располагались на радиальном расстоянии R от оси разрядной системы, равным от 0 до 20 см с шагом 5 см. В качестве образцов использовались подложки из кремния и стекла. Толщина стеклянных образцов выбиралась не менее 4 мм, что обеспечивало достаточную прочность подложки для измерения адгезии покрытий методом отрыва приклеенной контактной площадки.

Перед помещением в вакуум образцы подвергались очистке в ультра-звуковой ванне

в спирте и дистиллированной воде при температуре 60 °С продолжительностью 60 мин. Непосредственно в вакуумной камере перед процессом осаждения образцы подвергались дополнительной ионной очистке и активации поверхности с помощью генератора плазмы с инжекцией электронов [8]. Плотность ионного тока в области подложки составляла $0,5 \div 1$ мА/см² при отрицательном потенциале самосмещения подложки порядка 20÷30 В. Длительность стадии ионной обработки составляла 15 мин. После этого образцы закрывались заслонкой, зажигался магнетронный разряд, выставлялись параметры осаждения, заслонка открывалась и начинался процесс магнетронного осаждения. После процесса осаждения образцы выдерживались в вакууме не менее 60 мин.

Эксперименты по осаждению за счет обратного рассеяния распыленных атомов [9] проводились в трех режимах. Для режима осаждения № 2 стеклянный образец 6 размером 3×3 см² располагался за экраном 5 размером 5×5 см² на расстоянии 10 см от мишени магнетрона. Аналогичный эксперимент для режима № 3 проводился на расстоянии 35 см. В режиме осаждения № 4 образец располагался в трубе с внутренним диаметром 7 см на глубине 5 см от торца, при этом труба была развернута на 90 градусов относительно оси магнетрона.

Измерение адгезии покрытий проводилось методом отрыва по нормали к поверхности образца на так называемой машине Себастьяна, представляющей собой рычаг второго рода. Площадь контактной площадки составляла 0,2 см². В случае, если отрыв покрытия происходил не по всей поверхности контактной площадки, производился пересчет площади поверхности на фактическую. Площадь стеклянных образцов обеспечивала возможность проведения многократных измерений адгезии на одном образце для набора статистики. Предельная прочность эпоксидного клея составляла 150 кг/см².

Для измерения скорости осаждения покрытий использовался оптический профилометр на основе интерферометра Линника (ЛОМО МИИ-4). Для исследования поверхностной морфологии напыляемых покрытий использовался атомно-силовой микроскоп

Solver P47 (NT–MDT, Россия) с использованием CSG01 кантиливера в контактном сканирующем режиме. Измерение шероховатости проводилось для трех размеров площадок: $1 \times 1 \text{ мкм}^2$, $5 \times 5 \text{ мкм}^2$, $15 \times 15 \text{ мкм}^2$. Последующая обработка изображений осуществлялась с использованием программных пакетов Image Analysis 2.0 (NT–MDT) и Gwyddion.

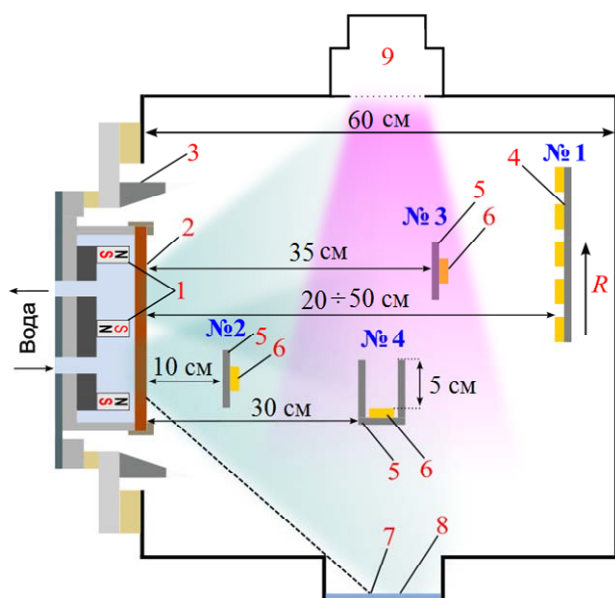


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – магнитная система планарного магнетрона;
2 – мишень магнетрона (катод); 3 – анод магнетрона;
4 – подложкодержатель с образцами для прямого осаждения; 5 – экраны; 6 – образцы для обратного и углового рассеяния; 7 – граница запыления смотрового окна в вакуумном режиме; 8 – смотровое окно; 9 – генератор газоразрядной плазмы с инжекцией электронов

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2 представлены радиальные распределения скорости осаждения для двух значений расстояния до подложки. На расстояниях порядка двух диаметров мишени (20 см) скорость осаждения в газовом и вакуумном режимах осаждения сравнима (рис. 2а). Разница в скорости осаждения в вакуумном и газовом режимах начинает проявляться при увеличении расстояния. На расстоянии 50 см скорость осаждения в вакуумном режиме превышает аналогичные значения в газовом режиме осаждения в 1,2–1,6 раза (рис. 2б).

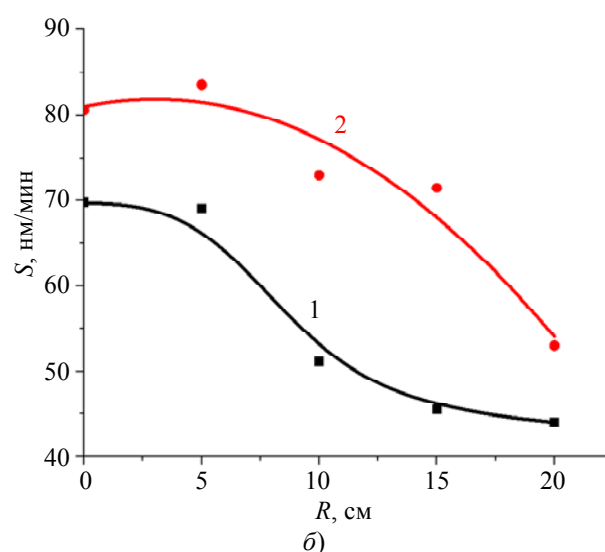
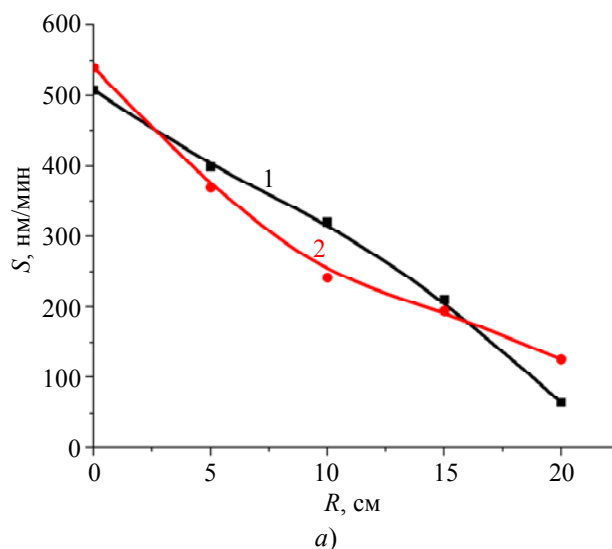


Рис. 2. Радиальные распределения скорости осаждения в зависимости от расстояния до мишени 20 см (а) и 50 см (б) в газовом (1) и вакуумном (2) режимах магнетрона. Ток магнетрона 10 А

Простые оценки показывают, что длина свободного пробега распыленного атома в газовом режиме не превышает 1 см. Таким образом, даже для режима осаждения № 2 (10 см от мишени) распыленный атом металла может испытать несколько столкновений с атомами рабочего газа с изменением первоначального вектора скорости. Этот вывод подтверждается результатами экспериментов по осаждению покрытия на тыльную сторону образца. Небольшая ($< 100 \text{ нм}$) толщина осажденного слоя не позволила корректно провести измерения с использованием микроинтерферометра МИИ-4, однако визуально запыление образцов в газовом режиме было кратно выше (рис. 3) как в режиме № 2, так и в режиме № 3.

Аналогичный эффект был получен для режима осаждения № 4 в боковом направлении под углом 90 градусов относительно оси разрядной системы.

Режим баллистического осаждения проявлялся в вакуумном режиме магнетрона частичным запылением смотрового окна с характерной четкой границей 7 (см. рис. 1), определяемой выступающим углом фланца вакуумной камеры на пути распространения распыленных атомов меди. Часть смотрового окна 8, расположенная в области тени выступающего угла вакуумной камеры, оставалась практически незапыленной даже при непрерывном функционировании магнетрона в течение нескольких часов. При этом в первые несколько минут работы магнетрона на смотровом окне наблюдалось две характерные границы области осаждения. Прямые линии, проведенные от данных границ покрытия через выступающий угол вакуумной камеры, проходят через дальний и ближний участки рейстрекла магнетрона. Расстояние от указанных участков рейстрекла границы пленки на поверхности смотрового окна составляло

50 см. Формирование четкой границы 7 (рис. 4б) осаждаемого покрытия в вакуумном режиме указывает на практически бесстолкновительный характер движения распыленных атомов на указанных расстояниях. В газовом режиме магнетрона запыление смотрового окна происходило однородно по всей поверхности, что может объясняться рассеянием потока распыленных атомов на столкновениях с атомами рабочего газа (рис. 4а).

Результаты измерения адгезии покрытий показывают, что для всех исследованных значений расстояния от магнетрона, адгезия покрытий, полученных в вакуумном режиме, выше, чем для покрытий, полученных в газовом режиме осаждения (табл. 1). С увеличением расстояния от мишени магнетрона отношение значений адгезии в вакуумном и газовом режимах увеличивается от 1,2 (на расстоянии 20 см) до 1,9 (на расстоянии 50 см). Снижение адгезии покрытий может быть связано с потерей направленной энергии распыленных атомов в пространстве дрейфа на столкновениях с атомами рабочего газа в газовом режиме.

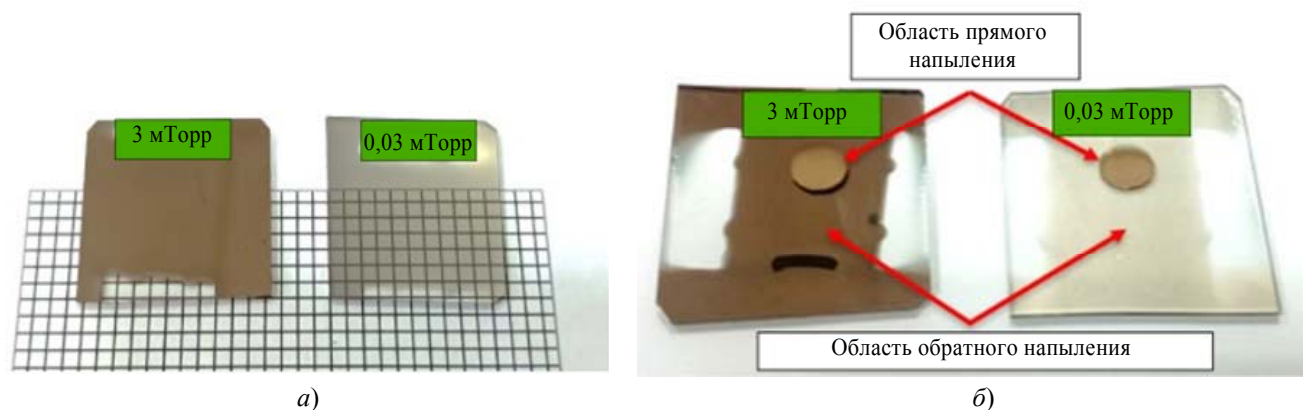


Рис. 3. Фотографии стеклянных образцов после осаждения в газовом и вакуумных режимах магнетрона: а) $L = 10$ см; б) $L = 35$ см

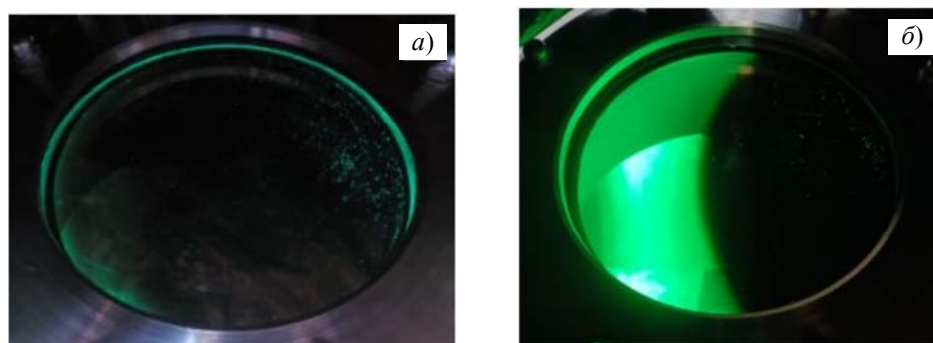


Рис. 4. Фотографии запыления смотрового окна после 30 мин функционирования магнетронного разряда в газовом (а) и вакуумном (б) режимах. Ток разряда 10 А

Таблица

Результаты измерений адгезии медных покрытий для газового и вакуумного режимов осаждения в зависимости от расстояния до магнетрона

Расстояние от мишени до подложки	20 см		30 см		40 см		50 см	
	Газ. режим	Вак. режим	Газ. режим	Вак. режим	Газ. режим	Вак. режим	Газ. режим	Вак. режим
Адгезия покрытий, кг·с/см ²	37	46	39	47	45	61	21	40

Для покрытий, полученных в вакуумном режиме характерны более низкие (в среднем в 1,5–2 раза) значения средней и среднеквадратичной шероховатости покрытия R_{mean} и R_{rms} , которые составляли 9 и 2,8 нм, соответственно. Это коррелирует с результатами, полученными ранее, при снижении рабочего давления в процессе магнетронного осаждения и может быть связано с большей энергией поступающих на подложку атомов и, как следствие, большей подвижностью и более плотной упаковкой атомов [10].

Заключение

Результаты сравнительных исследований процесса осаждения покрытий в газовом и вакуумном режимах функционирования планарной магнетронной распылительной системы с модельным материалом катода – медью показали, что в вакуумном режиме обеспечиваются более высокие скорости осаждения покрытий, улучшаются их адгезионные свойства и снижается шероховатость поверхности. Достигнутые параметры обусловлены баллистическим (бесстолкновительным) характером движения распыленных атомов мишени в области от катода магнетрона до напыляемой подложки. Следствием этого являются слабые эффекты бокового и обратного рассеяния распыленных атомов, что повышает эффективность процесса осаждения покрытий в вакуумном режиме магнетрона с использованием коллиматоров. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о привлекательности

использования вакуумного режима МРС в технологии создания металлических покрытий.

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chapin J. S. / Research Development. 1974. № 25. P. 37–40.
2. Posadowski W. / Surface and Coatings Technology. 1991. Vol. 49. № 1-3. P. 290–292.
3. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Юрьева А. В. / Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 12. С. 56–62.
4. Tumarkin A. V., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Kolodko D. V., Ilychev I. V., Khodachenko V. G. / Surface and Coatings Technology. 2016. № 293. P. 42–47.
5. Shandrikov M. V., Azhgikhin M. I., Bugaev A. S., Cherkasov A. A., Moskvina P. V., Oks E. M., Yushkov G. Y. / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Vol. 88. № Suppl. 4. P. S574–S579.
6. Depla D., Mahieu S., Greene J. E. Handbook of deposition technologies for films and coatings. – N.Y. William Andrew Publishing, 2010. P. 253–296.
7. Shandrikov M. V., Cherkasov A. A., Oks E. M., Zolotukhin D. B. / Vacuum. 2025. P. 114656.
8. Vizir A. V., Shandrikov M. V., Yushkov G. Y., Oks E. M. / Review of Scientific Instruments. 2010. Vol. 81. № 2. P. 02B307.
9. Volpyas V. A. / Physics Letters A. 2014. Vol. 378. № 43. P. 3182–3184.
10. Шандриков М. В., Черкасов А. А. / Прикладная физика. 2023. № 1. С. 15.

Coating deposition processes in the gas and vacuum modes of a planar magnetron sputtering system

M. V. Shandrikov, E. M. Oks, and A. A. Cherkasov*

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia

**E-mail: cherkasov.a@hcei.ru*

Received 11.03.2026; revised 24.03.2026; accepted 06.08.2026

The results of comparative studies of the deposition of coatings in the gas and vacuum modes of operation of a planar magnetron sputtering system are presented. Copper was used as the model material of the sputtered target cathode. It is shown that higher deposition rates of coatings are achieved in the vacuum mode, their adhesive properties are improved and their roughness is reduced.

Keywords: magnetron sputtering system, self-sputtering, plasma, vacuum (gassless) mode, magnetron discharge.

REFERENCES

1. Chapin J. S., Research Development, № 25, 37–40 (1974).
2. Posadowski W., Surface and Coatings Technology **49** (1-3), 290–292 (1991).
3. Bleykher G. A., Krivobokov V. P., and Yuryeva A. V., Technical Physics **85** (12), 56–62 (2015).
4. Tumarkin A. V., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Kolodko D. V., Ilychev I. V., and Khodachenko V. G., Surface and Coatings Technology **293**, 42–47 (2016).
5. Shandrikov M. V., Azhgikhin M. I., Bugaev A. S., Cherkasov A. A., Moskvina P. V., Oks E. M., and Yushkov G. Y., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **88** (4), S574–S579 (2024).
6. Depla D., Mahieu S., and Greene J. E. Handbook of deposition technologies for films and coatings: N.Y., William Andrew Publishing, 2010, pp. 253–296.
7. Shandrikov M. V., Cherkasov A. A., Oks E. M., and Zolotukhin D. B., Vacuum **114656** (2025).
8. Vizir A. V., Shandrikov M. V., Yushkov G. Y., and Oks E. M., Review of Scientific Instruments **81** (2), 02B307 (2010).
9. Volpyas V. A., Physics Letters A **378** (43), 3182–3184 (2014).
10. Shandrikov M. V. and Cherkasov A. A., Applied Physics, № 1, 15 (2023) [in Russian].

Об авторах

Шандриков Максим Валентинович, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: shandrikov@hcei.ru SPIN-код: 2853-7737, AuthorID: 161950, ORCID ID: 0000-0002-0844-0356, Scopus Author ID: 6506983874

Окс Ефим Михайлович, д.т.н., заведующий лабораторией, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: oks@hcei.ru SPIN-код: 6422-5057, AuthorID: 18767, ORCID ID: 0000-0002-9323-0686, Scopus Author ID: 15019732300

Черкасов Александр Алексеевич, младший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: cherkasov.a@hcei.ru SPIN-код: 5285-4980, AuthorID: 1178261, ORCID ID: 0000-0002-2429-4969, Scopus Author ID: 57463526300