

**Планарный магнетрон с инжекцией электронов и отражающим электродом:
численное моделирование процессов функционирования***Д. Б. Золотухин*

Выполнено численное моделирование влияния отражательного электрода на ионный состав плазмы планарного магнетрона, в разрядную область которого инжектируется электронный пучок с независимыми током и энергией электронов. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что в такой конфигурации, более высокие значения концентрации ионов рабочего газа (аргона) и катода-мишени (меди) магнетрона достигаются за счет более высокой степени удержания в области генерации плазмы инжектированных электронов вследствие их частичного отражения и отклонения в тормозящем поле отражательного электрода. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальным масс-зарядовым составом ионов плазмы такого магнетрона.

Ключевые слова: планарный магнетрон, инжекция электронов, отражающий электрод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-19-24

Введение

Сильноточный планарный магнетрон является эффективным инструментом для осаждения высококачественных тонких пленок в условиях высокого вакуума [1–4]. Однако одной из известных проблем упомянутого устройства является затрудненность инициации разряда в нем в условиях пониженного давления рабочего газа. Известно, что мощные высокопроизводительные системы ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИМПП, или HiPMS в англоязычной литературе) обеспечивают возможность высокопроизводительного осаждения широкого набора покрытий в высоком вакууме практически без напуска рабочего газа [5–9], но для стабильной инициации разряда в них, как правило, все же требуется напуск некоторого количества газа, а также немалая мощность. Одним

из методов обеспечения устойчивой инициации разряда является смещение к нижнему пределу рабочего давления планарного магнетрона за счет инжекции в основную область разряда потока ускоренных электронов с независимо регулируемым током и энергией, облегчающего предварительную ионизацию рабочего газа. Такая инжекция была успешно осуществлена экспериментально, источником электронов служил тлеющий разряд с полым катодом [1]. Механизм положительного эффекта инжектированных вспомогательных электронов обусловлен дополнительной независимой ионизацией остаточного газа и паров распыленной мишени, что приводит к более высоким разрядным токам, более низким разрядным напряжениям и более низким рабочим давлениям. Эксперименты показали, что для значимого повышения эффективности функционирования магнетрона, типичная энергия инжектируемых электронов должна составлять несколько сотен электронвольт. Однако, вследствие пониженного давления газа, степень утилизации энергии инжектированного пучка на генерацию плазмы довольно незначительна. Эксперименты показали [10], что дальнейшее улучшение характеристик пла-

Золотухин Денис Борисович, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: zolotukhinden@gmail.com
Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2022 г.

© Золотухин Д. Б., 2022

нарного магнетрона с инъекцией электронов может быть реализовано за счет введения дополнительного так называемого отражательного электрода. Этот электрод отрицательно смещен относительно анода и расположен перед катодом (мишенью) с целью уменьшения потока инжектируемых электронов за пределы области генерации плазмы и, в конечном итоге, повышения эффективности использования их энергии. Вместе с тем, влияние отрицательного потенциала отражательного электрода на траектории ионов следует ожидать незначительным, так как падение напряжения между плазмой и этим электродом сконцентрировано в очень узком ионном слое, непосредственно примыкающем к электроду. Данная работа посвящена численному моделированию физических процессов в планарном магнетроне с инъекцией электронов и отражающим электродом. Исследования направлены в основном на исследование взаимосвязи отражающего электрода, концентрации и масс-зарядового состава ионов рабочего газа и атомов мишени, образующихся в такой конфигурации.

Описание основных положений численной модели

Схематичное изображение модели планарного магнетрона с инъекцией электронов и отражательным электродом изображено на рис. 1. При построении численной модели принимались следующие упрощающие положения. Считалось, что область плазмы имела форму диска диаметром $D = 50$ мм и толщиной $h = 5$ мм и была ограничена снизу торцом катода, а с краев – кольцевым анодом.

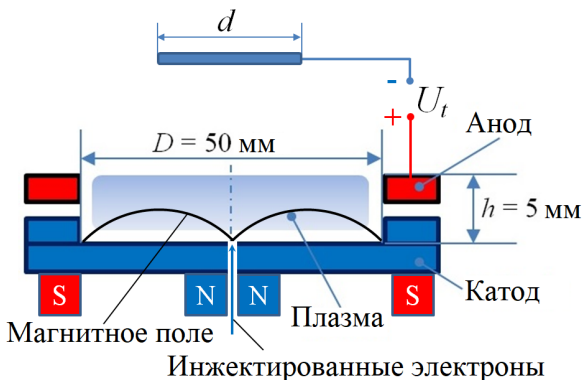


Рис. 1. Схема численной модели планарного магнетрона с инъекцией электронов

Электроны поступали в область генерации плазмы вследствие вторично-электронной эмиссии, вызванной ионной бомбардировкой материала медной мишени. Инжектируемые электроны, имеющие независимые от основного разряда параметры – ток I_s (0–100 мА) и энергию eU_s (0–500 эВ) – поступали в область разряда через осевое отверстие в мишени. Отражательный электрод диаметром $d = D/2$ располагался по центру отверстия и обладал потенциалом U_t (0–100 В), отрицательным относительно анода магнетрона. Генерация плазмы происходила вследствие ударной ионизации ускоренными в прикатодном падении напряжения U_c электронами и инжектированными электронами частиц рабочего газа (аргона) и распыленных ионной бомбардировкой атомов мишени. Электроны периферийной области разряда удерживались магнитным полем индукцией B . Считалось, что ток разряда I_d независимо устанавливался внешним источником питания. Кроме того, в модели учитывалась инъекция электронов вспомогательного разряда регулируемым током I_s и энергией eU_c , определяемой соответствующим катодным падением напряжения.

В качестве основного уравнения для анализа влияния потенциала отражательного электрода на концентрацию ионных компонент плазмы $n_{i\alpha}$ использовалось уравнение баланса ионов для соответствующих компонент:

$$n_{i\alpha} = \frac{I_d + I_s}{(1 + \gamma_{ie}) S_t 0,4e\sqrt{2kT_e/M_x}} \times (n_\alpha \sigma_{i\alpha} [U_c/W_{i\alpha}]) h, \quad (1)$$

где $\alpha = \{\text{Cu}, \text{Ar}\}$ – род вещества в газообразной фазе; $\gamma_{ie} = 0,1$ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии [11]; S_t – площадь катода-мишени;

$M_x = 2M_{\text{Cu}} / \left((M_{\text{Ar}}/M_{\text{Cu}})^{2/3} + (M_{\text{Cu}}/M_{\text{Ar}})^{2/3} \right)$ – приведенная масса, зависящая от массы атома мишени M_{Cu} и рабочего газа M_{Ar} [12]; e – элементарный заряд; T_e – температура электронов в плазме; n_α , $\sigma_{i\alpha}$, $W_{i\alpha}$ – концентрация нейтральных молекул, сечение их ионизации электронным ударом и энергия образования ион-электронной пары ($W_{i\text{Ar}} = 30$ эВ и $W_{i\text{Cu}} = 15,44$ эВ) [13] вещества рода α , соответственно. Приведенная масса выбрана для

упрощения зависимости массы иона плазмы от ее состава и описывает некоторую «усредненную» массу иона между массами ионов меди и аргона. Числитель уравнения (1) пропорционален выходу ионизации разрядными и инжектированными электронами в объеме, занимаемом плазмой [13], а множитель U_c/W_{ia} учитывает, что электроны, набравшие энергию в прикатодном падении напряжения, полностью затрачивают свою энергию на ионизацию вследствие своей замагниченности. Уравнение (1) записано в предположении, что концентрация ионов меди или аргона устанавливается вследствие баланса их генерации за счет ионизации (токами разряда и инжектированных электронов) нейтралов аргона и расплывенных атомов мишени, и ухода ионов с границы плазмы, определяемого по известной формуле Бома.

Влияние потенциала отражательного электрода U_t было учтено введением в уравнение (1) безразмерного коэффициента η , который по своему физическому смыслу является коэффициентом отражения от потенциала отражательного электрода U_t электронов вспомогательного разряда, инжектированных через отверстие в мишени. Этот коэффициент можно записать как:

$$\eta = j_{sref} / j_{s0} = (j_{s0} - j_{spass}) / j_{s0}, \quad (2)$$

где $j_{sref} = (en_s \sqrt{2U_s/m_e} - en_s \sqrt{2(U_s - U_t)/m_e})$ – поток вспомогательных электронов, отраженных отражательным электродом и вернувшихся в область генерации плазмы; $j_{s0} = en_s \sqrt{2U_s/m_e}$ – поток электронов, инжектированных через отверстие в мишени; $j_{spass} = en_s \sqrt{2(U_s - U_t)/m_e}$ – поток электронов, пролетевших область генерации плазмы и выведенных из процессов генерации плазмы вследствие их полного поглощения отражательным электродом. С учетом низких рабочих давлений газа (менее 1 Па), и, следовательно, редких соударений с частицами газа, энергия пучка инжектированных электронов определяется ее начальным значением и потенциалом отражательного электрода.

Считая, что концентрация вторичных электронов n_s не меняется, выражение (2) можно переписать так, чтобы оно зависело только от соответствующих потенциалов:

$$\eta = (\sqrt{U_s} - \sqrt{U_s - U_t}) / \sqrt{U_s}. \quad (3)$$

Добавив коэффициент η в выражение (1), получаем окончательный вид уравнения:

$$n_{ia} = \frac{I_d + I_s(1 + \eta)}{0,4(1 + \gamma_{ie})S_t \times e \sqrt{2kT_e/M_x}} \times (n_\alpha \sigma_{ia} [U_c/W_{ia}])h. \quad (4)$$

Уравнение (4) решалось численно методом последовательных приближений, с учетом баланса заряженных частиц в плазме $n_e = n_{iAr} + n_{iCu}$, где концентрация плазменных электронов n_e определялась из баланса между их генерацией в плазме и уходом на анод вследствие дрейфа, характеризующегося подвижностью $\mu_{eB} = \mu_e / (1 + \mu_e^2 B^2)$, поперек силовых линий магнитного поля (где μ_e – подвижность электронов без магнитного поля).

Результаты моделирования и их сравнение с экспериментом

Основываясь на экспериментальных данных, можно заметить, что типичные значения напряжения горения магнетронного разряда составляют менее 500 В, а энергия инжектируемых электронов может устанавливаться независимо, и вполне может быть сопоставимой с этим напряжением в энергетических единицах [1, 10]. Таким образом, потенциал отражательного электрода способен влиять на поток инжектированных электронов, но практически не влияет на их способность ионизовать плазмообразующую среду. В уравнении (4) учтено влияние отражательного потенциала на поток инжектированных электронов, но вместе с тем ионизируемость нейтралов определяется катодным напряжением U_c . Результат расчета концентрации ионов аргона и меди от потенциала отражательного электрода приведен на рис. 2.

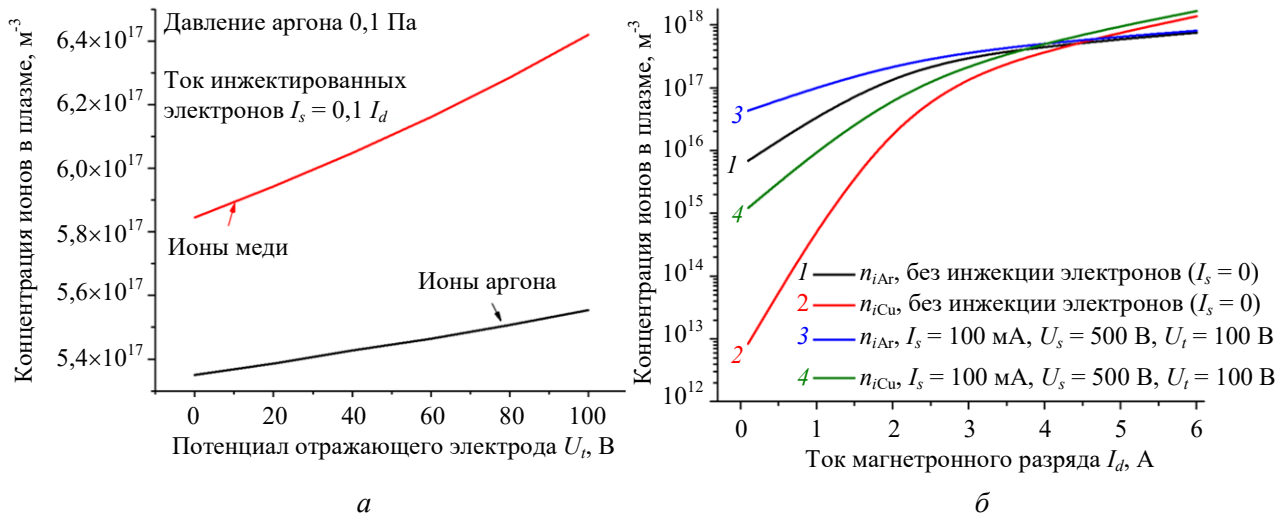


Рис. 2. Расчетные зависимости: а – концентрации ионов аргона и меди от потенциала отражательного электрода при фиксированном давлении аргона и тока инжектируемых электронов; б – концентрации ионов аргона и меди от разрядного тока, в режимах без и с инжекцией электронов

Из рис. 2а следует, что увеличение отражательного потенциала способствует удержанию электронов в области генерации плазмы, что ведет к росту концентрации ионов как газа, так и металла. В зависимости от тока разряда рис. 2б, при его значениях близких к нулю, в плазме доминируют ионы аргона в обоих режимах – как без, так и с инжекцией электронов. При максимальных токах разряда,

концентрация ионов меди в плазме превышает концентрацию ионов аргона, причем максимальные значения ионов меди наблюдаются именно в режиме с инжекцией электронов и при наличии отражательного электрода. Положительное влияние отражательного электрода на долю ионов меди наблюдается при любых разрядных токах (рис. 3).

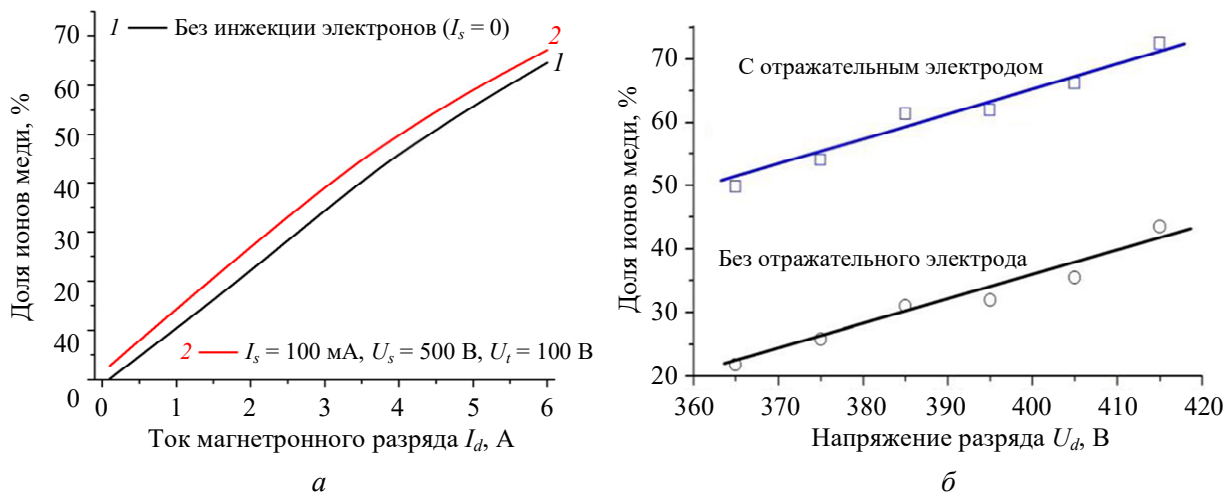


Рис. 3. а – расчетная зависимость доли ионов меди от разрядного тока, в режимах без и с инжекцией электронов и отражательным электродом; б – экспериментальная зависимость доли ионов меди от напряжения (прямо пропорционального току) разряда, в режимах без и с отражательным электродом. Давление аргона 0,2 Па

Смоделированные закономерности удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Так, из рис. 3 видно, что использование отражательного электрода ве-

дет к более высоким значениям процентного содержания ионов меди в плазме. Следует отметить хорошее согласие расчетных и экспериментальных максимальных значений (около

70 %) долей ионов меди в плазме. Следует отметить, что в эксперименте отражательный электрод был способен нагреваться до довольно высоких температур (несколько сотен градусов Цельсия), однако ни элементный анализ осажденных покрытий, ни масс-спектр ионов и нейтралов плазмы не показали наличия частиц материала отражательного электрода. Этот факт является аргументом в пользу того, что именно мишень-катод является основным источником ионов металла в плазме, вместе с тем, при повышении мощности установки, естественно, необходимо будет обеспечивать отдельное охлаждение отражательного электрода.

Заключение

Численное моделирование процессов в планарном магнетроне с инжекцией электронов показало, что инжекция дополнительных электронов в совокупности с применением отражательного электрода приводит к максимальным значениям концентрации ионов как аргона, так и меди, при всех значениях разрядного тока, по сравнению с режимом функционирования планарного магнетрона без инжекции и отражательного электрода. Доля ионов меди в плазме растет быстрее доли ионов аргона как с увеличением разрядного тока, так и тока инжектируемых электронов, чья доля в генерации ионов повышается из-за возврата некоторой части их в область генерации плазмы благодаря отражательному электроду.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 21-19-00136).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shandrikov M. V., Bugaev A. S., Oks E. M., Ostanin A. G., Vizir A. V., Yushkov G. Yu. // *Vacuum*. 2019. Vol. 159. P. 200.
2. Gao B., Hu J., Tang S., Xiao X., Chen H., Zuo Z., Qi Q., Peng Z., Wen J., Zou D. // *Advanced Science*. 2021. № 8. P. 2102081.
3. Rossouw A., Kristavchuk O., Olejniczak A., Bode-Aluko C., Gorberg B., Nechaev A., Petrik L., Perold W., Apel P. // *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 725. P. 138641.
4. Mao L., Geng Y., Cao Y., Yan Y. // *Vacuum*. 2021. Vol. 185. P. 109999.
5. Mitin V. S., Sharipov E. I., Mitin A. V. // *Surface Engineering*. 2006. Vol. 22. № 1. – 5 p.
6. Митин А. В., Митин В. С., Шарипов Э. И. // *Нанотехника*. 2004. Т. 1. С. 63.
7. Манкелевич Ю. А., Митин А. В., Митин В. С., Паль А. Ф., Рахимова Т. В., Рябинкин А. Н., Серов А. О., Лучкин С. Ю. // *Письма ЖТФ*. 2012. Т. 38. № 4. С. 60.
8. Ширяев С. А., Атаманов М. В., Гусева М. И., Мартыненко Ю. В., Митин А. В., Митин В. С., Московкин П. Г. // *ЖТФ*. 2002. Т. 72. № 2. С. 99.
9. Высикайло Ф. И., Митин В. С., Митин А. В., Краснобаев Н. Н., Беляев В. В. // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 6. С. 594.
10. Shandrikov M. V., Artamonov I. D., Bakeev I. Yu., Bugaev A. S., Oks E. M., Vizir A. V., Yushkov G. Yu. // *Vacuum*. 2021. Vol. 192. P. 110487.
11. Seiler H. // *J. Appl. Phys.* 1983. Vol. 54. № 11.4. P. R1.
12. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. – New York: John Wiley & Sons, 2005.
13. Levitsky S. M. *Collection of Problems and Calculations on Physical Electronics: Textbook for Higher Educational Institutions*. – Kiev: Kiev University Publishing Company, 1964.

PACS: 52.50.Dg

Planar magnetron with electron injection and reflective electrode: numerical simulation of functioning processes

D. B. Zolotukhin

Institute of High Current Electronics SB RAS
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com

Received June 22, 2022

In this work, we performed numerical simulation of the effect of a reflective electrode on the ionic composition of the planar magnetron plasma, in which discharge region an electron

beam with independently-controlled electron current and energy is injected. The results of numerical simulation indicate that in such a configuration, higher concentrations of ions of the working gas (argon) and the target cathode (copper) of the magnetron are achieved due to a higher degree of confinement in the region of plasma generation of injected electrons due to their partial reflection and deflection in retarding field of the reflective electrode. The simulation results agree satisfactorily with the experimental mass-charge composition of the plasma ions of such a magnetron.

Keywords: planar magnetron, electron injection, reflecting electrode.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-19-24

REFERENCES

1. M. V. Shandrikov, A. S. Bugaev, E. M. Oks, A. G. Ostanin, A. V. Vizir, and G. Yu. Yushkov, *Vacuum* **159**, 200 (2019).
2. B. Gao, J. Hu, S. Tang, X. Xiao, H. Chen, Z. Zuo, Q. Qi, Z. Peng, J. Wen, and D. Zou, *Advanced Science*, No. 8, 2102081 (2021).
3. A. Rossouw, O. Kristavchuk, A. Olejniczak, C. Bode-Aluko, B. Gorberg, A. Nechaev, L. Petrik, W. Perold, and P. Apel, *Thin Solid Films* **725**, 138641 (2021).
4. L. Mao, Y. Geng, Y. Cao, and Y. Yan, *Vacuum* **185**, 109999 (2021).
5. V. S. Mitin, E. I. Sharipov, and A. V. Mitin, *Surface Engineering* **22** (1), 1–5 (2006).
6. A. V. Mitin, V. S. Mitin, and E. I. Sharipov, *Nanotechnika* **1**, 63 (2004) [in Russian].
7. Yu. A. Mankelevich, A. V. Mitin, V. S. Mitin, A. F. Pal, T. V. Rakhimova, A. N. Ryabinkin, A. O. Serov, and S. Yu. Luchkin, *Technical Physics Letters* **38** (4), 60 (2012) [in Russian].
8. S. A. Shiryayev, M. V. Atamanov, M. I. Guseva, Yu. V. Martynenko, A. V. Mitin, V. S. Mitin, and P. G. Moscovkin, *Technical Physics* **72** (2), 99 (2002) [in Russian].
9. F. I. Vysikailo, V. S. Mitin, A. V. Mitin, N. N. Krasnobaev, and V. V. Belyaev, *Usp. Prikl. Fiz.* 3 (6), 594 (2015) [in Russian].
10. M. V. Shandrikov, I. D. Artamonov, I. Yu. Bakeev, A. S. Bugaev, E. M. Oks, A. V. Vizir, and G. Yu. Yushkov, *Vacuum* **192**, 110487 (2021).
11. H. Seiler, *J. Appl. Phys.* **54** (11.4), R1 (1983).
12. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. (John Wiley & Sons, New York, 2005).
13. S. M. Levitsky, *Collection of Problems and Calculations on Physical Electronics: Textbook for Higher Educational Institutions*. (Kiev University Publishing Company, Kiev, 1964).