

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

С.В. Кладько, Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

poluekt@mgul.ac.ru

Приведены результаты влияния магнитного поля на характеристики плазмы в магнетронном разряде с полым катодом. Магнитное поле в данной установке имеет сложную геометрию силовых линий, поскольку состоит из множества постоянных магнитов и электромагнита. Проведены расчеты геометрии магнитного поля, которые были использованы в экспериментах. Показано, что величина и геометрия магнитного поля оказывают сильное влияние на параметры плазмы.

**Ключевые слова:** магнетрон с полым катодом, расчет магнитного поля, программа FEMM

**Ссылка для цитирования:** Кладько С.В., Полуэктов Н.П., Усатов И.И. Влияние магнитного поля на характеристики плазмы в магнетронном разряде с полым катодом // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-125-130

В лаборатории кафедры Кб «Высшая математика и физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) создан источник высокоплотной плазмы на основе магнетрона с полым катодом (МПК), который применяется для осаждения пленок различных материалов методом распыления [1]. При использовании данного метода в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. Особенности этого разряда являются высокая концентрация плазмы (более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> при давлении 0,1...3,0 Па), создаваемая в большом объеме (десятки сантиметров кубических), низкая (10...50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку. Такие параметры плазмы позволяют ионизовать распыленные атомы металла на их пути от мишени к подложке. Пленки, полученные в результате осаждения ионов, имеют более высокие плотность, адгезию, твердость и гладкость поверхности.

Для еще большего повышения степени ионизации потока атомов мишени с начала 2000 г. началось исследование магнетронов, в которых стационарный источник питания заменяется на импульсный-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум силы тока 100...1000 А) при длительности разряда  $\tau = 10...300$  мкс, периоде разряда  $T = 100...500$  Гц, коэффициенте заполнения  $\tau/T$  менее 10 %. Плотность ионного тока на мишени превышала 1 А/см<sup>2</sup>, что на порядок больше, чем в стационарных магнетронах. В зарубежной литературе этот тип разряда называют HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [2–5]. В нашей установке мишень была изготовлена из графита с целью получения алмазоподобных пленок (АПП), которые представляют собой универсальный материал, демонстрирующий превосходные меха-

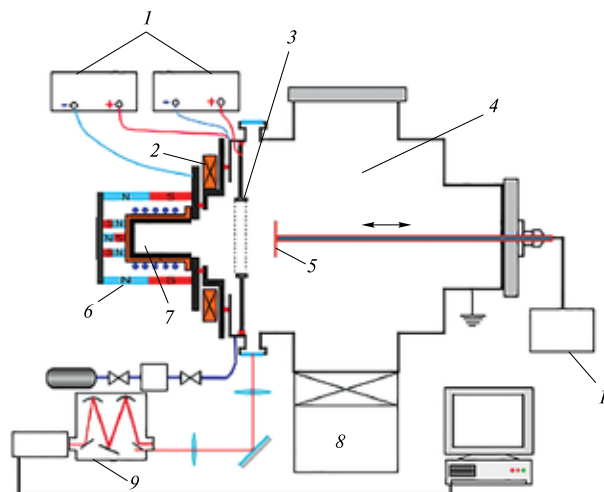
нические, электрические и оптические свойства [6, 7]. Благодаря этим свойствам АПП широко используются для защиты поверхностей в режущих инструментах [8], магнитных накопителях [9], биомедицинских устройствах [10], просветляющих покрытиях и оптических сенсорах [11]. Свойства тонких АПП определяются конфигурацией связи (доля гибридизации sp<sup>3</sup> против sp<sup>2</sup>) ее атомов углерода. Образование АПП на подложке происходит, когда ион углерода приходит на нее с энергией более 35 эВ. Таким образом, сначала необходимо ионизовать атом углерода, вылетевший из мишени, а затем ускорить его до энергии порядка 100 эВ. Известно, что атом углерода ионизировать трудно, даже в HiPIMS разряде [12–14]. Это связано с тем, что энергия ионизации атома углерода  $E_{\text{ион}} = 11,3$  эВ, тогда как для металлов  $E_{\text{ион}}$  находится в диапазоне 6...8 эВ. Сечение ионизации атома углерода при столкновении с электронами также значительно меньше, чем у металлов. В магнетронном разряде с плоским катодом область плазмы с концентрацией  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> находится на расстоянии нескольких сантиметров от катода. В МПК объем плазмы с высокой концентрацией электронов на порядок больше, поэтому вероятность ионизации распыленных атомов углерода увеличивается и улучшаются условия для получения АПП.

### Цель работы

Цель работы — исследование влияния величины и геометрии магнитного поля на параметры плазмы в МПК.

### Объект исследования

Схема установки представлена на рис. 1. Катод МПК представляет собой закрытый с одной стороны медный цилиндр (диаметр 80 мм, длина 55 мм), охлаждаемый водой. В него вставлена



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — блоки питания; 2 — электромагнит; 3 — анодное кольцо; 4 — вакуумная камера; 5 — подложка; 6 — магниты; 7 — полый катод; 8 — насос; 9 — монохроматор

**Fig. 1.** The experimental setup: 1 — power supplies; 2 — electromagnet; 3 — anode ring; 4 — vacuum chamber; 5 — substrate; 6 — magnets; 7 — hollow cathode; 8 — pump; 9 — monochromator

цилиндрическая мишень из графита внутренним диаметром 60 мм, длиной 60 мм. Магнитная система в данном МПК сложная. Она состоит из постоянных магнитов, расположенных вокруг цилиндрической части и за дном мишени, и электромагнита, магнитное поле которого направлено навстречу полю постоянных магнитов. Магнитное поле создается столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода. Концы столбиков соединены кольцевыми железными магнитопроводами. Вблизи выходного сечения МПК установлен электромагнит, поле которого направлено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Магнитная пробка, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Характеристики плазмы МПК сильно зависят от конфигурации магнитного поля. Разряд происходит при низком давлении 0,5...3 Па. Магнитное поле удерживает значительную часть электронов плазмы вблизи поверхности катода. Плазма вытекает из полого катода вдоль его оси в виде узкой струи диаметром 2 см, т. е. неоднородной по радиусу. Подложка, на которую необходимо осаждать пленку, имеет диаметр 6 см, поэтому эту струю необходимо расширить. Магнитное поле электромагнита расширяет поток плазмы и, изменяя ток электромагнита, можно регулировать радиальную однородность плазмы вблизи подложки.

Таким образом, качество получаемых пленок зависит от параметров плазмы, которые в свою очередь, определяются геометрией силовых ли-

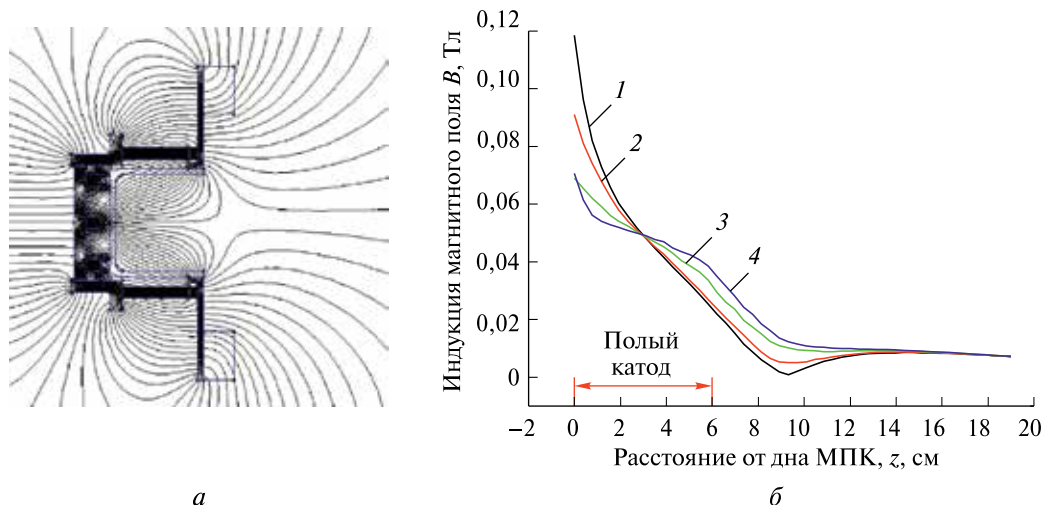
ний магнитного поля. В частности, чем больше магнитное поле внутри полого катода, тем выше концентрация плазмы и вероятность ионизации распыленных атомов углерода. Чем больше ионов углерода, тем выше качество АПП. Однако большое магнитное поле уменьшает напряжение разряда, соответственно снижается коэффициент распыления (количество атомов мишени, выбиваемых одним ионом), а значит, и скорость осаждения. Конфигурация магнитных силовых линий влияет на траекторию движения замагниченных электронов, а вследствие амбиполярной диффузии, также ионов углерода на подложку. Данные рассуждения показывают важную зависимость величины и геометрии магнитного поля на параметры АПП.

Геометрию и величину магнитного поля можно изменять количеством постоянных магнитов, а также силой тока электромагнита. Конфигурация и величина магнитного поля для некоторого набора постоянных магнитов была измерена с помощью трехмерного датчика Холла, созданного в лаборатории, но это потребовало значительных затрат времени. Использование компьютерных программ расчета магнитного поля позволяет значительно быстрее исследовать различные варианты полей.

## Результаты и обсуждение

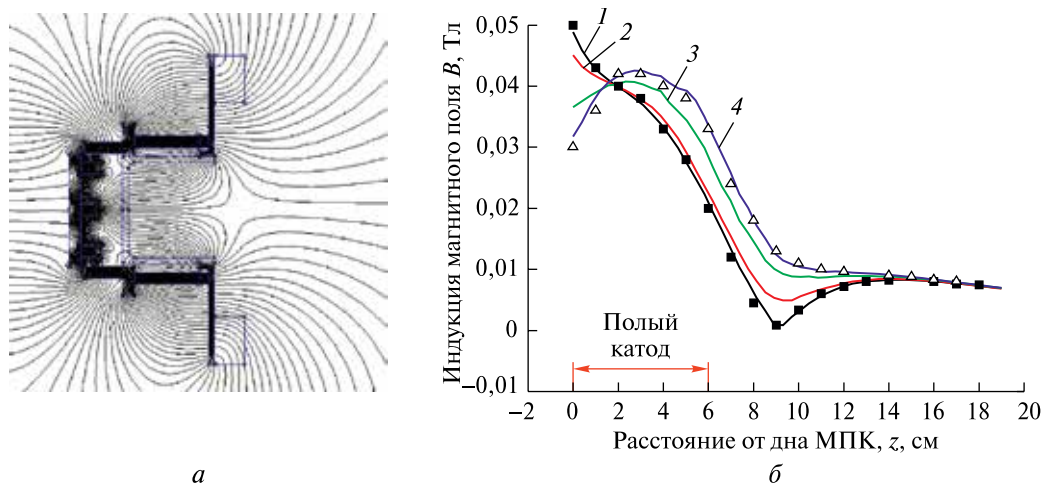
Для расчета магнитного поля была выбрана программа FEMM 4.2 [15, 16] как наиболее надежная, доступная, простая, к тому же, поддерживается Lua-скриптингом. На рис. 2 приведен расчет магнитного поля в диаметральной плоскости, когда постоянные магниты, установленные позади дна полого катода (торцевые магниты) максимально придвинуты к катоду и оказывают существенное влияние на конфигурацию магнитного поля внутри полого катода. На рис. 2, а представлена конфигурация магнитных силовых линий, а на рис. 2, б — распределение магнитной индукции на разных радиусах. Из рис. 2, б видно, что минимум индукции  $B$  находится на расстоянии 9,5 см, т. е. 3,5 см от среза катода.

На рис. 3 представлен расчет подобных характеристик, но в этом случае торцевые магниты отодвинуты на расстояние 1,5 см от катода и не оказывают влияния на конфигурацию магнитного поля внутри полого катода. Обращает на себя внимание факт, что вблизи дна полого катода индукция магнитного поля в этом случае уменьшается в 2 раза. Из рис. 3, б следует, что минимум магнитного поля немного смещается ближе к катоду — на расстояние 3 см от среза катода. Результаты измерений трехмерного датчика Холла хорошо совпадают с результатами расчета.



**Рис. 2.** Расчет магнитного поля, когда торцевые магниты расположены вблизи дна катода: *a* — конфигурация магнитных силовых линий; *б* — распределение индукции  $B = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$  на разных радиусах,  $R$ , см: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 2; 4 —  $R = 2,5$ ;  $I_{эл} = 1$  А

**Fig. 2.** Calculation of the magnetic field when the end magnets are located near the bottom of the cathode: *a* — configuration of magnetic field lines; *b* — distribution of magnetic induction  $B = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$  at different radii,  $R$ , cm: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 2,5;  $I_{el} = 1$  A

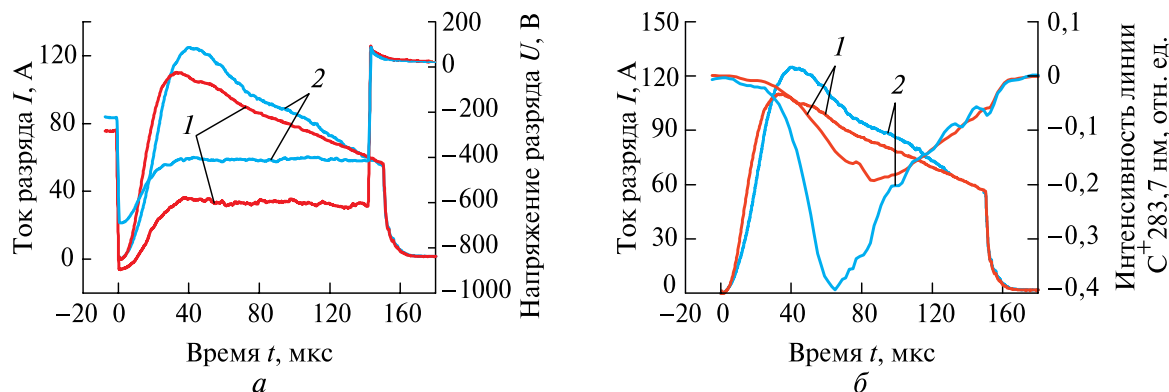


**Рис. 3.** Расчет магнитного поля, когда торцевые магниты отодвинуты на 1,5 см от дна катода: *a* — конфигурация магнитных силовых линий; *б* — распределение индукции  $B = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$  на разных радиусах,  $R$ , см: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 2,5;  $I_{эл} = 1$  А; без торцевых магнитов; ■, Δ — результаты измерений  $B$  с помощью датчика Холла

**Fig. 3.** Calculation of the magnetic field when the end magnets are moved 1,5 cm from the bottom of the cathode: *a* — configuration of magnetic field lines; *b* — distribution of magnetic induction  $B = \sqrt{B_z^2 + B_r^2}$  at different radii,  $R$ , cm: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 2; 4 — 2,5;  $I_{el} = 1$  A; without bottom magnets; ■, Δ — the measurement results via the Hall sensor

Осциллограммы разрядного тока, напряжения и интенсивности спектральной линии  $C^+ 383,7$  нм иона углерода, показывают влияние магнитного поля торцевых магнитов на эти характеристики (рис. 4). В случае, когда торцевые магниты придвинуты (см. рис. 2), пик силы тока возрастает от 118 до 125 А, а напряжение уменьшается с 600 до 400 В. Торцевые магниты увеличивают магнитное поле вблизи дна, удерживают больше электронов, и концентрация плазмы внутри и снаружи полого катода увеличиваются. На рис. 4, б

приведена интенсивность спектральной линии иона углерода  $C^+ 283,7$  нм, измеренная на расстоянии 12 см от выходного сечения магнетрона. В результате подключения торцевых магнитов увеличивается вероятность ионизации расплывших атомов мишени и интенсивность спектральной линии иона возрастает в 2 раза (синяя линия). Кроме того, с торцевыми магнитами изменяется скорость ионов, выходящих из полого катода — пик интенсивности иона углерода достигается на 20 мкс быстрее, чем без них (65 и 85 мкс соответственно).



**Рис. 4.** Влияние магнитного поля нижних магнитов на силу тока  $I$ , напряжение  $U$  разряда (а) и интенсивность спектральной линии иона углерода  $C^{+} 283,7$  нм (б); 1 — без нижних магнитов, 2 — с нижними магнитами;  $P = 2,66$  Па,  $I_{эл} = 1$  А

**Fig. 4.** Effect of the bottom magnets on discharge current  $I$  and voltage  $U$  (a) and on spectral line intensity of the carbon ion  $C^{+} 283,7$  nm (b); 1 — without the bottom magnets, 2 — with the bottom magnets;  $P = 2,66$  Pa,  $I_{el} = 1$  A

Зондовые измерения показали, что вблизи выходного сечения полого катода имеется сильное электрическое поле

$$E_z = -\frac{\partial U_p}{\partial z},$$

где  $U_p$  — потенциал плазмы.

Это поле ускоряет электроны, которые тянут за собой ионы вследствие амбиполярной диффузии. Дополнительным источником ускорения электронов может служить расходящиеся силовые линии магнитного поля. Тогда на электроны вдоль продольной оси  $z$  действует сила [17]:

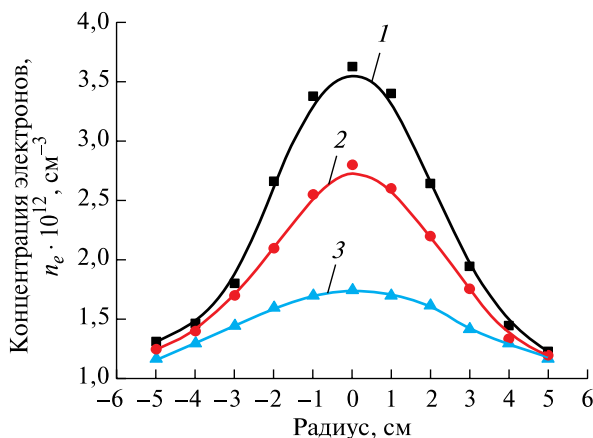
$$F_z = -\frac{m_e v_{\perp}^2}{2B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z}.$$

Как следует из рис. 2, б и 3, б, градиент магнитного поля по оси  $z$  значительно увеличивается, когда торцевые магниты придвинуты к катоду.

На рис. 5 показано влияние магнитного поля электромагнита на поток плазмы в области расположения подложки, а также представлены измеренная зондом Лэнгмюра концентрация электронов для момента времени 60 мкс импульсного разряда с максимальным значением силы тока 160 А. Измерения проводились на расстоянии 12 см от магнетрона при разных токах электромагнита  $I_{эл}$ . Магнитное поле электромагнита направлено навстречу полю постоянных магнитов. Возрастание силы тока электромагнита, а следовательно, его поля значительно повышает радиальную однородность плазмы вблизи подложки. Однако увеличение радиальной однородности сопровождается уменьшением концентрации плазмы. Максимальное значение концентрации уменьшается в 2 раза при повышении силы тока электромагнита от 0 до 1 А.

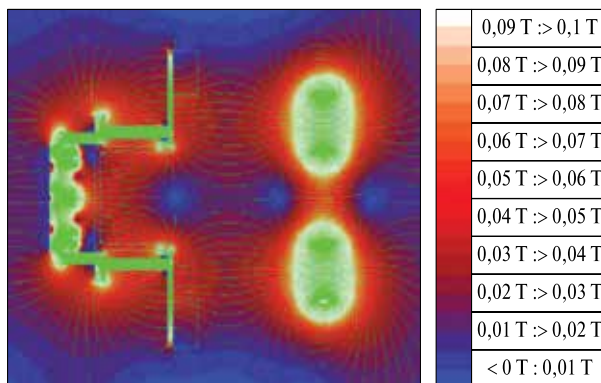
Для повышения однородности плазмы без значительного уменьшения ее концентрации за

подложкой, находящейся на расстоянии 13 см от МПК, был установлен кольцевой магнит. Распределение магнитных силовых линий приведено на рис. 6.

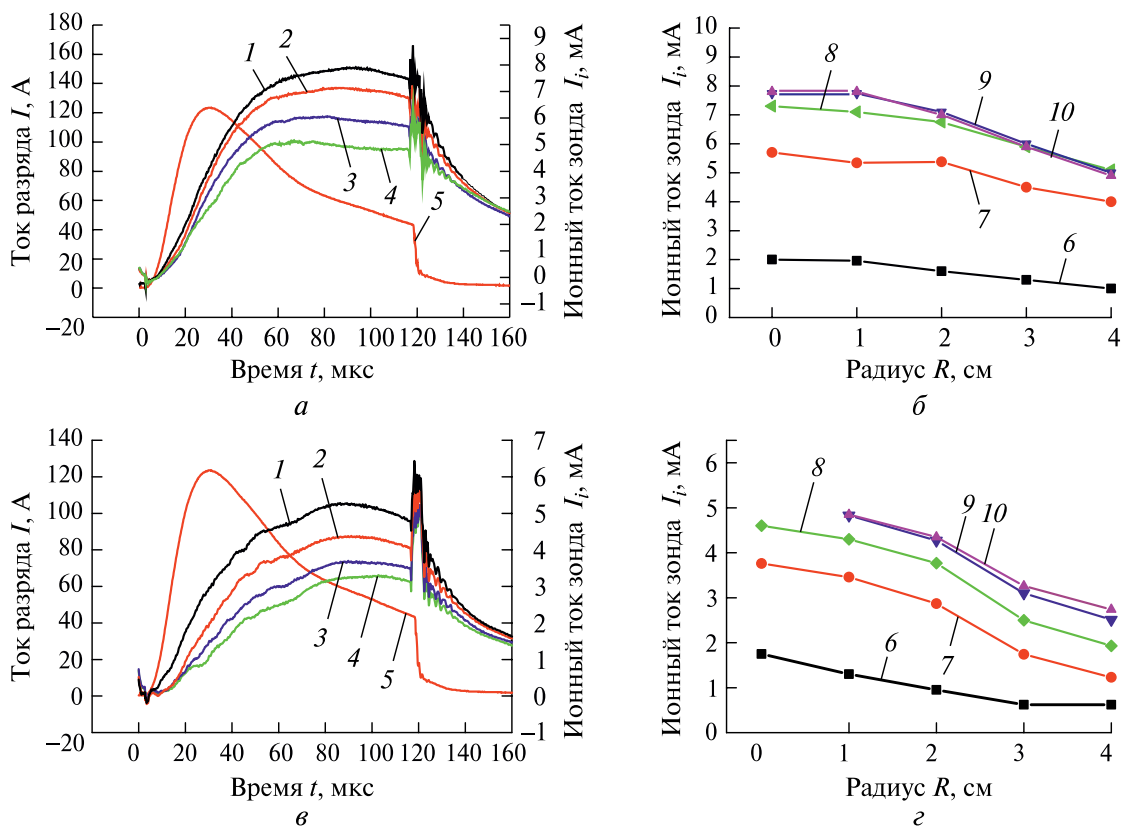


**Рис. 5.** Радиальное распределение концентрации электронов при разных значениях силы тока электромагнита  $I_{эл}$ , А: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 1;  $z = 12$  см

**Fig. 5.** The radial distribution of electron density at different currents of the electromagnet  $I_{el}$ , A: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 1;  $z = 12$  cm



**Рис. 6.** Магнитное поле с кольцевым магнитом за подложкой  
**Fig. 6.** Magnetic field with a ring magnet behind the substrate



**Рис. 7.** Влияние магнитного кольца за подложкой на поток плазмы перед ней: *а, в* — динамика ионного тока насыщения  $I_i$  на различных радиусах,  $R$ , см,  $z = 12$  см: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4; 5 — ток разряда  $I_p$ , А; *б, з* — изменение радиального распределения  $I_i$  в течение импульсного разряда, мкс: 6 — 20; 7 — 40; 8 — 60; 9 — 80; 10 — 100; *а, б* — с магнитным кольцом; *в, з* — без магнитного кольца;  $I_{эл} = 0,7$  А

**Fig. 7.** Effect of the magnetic ring behind the substrate on the plasma flow to it: *а, в* — dynamics of the ion saturation current  $I_i$  at different radii,  $R$ , cm, for  $z = 12$  cm: 1 — 0; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4; 5 — discharge current  $I_p$ , А; *б, з* — temporal evolution of radial ion current distribution,  $\mu$ s: 6 — 20; 7 — 40; 8 — 60; 9 — 80; 10 — 100; *а, б* — with a magnetic ring; *в, з* — without a magnetic ring;  $I_{el} = 0,7$  А

Изменение потока плазмы, приходящего на подложку представлено на рис. 7. Динамика ионного тока насыщения  $I_i$  определена на различных радиусах (см. рис. 7, *а, в*). Ионный ток измерялся зондом на расстоянии 12 см от магнетрона (1 см перед подложкой), напряжение на зонде  $U_3 = -60$  В. Измерения проводились и с кольцевым магнитом (рис. 7, *а*), и без него (рис. 7, *в*). По полученным из рис. 7, *а, в* измерениям определено, как изменяется радиальное распределение ионного тока (плазмы) в течение импульсного разряда (рис. 7, *б, з*). Без кольцевого магнита однородность плазмы не превышает 60 %, а с кольцевым магнитом достигает 85 % на диаметре 6 см. Кроме того, с кольцевым магнитом концентрация плазмы увеличивается в 1,5 раза. Концентрации плазмы в МПК превышает  $10^{12}$  см $^{-3}$  на расстоянии 12 см от мишени, что на порядок больше, чем в магнетронном разряде с плоским катодом. Спектральные измерения показывают сильные линии ионов углерода, что создает возможности для получения АПП с улучшенными характеристиками.

## Выводы

Проведено моделирование различных конфигураций магнитного поля установки на основе магнетронного разряда с полым катодом. Магнитная система данной установки сложная, так как состоит из многих постоянных магнитов и электромагнита. Рассчитанные геометрии магнитного поля были использованы в экспериментальных исследованиях. Измерения показали, что величина и конфигурация магнитного поля оказывают сильное влияние на параметры плазмы. Сложная магнитная система дает возможность исследовать множество вариантов ее геометрии и выбрать оптимальную под определенную задачу.

## Список литературы / References

- [1] Tsar'gorodtsev Yu.P., Poluektov N.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kozlovskaya E.P., Amelkin O.O. Study of Metal Atom Ionization in a Hollow-Cathode Magnetron. Plasma Physics Reports, 2019, v. 45, no.6, pp. 558–567.
- [2] Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. Plasma Sources Sci. Technol, 2005, v. 14, pp. 525–531.

- [3] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, v. 205, pp. 1–9.
- [4] Hecimovic A. Anomalous cross-B field transport and spokes in HiPIMS plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, v. 49, pp. 1801–1806.
- [5] Ramana P., Shchelkanov I.A., McLain J., Ruzic D.N. High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2015, v. 33A, pp. 031304 (1–10).
- [6] Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Mater. Sci. Eng.*, 2002, v. 37R, pp. 129–281.
- [7] Erdemir A., Donnet C.J. Tribology of diamond-like carbon films: Recent progress and future prospects. *Phys. D Appl. Phys.*, 2006, v. 39, p. 311–327.
- [8] Tillmann W., Vogli E., Hoffmann F. Wear-resistant and low-friction diamond-like-carbon (DLC)-layers for industrial tribological applications under humid conditions. *Surf. Coat. Technol.*, 2009, v. 204, p. 1040.
- [9] Ferrari A.C. Diamond-like carbon for magnetic storage disks. *Surf. Coat. Technol.*, 2004, v. 180–181, p. 190.
- [10] Stüber M., Niederberger L., Danneil F., Leiste H., Ulrich S., Welle A., Marin M., Fischer H. Surface Topography, Surface Energy and Wettability of Magnetron-Sputtered Amorphous Carbon (a-C) Films and Their Relevance for Platelet Adhesion. *Adv. Eng. Mater.*, 2007, v. 9, pp. 1114–1122.
- [11] Patsalas P. Optical properties of amorphous carbons and their applications and perspectives in photonics. *Thin Solid Films*, 2011, v. 519, pp. 3990–3996.
- [12] Aijaz A., Sarakinos K., Lundin D., Brenning N., Helmersson U. A strategy for increased carbon ionization. in magnetron sputtering discharges. *Diam. Relat. Mater.*, 2012, v. 23, pp. 1–4.
- [13] Anders A., Andersson J., Ehiasarian A. High power impulse magnetron sputtering: Current-voltage-time characteristics indicate the onset of sustained self-sputtering. *J. Appl. Phys.*, 2007, v. 102, pp. 113303.
- [14] Ganesan R., McCulloch D., Marks N.A., Tucker M.D., Partridge J.G., Bilek M.M., McKenzie D.R. Synthesis of highly tetrahedral amorphous carbon by mixed-mode HiPIMS sputtering. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, v. 48, pp. 442001.
- [15] Быковская Л.В., Быковский В.В., Сурков Д.В. Моделирование электрических и магнитных полей в программе FEMM. Оренбург: ОГУ, 2019. 100 с. Bykovskaya L.V., Bykovskiy V.V., Surkov D.V. *Modelirovanie elektricheskikh i magnitnykh poley v programme FEMM* [Simulation of electric and magnetic fields in the FEMM program]. Orenburg: OSU, 2019. 100 p.
- [16] Байда И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2015, 147 с. Bayda I. *Raschet elektromagnitnykh i teplovykh poley s pomoshch'yu programmy FEMM* [Calculation of electromagnetic and thermal fields using the FEMM program]. Kharkov: Publishing house of NTU «KHPi», 2015, 147 p.
- [17] Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994, 757 p.

## Сведения об авторах

**Кладько Стефан Валентинович** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [omicronpsi@mail.ru](mailto:omicronpsi@mail.ru)

**Полужтков Николай Павлович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [poluekt@mgul.ac.ru](mailto:poluekt@mgul.ac.ru)

**Усатов Игорь Игоревич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [caf-physics@mgul.ac.ru](mailto:caf-physics@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 26.05.2021.

Принята к публикации 01.07.2021.

## EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON PLASMA CHARACTERISTICS IN MAGNETRON DISCHARGE WITH HOLLOW CATHODE

**Klad'ko S.V., Poluektov N.P., Usatov I.I.**

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

[poluekt@mgul.ac.ru](mailto:poluekt@mgul.ac.ru)

The effect of magnetic field on plasma characteristics in a magnetron with a hollow cathode was carried out. The magnetic field in this device is of complex geometry, since it consists of many permanent magnets and an electromagnet. The calculated geometries of the magnetic field were used in experimental studies. Measurements have shown that the magnitude and geometry of the magnetic field have a strong effect on the plasma parameters.

**Keywords:** hollow cathode magnetron, magnetic field calculation, FEMM program

**Suggested citation:** Klad'ko S.V., Poluektov N.P., Usatov I.I. *Vliyanie magnitnogo polya na kharakteristiki plazmy v magnetronnom razryade s polym katodom* [Effect of magnetic field on plasma characteristics in magnetron discharge with hollow cathode]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 5, pp. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-125-130

## Author's information

**Klad'ko Stefan Valentinovich** — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), [omicronpsi@mail.ru](mailto:omicronpsi@mail.ru)

**Poluektov Nikolay Pavlovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [poluekt@mgul.ac.ru](mailto:poluekt@mgul.ac.ru)

**Usatov Igor' Igorevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [caf-physics@mgul.ac.ru](mailto:caf-physics@mgul.ac.ru)

Received 26.05.2021.

Accepted for publication 01.07.2021.