

ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОН С РОТАЦИОННЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ АНОДОМ, РАСПЫЛЯЕМЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

© 2023 г. А. П. Семенов^{а,*}, Д. Б.-Д. Цыренов^а, И. А. Семенова^а^аИнститут физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

*e-mail: alexandersemenov2018@mail.ru; semenov@ipms.bsnet.ru

Поступила в редакцию 06.06.2022 г.

После доработки 26.06.2022 г.

Принята к публикации 19.08.2022 г.

Разработан планарный магнетрон с ротационным центральным анодом. Центральный плоский анод, выполняющий функции мишени, распыляемой ионным пучком, установлен с возможностью вращения и под углом 45° – 50° относительно направления падения распыляющего ионного пучка, причем ось вращения анода совпадает с осью симметрии ионного пучка. Расчет коэффициента распыления медного центрального анода магнетрона показывает, что при наклонном падении распыляющих ионов и прочих равных условиях обеспечивается рост коэффициента распыления медного анода магнетрона с 6 до 9 атомов на один падающий ион, при этом достигается максимальная кучность распыленных атомов меди на ростовой поверхности подложек. Планарный магнетрон предлагаемой конструкции имеет более широкие функциональные возможности, в частности, при синтезе наноструктурированных композитных покрытий TiN–Cu. Однородная глобулярная структура ростовой поверхности покрытия TiN–Cu с размерами глобул в пределах 50–100 нм указывает на нормальный (негранный) механизм роста. Микротвердость покрытий составляет примерно 42 ГПа.

DOI: 10.31857/S0032816223010214, EDN: JWXS NV

ВВЕДЕНИЕ

При синтезе композитных наноструктурированных покрытий TiN–Cu перспективными выглядят газоразрядные устройства на основе планарного магнетрона с инжекцией ионного пучка в магнетрон [1]. Как свидетельствуют работы [2–6], коэффициент распыления, определяемый как среднее число атомов, выбиваемых из мишени одним падающим ионом, существенно зависит от угла между направлением падения ионов на мишень и нормалью к плоскости мишени. В конструкции газоразрядного устройства на основе планарного магнетрона с ионным источником [1] плоский медный центральный анод образует угол 90° между плоскостью мишени и осью симметрии продольного направления падения ионного пучка, при этом угол падения ионов составляет 0° . Эксперименты [7] свидетельствуют о том, что эффективность распыления повышается с увеличением угла падения ионов на мишень, благодаря существенному росту коэффициента распыления.

В настоящей работе рассматривается конструкция планарного магнетрона с ротационным центральным анодом. Новая конструкция позволяет существенно расширить функциональные возможности планарного магнетрона, в частности,

при синтезе наноструктурированных композитных покрытий TiN–Cu.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе принципа применения ротационного центрального анода разработан планарный магнетрон, рис. 1. На оси магнетрона выполнено сквозное отверстие диаметром 4 мм [8]. Соосно в отверстии установлен стержень 1 диаметром 2 мм с возможностью осевого вращения со скоростью 6.28 рад/с, этот стержень наклонно удерживает центральный медный анод 2. Стержень 1 и центральный анод 2 электрически соединены с кольцевым анодом 3 (положительный потенциал). В качестве подложек 4 используются шестигранные сменные пластины (табл. 1), тип 11114 (HNUM) ГОСТ 19068-80, из твердого сплава Т15К6, которые также применяются для проходных резцов и торцевых фрез.

Подложки располагаются горизонтально напротив активной зоны кольцевой титановой мишени 5. Пучок ионов 6 с током 4 мА и энергией ионов 10 кэВ падает на анод 2 магнетрона под углом $\theta \approx 45^\circ$ – 50° . Кольцевые магниты 7 охлаждаются проточной водой. Свободным концом стержень 1 крепится к механическому редуктору 8 и

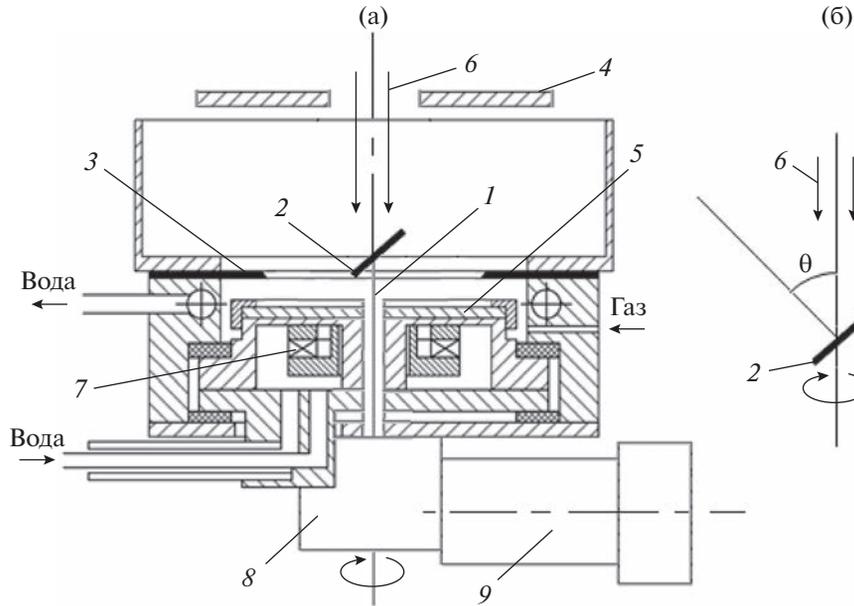


Рис. 1. Планарный магнетрон с ротационным центральным анодом: **а** – схема конструкции; **б** – направленность распыления (θ – угол падения ионов). 1 – стержень; 2 – центральный анод; 3 – кольцевой анод; 4 – подложки; 5 – катод; 6 – пучок ионов; 7 – кольцевые магниты; 8 – механический редуктор; 9 – электрический микродвигатель.

приводится во вращение электрическим микродвигателем 9. Плазмообразующая смесь газов Ar и N₂ натекает через отверстие, расположенное на периферии в корпусе магнетрона. Ток разряда магнетрона 0.1–0.5 А, напряжение горения разряда 400–470 В. Благодаря иницированию ускоренным ионным пучком доминирующих процессов, электронно-ионной эмиссии, а также распыления катода и центрального анода магнетрона, давление, при котором зажигается аномальный тлеющий разряд в магнетроне, составляет менее $8 \cdot 10^{-2}$ Па [9]. Общий вид планарного магнетрона представлен на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Направленность распыления (см. рис. 1б) определяется углом падения ионов θ на центральный анод 2, углом между нормалью к плоскости анода и направлением падения ионов. В случае наклонного падения ионов отклонение от нор-

мального падения на угол $\theta > 0^\circ$ приводит к уменьшению глубины проникновения части ионов на величину $\cos\theta$ в сравнении с падением ионов по нормали к плоскости анода и, как следствие, к концентрированию каскада столкновений в области поверхности медного анода, достигая максимума коэффициента распыления при углах падения в области 60° – 70° [7]. При этом максимальная кучность распыленных атомов меди на ростовой поверхности подложек в предлагаемой конструкции магнетрона достигается при углах падения 45° – 50° . В общем случае коэффициент распыления выражается соотношением [6, 10]

$$Y_{\text{Cu}}(\theta) \sim Y_{\text{Cu}}(0)/(\cos\theta)^k, \quad (1)$$

где $Y_{\text{Cu}}(0)$ и $Y_{\text{Cu}}(\theta)$ – соответственно коэффициенты распыления при углах падения распыляющих ионов 0° и θ .

При $M_{\text{Ar}} < M_{\text{Cu}}$, где M_{Ar} и M_{Cu} – соответственно массы распыляющего иона и распыляемого атома, имеем примерное равенство $k \sim 1$. С учетом расчетной зависимости коэффициента распыления меди [11] от энергии распыляющих ионов аргона при нормальном угле падения ионов $\theta = 0^\circ$ (рис. 3, кривая 1) из соотношения (1) рассчитаны численно значения коэффициента распыления $Y_{\text{Cu}}(\theta)$ в зависимости от угла падения θ (рис. 3, кривая 2). Рассчитанные значения коэффициента распыления по формуле (1) хорошо согласуются с экспериментальными значениями коэффициентов распыления Cu ионами Ar⁺ [7] в диапазоне килоэлектронвольтных энергий распыляющих

Таблица 1. Шестигранная сменная пластина

Обозначение		Размеры пластины, мм			
Цифровое	Буквенно-цифровое	L	D	d	s
11114-090408	HNUM-090408	9.1	15.875	6.35	4.76

Примечание. L – длина боковой грани, D – расстояние между противоположными гранями, d – диаметр отверстия, s – толщина пластины.

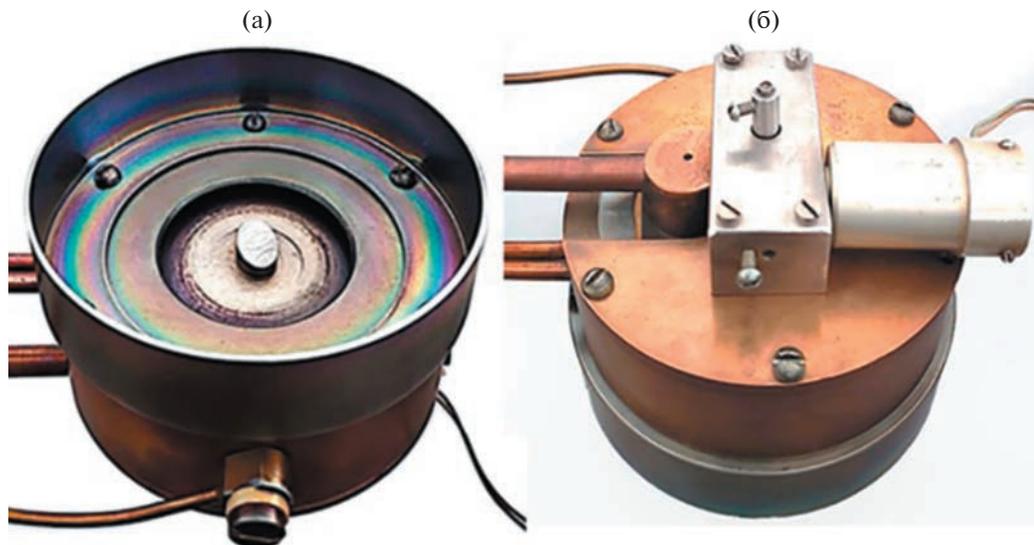


Рис. 2. Общий вид магнетрона: а – вид сверху; б – вид снизу.

ионов. Расчет показывает, что при наклонном падении ионов коэффициент распыления медного центрального анода при прочих равных условиях увеличивается с 6 до 9 атомов на один падающий ион (см. рис. 3, кривая 2), при этом обеспечивается максимальная кучность распыленных атомов меди на ростовой поверхности подложек.

Общий вид пластины из твердого сплава Т15К6 с покрытием TiN–Cu показан на рис. 4. Исследование строения поверхности композитного покрытия TiN–Cu (атомно-силовой микро-

скоп Multi-Mode-8) свидетельствует о том, что покрытие имеет характерную [12] однородную глобулярную структуру (рис. 5) с размерами кристаллитов в пределах 50–100 нм. Микротвердость сформированных слоев исследовали на микротвердомере ПМТ-3 М, укомплектованном цифровой камерой с программой обработки изображений отпечатков NEXSYS ImageExpert Micro-Hardness 2; микротвердость покрытий составляет примерно 42 ГПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция планарного магнетрона с ротационным центральным анодом, выполняющим функции мишени, распыляемой ионным пучком, анод установлен с возможностью вращения и под углом 45°–50° относительно направления падения распыляющего ионного пучка, причем ось вращения анода совпадает с осью симметрии ионного пучка. Расчет коэффициента распыления медного центрального анода

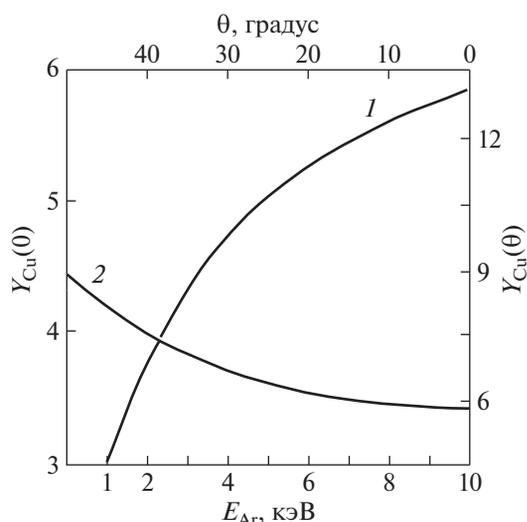


Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициента распыления меди: 1 – от энергии распыляющих ионов аргона ($\theta = 0^\circ$, ток пучка ионов 4 мА) [11]; 2 – от угла падения распыляющих ионов аргона (ток пучка ионов 4 мА, энергия ионов 10 кэВ).



Рис. 4. Изображение шестигранной сменной пластины из твердого сплава Т15К6 с покрытием TiN–Cu.

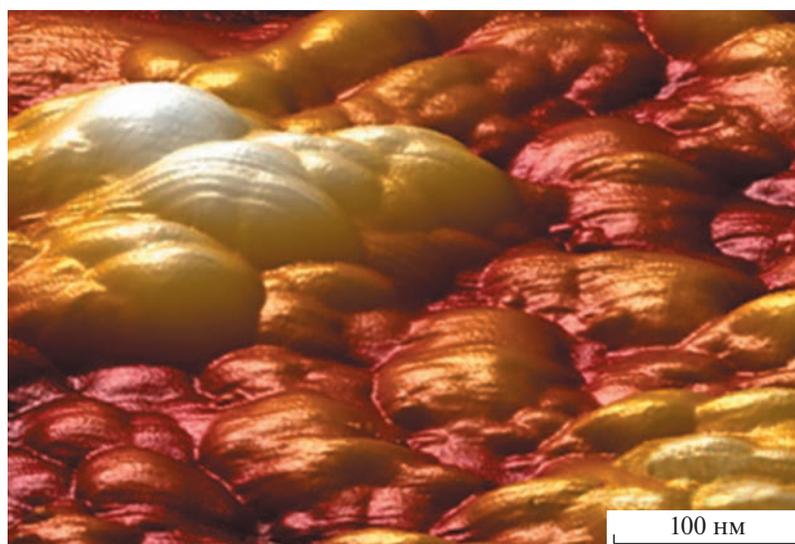


Рис. 5. Строение поверхности покрытия TiN–Cu (атомно-силовой микроскоп Multi-Mode-8).

магнетрона показывает, что при наклонном падении распыляющих ионов и прочих равных условиях обеспечивается рост коэффициента распыления медного анода магнетрона с 6 до 9 атомов на один падающий ион, при этом достигается максимальная кучность распыленных атомов меди на ростовой поверхности подложек. Новая конструкция расширяет функциональные возможности планарного магнетрона, в частности, при синтезе наноструктурированных композитных покрытий TiN–Cu. Однородная глобулярная структура ростовой поверхности с размерами глобул в пределах 50–100 нм указывает на нормальный (негранный) [13] механизм наращивания покрытия TiN–Cu. Микротвердость покрытий составляет примерно 42 ГПа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-08-00207_a и государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, научная тема № 0270-2021-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 143. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050213>
- Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. // Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 5. С. 55–112.
- Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел / Под ред. Е.С. Машковой. М.: Мир, 1989.
- Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984.
- Плетнев В.В. // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 5. С. 4–62.
- Sigmund P. // Phys. Rev. 1969. V. 184. № 2. P. 383.
- Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Семенов А.П., Батуев Б.-Ш.Ч. // ПТЭ. 1991. № 5. С. 192.
- Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63. № 10. С. 102. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/10/102>
- Yamatuna Y., Shimizu R., Shimizu H., Itoh N. // Ион оё токую (Japan). 1983. V. 26. № 2. P. 69.
- Семенов А.П., Семенова И.А., Цыренов Д.Б.-Д., Николаев Э.О. // ПТЭ. 2021. № 4. С. 44. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040261>
- Семенов А.П., Цыренов Д.Б.-Д., Семенова И.А. // ПТЭ. 2017. № 6. С. 119. <https://doi.org/10.7868/S0032816217060106>
- Семенов А.П., Белянин А.Ф., Мохосоев М.В., Тер-Маркарян А.А. // Техника средств связи. 1984. Сер. Технология производства и оборудование. Вып. 1. С. 66.