

УДК 537.525  
EDN: FDIZCEPACS: 52.80.-s, 52.80.Hc,  
52.80.Sm, 84.40.Fe

## Планарная магнетронная распылительная система с инжекцией электронов и отражающим электродом

М. В. Шандриков, А. А. Черкасов

*Исследованы особенности работы разрядной системы на основе планарного магнетрона с дополнительной инжекцией электронов и коническим отражающим электродом. Инжекция электронов осуществлялась из тлеющего разряда с полым катодом, размещенным с обратной стороны мишени. Мишень магнетронного разряда диаметром 125 мм была выполнена из меди. Давление рабочего газа (аргон) варьировалось в диапазоне от 3 до 0,5 мТорр. Разряды функционировали в непрерывном режиме. Представлены результаты влияния отражающего электрода на радиальную однородность генерируемой плазмы, а также степень его распыления. Исследовано влияние рабочего давления на радиальную однородность, поверхностную и фазовую структура осаждаемых пленок меди.*

**Ключевые слова:** магнетронный разряд, плазма, отражающий электрод, инжекция электронов, пленки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-15-21

### 1. Введение

Магнетронное напыление на сегодняшний день является самой распространенной технологией нанесения тонких покрытий в вакууме [1–3]. Это связано как с относительной простотой планарных распылительных систем, так и качеством формируемых покрытий, обусловленным как более высокой начальной энергией распыленных частиц по сравнению с термическим напылением, так и относительно низким рабочим давлением, обеспечивающим более эффективную транспортировку распыленных частиц до подложки для сохранения их энергии. Дальнейшее сни-

жение рабочего давления в процессе магнетронного осаждения представляет интерес как в связи с изменением свойств и структуры формируемых покрытий в результате изменения энергии конденсируемых частиц [4–6], так и увеличением эффективности самого процесса магнетронного осаждения за счет уменьшения транспортных потерь распыленных атомов.

Предложенная ранее система на основе планарного магнетронного разряда с дополнительной инжекцией электронов и установленным на пути инжектированных электронов непосредственно за эмиссионной апертурой специальным отражающим электродом, находящимся под отрицательным потенциалом, обеспечила двукратное снижение рабочего давления магнетронного разряда без снижения тока разряда [7]. Такой эффект достигается за счет более эффективного использования энергии инжектированных электронов при перераспределении их из приосевой области на периферию мишени, в зону скрещенных  $E \times H$  полей.

Шандриков Максим Валентинович, с.н.с., к.т.н.  
E-mail: shandrikov@psee.hcei.tsc.ru

Черкасов Александр Алексеевич, аспирант, инженер.  
Институт сильноточной электроники СО РАН.  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 17.10.2022

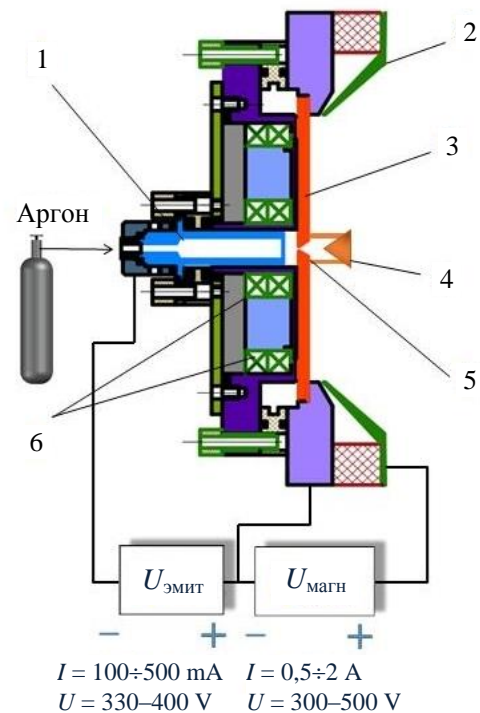
После доработки 27.10.2022

Принята к публикации 2.11.2022

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния данного отражающего электрода на пространственное распределение генерируемой плазмы, а также изменения структуры осаждаемых пленок меди при снижении рабочего давления в такой системе вплоть до предельно низкого.

## 2. Описание эксперимента

Схема планарной магнетронной распылительной системы, используемая в данной работе для осаждения пленок в области предельно низкого рабочего давления, показана на рис. 1. Магнетронный разряд поддерживался электронами, эмитируемыми из плазмы тлеющего разряда с полым катодом 1 через эмиссионную апертуру 5 и ускоренными в прикатодном слое магнетронного разряда. Для предотвращения ухода инжектированных электронов в аксиальном направлении на их пути размещался отражающий электрод 4, имеющий одинаковый электрический потенциал с мишенью магнетрона 3, являющейся в свою очередь анодом эмиттерного разряда. Рабочий газ (аргон) напускался в полый катод эмиттера. Перепад давления на эмиссионной апертуре обеспечивал с одной стороны низкое рабочее давление в области основного магнетронного разряда, а с другой – повышенное давление и стабильное функционирование тлеющего разряда в эмиттере. Мишень магнетрона диаметром 125 мм и толщиной 4 мм была выполнена из меди. Полый катод эмиттера с внутренним диаметром 10 мм и длиной полости 40 мм был выполнен из магнитной стали (Ст3). Магнитное поле 6 создавалось двумя кольцевыми наборами NdFeB N35 магнитов размерами 10×10×10 мм. Количество магнитов во внешнем и внутреннем контуре составляло 27 и 9 шт., соответственно. Полый катод эмиттера и мишень магнетрона охлаждались проточной водой. Вакуумная камера из нержавеющей стали объемом 0,2 м<sup>3</sup> откачивалась турбомолекулярным насосом ТМН-500 до остаточного давления 1×10<sup>-5</sup> Торр. Расход рабочего газа (аргон) контролировался посредством электронного регулятора расхода газа (РРГ, Элточприбор) и составлял 5–15 см<sup>3</sup>/м.



**Рис. 1.** Схема планарной распылительной системы с эмиттером на основе тлеющего разряда с полым катодом: 1 – полый катод эмиттерного разряда; 2 – анод магнетрона; 3 – мишень магнетрона (анод эмиттерного разряда); 4 – отражающий электрод; 5 – эмиссионная апертура

Для исследования поверхностной морфологии напыляемых покрытий использовался оптический интерференционный профилометр New View 6200 (Zyga, Германия), а также атомно-силовой микроскоп Solver P47 (NT-MDT, Россия) с использованием CSG01 кантиливера в контактном сканирующем режиме. Измерение шероховатости проводилось для трех размером площадок: 1×1 мкм<sup>2</sup>, 5×5 мкм<sup>2</sup>, 15×15 мкм<sup>2</sup>. Обработка изображений осуществлялась с использованием программного пакета Image Analysis 2.0 (NT-MDT).

Элементный состав покрытий определялся с помощью двух приставок, установленных на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 (Zeiss, Германия):

а) приставка для энергодисперсионного микроанализа (EDS) (Oxford Instruments, Великобритания), при ускоряющем напряжении  $U = 20$  кВ, токе  $I = 1,5 \pm 2$  нА. Погрешность в определении элемента – 1 %;

б) приставка для волнодисперсионного микроанализа (WDS) INCA Wave-500 (Oxford Instruments), при  $U = 20$  кВ,  $I = 10$  нА. Погрешность измерения – 0,1 %. Перед измере-

ниями детектор калибровался на эталонных образцах. Управление детекторами и обработка измерений проведена с использованием программного обеспечения INCA Energy 350 (Oxford Instruments). Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 на  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Анализ фазового состава определялся с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Анализ масс-зарядового состава ионов плазмы магнетрона осуществлялся с использованием модифицированного квадрупольного масс-анализатора RGA-200 (SRS). Толщина пленок определялась с использованием оптического интерферометра Linnik МП-4 (ЛОМО, Россия) на длине волны 629 нм. Для измерения плотности ионного тока использовался плоский подвижный зонд Ленгмюра с охранным кольцом и площадью собирающей поверхности  $1 \text{ см}^2$ . Отрицательный потенциал зонда относительно заземленных стенок вакуумной камеры (анод магнетронного разряда также заземлен) составлял 100 В, что обеспечивало характерное насыщение ионной ветви во всех диапазонах параметров разряда и пространственного положения зонда относительно мишени. Электрическое питание разрядов осуществлялось от стабилизированных источников, имеющих функцию дугогашения.

### 3. Результаты и обсуждение

Использование дополнительного отражающего электрода в системе планарного магнетрона с центральной инъекцией позволяет перераспределить поток инжектированных электронов с приосевой области на периферию мишени в область скрещенных  $\text{E} \times \text{H}$ -полей, обеспечивая более высокую степень ионизации рабочего газа в области низкого давления, либо более низкое рабочее давление при фиксированном значении тока разряда. На рис. 2 представлены профили радиального распределения формируемой плазмы в зависимости от конфигурации магнетронного разряда. Инжекция электронов в центре мишени приводит к стягиванию разряда с периферийной кольцевой зоны распыления к оси системы, что подтверждается как визуальными наблюдениями, так и измерениями профиля

распределения плазмы (рис. 2, линия 2). Установка конического отражающего электрода под отрицательным потенциалом, равным потенциалу мишени, на пути распространения инжектированных электронов приводит к рассеиванию электронов, что в свою очередь обеспечивает формирование более однородной плазмы в области магнетрона (рис. 2, линия 3). Оптимальное расстояние отражающего электрода от мишени магнетрона при этом должно превышать удвоенное значение ширины прикатодного слоя магнетронного разряда. В наших экспериментах расстояние от мишени до торца отражающего электрода составляло 2 см.

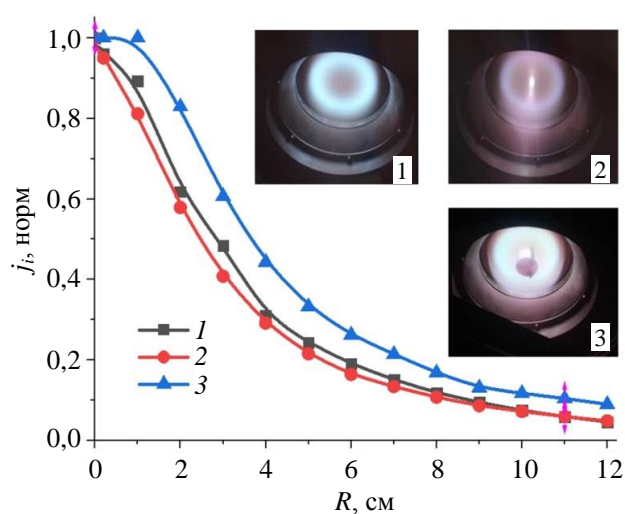


Рис. 2. Влияние отражающего электрода на профиль радиального распределения плотности ионного тока: 1 – без инъекции электронов; 2 – с инъекцией электронов (100 мА) без отражающего электрода; 3 – с инъекцией электронов (100 мА) и отражающим электродом. Ток магнетрона 1 А, давление 0,8 мТорр, расстояние от мишени 15 см

Наибольшее влияние на параметры магнетронного разряда достигается в том случае, когда отражающий электрод имеет электрический потенциал распыляемой мишени. Однако при этом возможно внесение примесей материала отражающего электрода под действием ионного распыления в генерируемую плазму и в материал пленки. Для более детального исследования данного вопроса был проведен модельный эксперимент, в котором отражающий электрод был выполнен из титана, в то время как мишень была выполнена из меди. Производился анализ содержания примеси титана как в ионизованном состоянии в плазме магнетрона, так и в атомарном в составе

пленки на подложке. Результаты исследований показали, что в типичном рабочем диапазоне параметров разрядов ( $I_{\text{магн}} = 0,5 \div 1$  А), содержание примеси ионов титана в объеме генерируемой плазмы магнетронного разряда не превышает 0,5 % (рис. 3). С учетом различия коэффициентов ионного распыления ти-

тана ( $K_p = 0,5$  ат./ион) и меди ( $K_p = 2$  ат./ион) [8, 9] можно сделать вывод, что в плазме магнетронного разряда примесь материала отражателя, имеющего электрический потенциал мишени, не превышает 2 %. Присутствие в плазме ионов железа связано с использованием стальных держателей отражающего электрода.

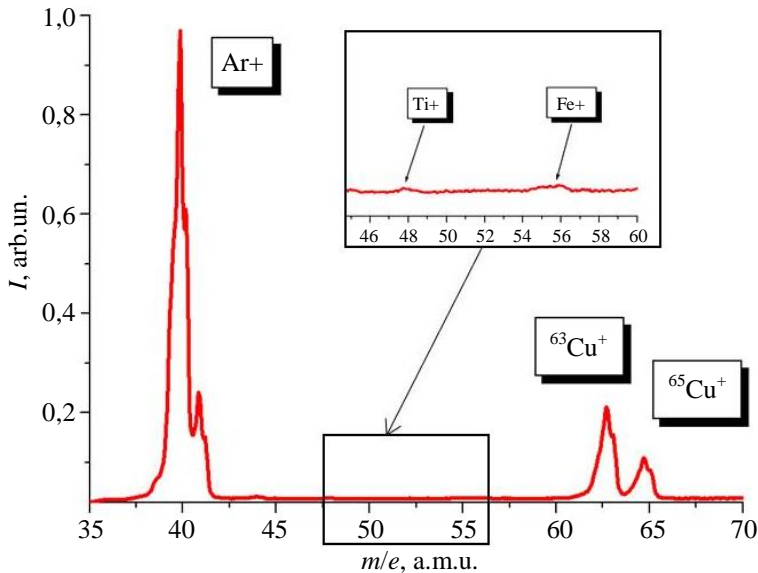


Рис. 3. Масс-зарядовый спектр ионов плазмы магнетронного разряда.  $I = 1,5$  А,  $p = 0,7 \times 10^{-4}$  Торр (мишень – медь, отражающий электрод – титан)

Исследования наличия примесей материала отражающего электрода в осаждаемой пленке, проводимые с использованием двух типов приставок с погрешностью измерения 1 % (EDS) и 0,1 % (WDS) показали, что доля титана в медной пленке составляет 0,88 % и 0,17 %, соответственно, что хорошо коррели-

рует с данными по примеси титана в виде ионной составляющей в плазме. Исследования также показали, что формируемая пленка сплошная, однородная, без наличия капельной фракции на поверхности (рис. 4). Незначительные дефекты (углубления) связаны с дефектами подложки.

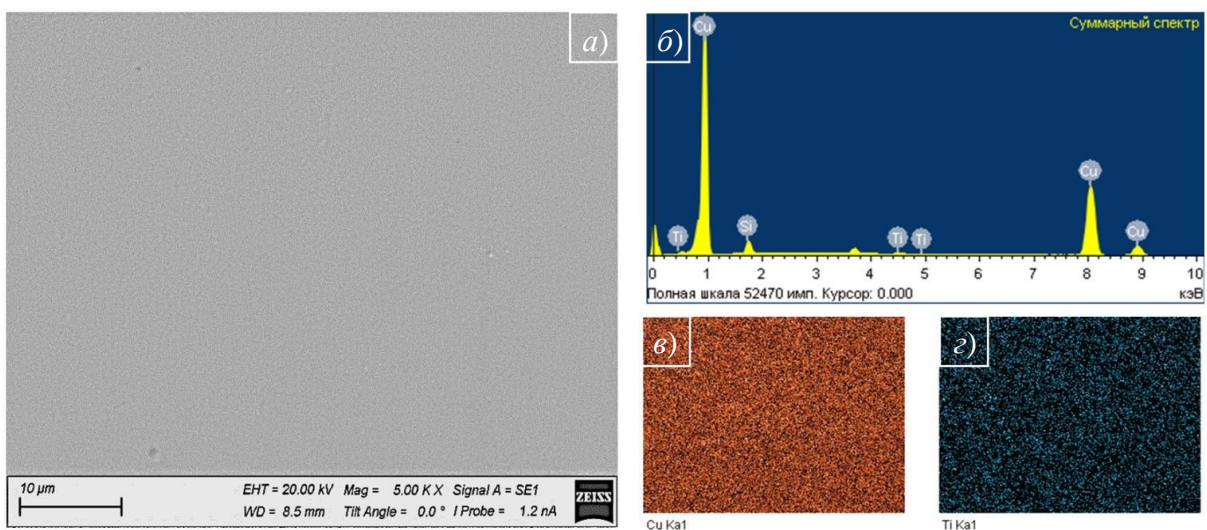


Рис. 4. Изображение поверхности пленки меди, полученное методом растровой электронной микроскопии (а), элементный состав (б) и распределение меди (в) и титана (г) в осаждаемой пленке (рабочее давление 0,8 мТорр)

Для оптимальной конфигурации отражающего электрода была получена серия образцов пленок меди. Изменяемым параметром в процессе магнетронного осаждения являлось давление рабочего газа. Ток эмиттерного разряда и мощность магнетронного разряда при этом поддерживались постоянными на уровне 50 мА и 500 Вт, соответственно. При этом ток магнетронного разряда при снижении давления в указанном диапазоне снижался с 1,6 до 1,3 А, а напряжение горения разряда увеличивалось с 305 до 390 В. Пленки осаждались на подложки из предметного стекла размером 76×26×1 мм. Для измерения радиального распределения толщины осаждаемой пленки две подложки располагались последовательно друг за другом. Перед осаждением подложки протирались этиловым спиртом, обрабатывались в УЗ ванне в дистиллированной воде (10 мин) и проходили финишную очистку в плазме аргона (10 мин) при плотности ионного тока на подложку 1 мА/см<sup>2</sup>. Профили радиального распределения толщины осажденной пленки показаны на рис. 5. Начало отсчета соответствует оси разрядной системы.

Полученные результаты показывают, что с уменьшением рабочего давления осаждаемая пленка становится более однородной прежде всего за счет увеличения толщины пленки на периферии подложки. Обращает на себя внимание также тот факт, что скорость осаждения при уменьшении давления рабочего газа также увеличивается, что обусловлено в первую очередь уменьшением транспортных потерь распыленных атомов мишени.

Исследования структуры поверхности формируемой пленки методом оптической профилометрии (рис. 6) и атомно-силовой микроскопии (рис. 7) показывают, что снижение рабочего давления в процессе магнетронного осаждения в диапазоне от 3 до 0,5 мТорр приводит к снижению среднеквадратичного значения шероховатости поверхности пленки в 3–4 раза. При этом степень кристалличности медной фазы при уменьшении рабочего давления в диапазоне от 3 до 0,5 мТорр увеличивается с 80 до 87 %, а область когерентного рассеивания, косвенно свидетельствующая о размере кристаллитов, уменьшается с 33 до 17 нм.

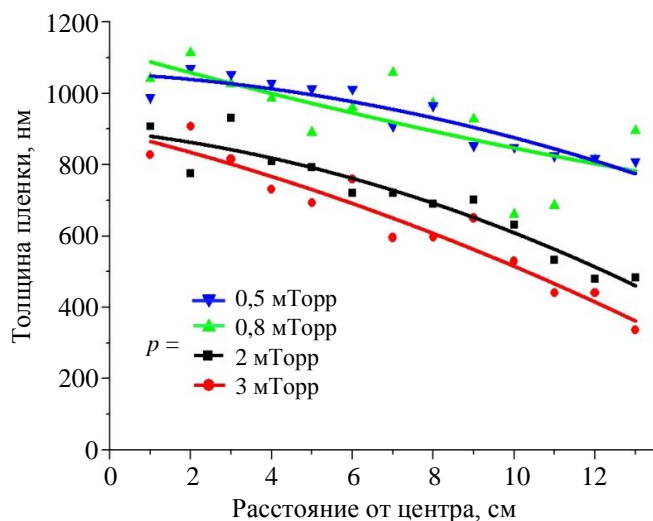


Рис. 5. Радиальное распределение толщины пленки в зависимости от рабочего давления: Напряжение магнетронного разряда 400 В (P = 500 Вт), расстояние от мишени 17 см, время напыления 10 мин

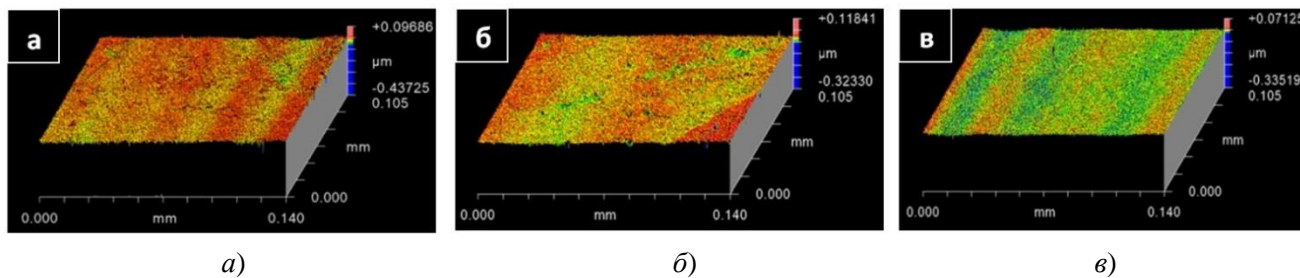
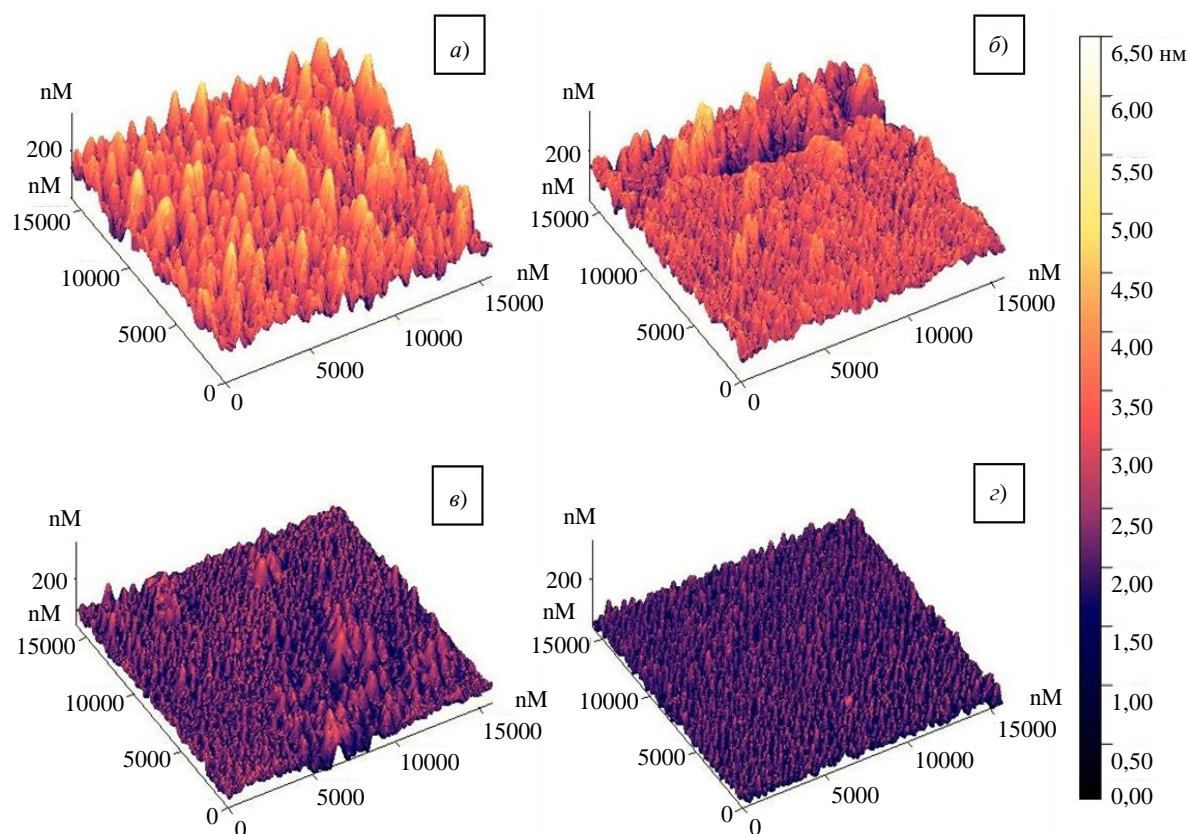


Рис. 6. Изображение поверхности медной пленки, полученное методом оптической профилометрии, в зависимости от давления рабочего газа в процессе магнетронного осаждения: а – p = 3 мТорр, R<sub>RMS</sub> = 16 нм; б – p = 2 мТорр, R<sub>RMS</sub> = 10 нм; в – p = 0,5 мТорр, R<sub>RMS</sub> = 6 нм



**Рис. 7.** Изображение поверхности медной пленки, полученное методом атомно-силовой микроскопии, в зависимости от давления рабочего газа в процессе магнетронного осаждения: *а* –  $p = 3$  мТорр,  $R_{RMS} = 47$  нм; *б* –  $p = 2$  мТорр,  $R_{RMS} = 39$  нм; *в* –  $p = 0,8$  мТорр,  $R_{RMS} = 19$  нм; *з* –  $p = 0,5$  мТорр,  $R_{RMS} = 14$  нм

## Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование дополнительной инжекции электронов в магнетронный разряда в центральной области мишени с дополнительным отражающим электродом, находящимся под потенциалом мишени, позволяет повысить концентрацию плазмы на периферии мишени.

Примесь материала отражающего электрода, находящегося под электрическим потенциалом мишени, в составе плазмы и формируемой пленки не превышает 2%. В критичных случаях отражающий электрод может быть выполнен из тугоплавких материалов с низким коэффициентом ионного распыления (Ta, Mo), либо выполнен из материала распыляемой мишени.

Пленки, полученные в области предельно низкого рабочего давления (0,5–0,8 мТорр), характеризуются увеличением степени кри-

сталличности и уменьшением средних значений шероховатости поверхности и размера зерна кристаллитов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700003.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Braun M. Magnetron Sputtering Technique, In book: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, 2015.
2. Gudmundsson J. T. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 11.
3. Rossnagel S. M. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2020. Vol. 38. P. 060805.
4. Chen Zh., Tian W., Zhang X. et al. / J. Micro-mech. Microeng. 2017. Vol. 27. P. 113003.
5. Muralidhar Vijaya G., Krupashankara M. S. et al. / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 149. P. 012075.

6. John H. Thomas III / Journal of Vacuum Science & Technology A. 2003. Vol. 21. P. 572.

7. Shandrikov M. V., Artamonov I. D. et al. / Vacuum. 2021. Vol. 192. P. 110487.

8. Пleshivцев Н. В. Физические проблемы катодного распыления. Обзор. – М., 1979.

9. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / под ред. Р. Бериша. – М.: Изд. «Мир», 1984.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Hc, 52.80.Sm, 84.40.Fe

## Planar magnetron sputtering system with electron injection and reflecting electrode

M. V. Shandrikov and A. A. Cherkasov

Institute of High Current Electronics, Russian Academy of Sciences  
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: shandrikov@opee.hcei.tsc.ru

Received 17.10.2022; revised 27.10.2022; accepted 2.11.2022

*The features of the operation of a discharge system based on a planar magnetron with additional electron injection and a conical reflecting electrode are investigated. The injection of electrons was carried out from a glow discharge with a hollow cathode placed on the back side of the target. The magnetron discharge target with a diameter of 125 mm was made of copper. The pressure of the working gas (argon) varied in the range from 3 to 0.5 mTorr. The discharges functioned in a continuous mode. The results of the influence of the reflecting electrode on the radial uniformity of the generated plasma, as well as the degree of its sputtering, are presented. The radial uniformity and the surface and phase structure of copper films formed when the operating pressure decreases down to the lowest possible (0.5 mTorr) are investigated.*

**Keywords:** magnetron discharge, plasma, electron injection, reflecting electrode, films.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-15-21

### REFERENCES

1. Braun M., Magnetron Sputtering Technique, In book: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, 2015.
2. Gudmundsson J. T., Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 11, (2020).
3. Rossnagel S. M., J. Vac. Sci. Technol. A **38**, 060805 (2020).
4. Chen Zh., Tian W., Zhang X. et al., J. Micromech. Microeng. **27**, 113003 (2017).
5. Muralidhar Vijaya G., Krupashankara M. S. et al., IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **149**, 012075 (2016).
6. Thomas John H. III, Journal of Vacuum Science & Technology A **21**, 572 (2003).
7. Shandrikov M. V., Artamonov I. D. et al., Vacuum **192**, 110487 (2021).
8. Pleshivcev N. V., Physical problems of cathode sputtering, Moscow, 1979 [in Russian].
9. Sputtering by particle bombardment. Physical Sputtering of Single-elements solids. Edited by R. Behrisch, Mir, Moscow, 1984.