

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНЕТРОНА С ПОЛЫМ КАТОДОМ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, А.Г. Евстигнеев, О.О. Амелькин

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

poluekt@mgul.ac.ru

Проведены исследования магнетронного разряда с полым катодом, питание которого осуществляется за счет источника мощных импульсов тока. Источник питания и система измерений параметров плазмы импульсного разряда разработаны сотрудниками секции физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал). С помощью зондовых и спектральных измерений изучена динамика импульсного разряда. Предложен механизм образования и развития разряда.

Ключевые слова: магнетрон с полым катодом, плазма, импульсный разряд, зондовые и спектральные измерения

Ссылка для цитирования: Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П., Евстигнеев А.Г., Амелькин О.О. Исследование магнетрона с полым катодом, работающего в режиме мощных импульсов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 89–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-89-95

Среди различных способов получения тонких (микронной и нанометровой толщины) пленок наиболее широко применяется осаждение пленок в плазме низкого давления методом распыления. При использовании данного метода в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. В электронной промышленности наиболее широко используется магнетронный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях [1] (рис. 1).

Плазма в аргоне загорается между анодом и катодом, который изготовлен из распыляемого металла. На катод подается отрицательное напряжение 400...800 В. Электроны захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по траекториям вблизи поверхности мишени. Область плазмы с высокой концентрацией (более 10^{11} см^{-3}) имеет вид тора малого объема толщиной порядка 1 см, вне его концентрация уменьшается до $10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Магнетронный способ осаждения обладает рядом недостатков. Особые сложности возникают при осаждении пленок на рельефных субмикронных структурах. В качестве примера можно привести металлизацию сквозных отверстий и канавок (тренчей) при создании современных ультрабольших интегральных схем (УБИС) (проводящие шины для управления транзисторами). В обычном магнетроне поток распыленного металла почти на 100 % состоит из нейтральных атомов, так как вероятность их ионизации при данных размерах и концентрациях плазмы мала. Изотропное распределение частиц здесь приводит к тому, что на верхней части субмикронной структуры образуется навес, а внутри — полость. В результате толщи-

на пленок на различных поверхностях структуры будет существенно различаться. Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность структуры вдоль нормали.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизация распыляемого металла. Позитивный эффект состоит в том, что на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя объемного заряда перед подложкой. Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации (более 10^{11} см^{-3}) во всем объеме между мишенью и подложкой (15...20 см).

Начиная с 1980-х гг. появились так называемые источники высокоплотной плазмы. Эти источники создают существенно неравновесную плазму с концентрацией более 10^{11} см^{-3} в объеме нескольких литров. Благодаря наличию в таких установках больших потоков ионов можно получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокие адгезия, прочность, теплопроводность, износоустойчивость). К таким источникам относится индуктивно связанный разряд, сверхвысокочастотный электрон-циклотронный (СВЧ-ЭЦР) разряд, геликонный разряд, магнетронный разряд с полым катодом (МПК) [2–11]. Область рабочего давления — от единиц до десятков мТорр. Температура атомов и ионов порядка 0,1–0,2 эВ, а температура электронов 1...5 эВ. Степень ионизации потока распыляемых атомов металла (отношение потока ионов металла Γ_{Me^+} к полному потоку металла $\Gamma_{\text{Me} + \text{Me}^+}$, состоящего из атомов и ионов) достигает величин 20–50 % для разрезных металлов. Процесс образования пленок существенно неравновесный, что и является одной из причин уникальности их свойств.

В лаборатории секции физики Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана создан источник высокоплотной плазмы на основе магнетрона с полым катодом [9–11].

Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более 10^{12} см⁻³ при давлении 1...10 мТорр), создаваемая в большом объеме, низкая (10...50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку. Установки на основе данного разряда широко применяются за рубежом для создания адгезионных, диффузионных и травочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях современных УБИС [6–8].

Чтобы еще больше повысить степень ионизации потока атомов металла с начала 2000-х гг. стали исследовать магнетроны, в которых стационарный источник питания заменяется на импульсно-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум тока 100...1000 А, длительность разряда 10–300 мкс, период разряда $\tau = 100...300$ Гц), скважность τ/T менее 3 %. Плотность ионного тока на мишень превышает 1 А/см², что на порядок больше, чем в стационарных магнетронах.

В зарубежной литературе этот тип разряда называют HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [12–15]. Дело в том, что мишень магнетрона, работающего в стационарном режиме с плотностью ионного тока на мишень 1 А/см², испытывает большие тепловые нагрузки, что приводит к местному расплавлению мишени, образованию капли и срыву тлеющего разряда (дугообразованию). В HiPIMS-разряде вследствие малой скважности средняя мощность за период не превышает 1...2 кВт, что не приводит к перегреву катода-мишени. При этом в момент импульса тока концентрация плазмы вблизи катода в этом разряде достигает величины 10^{13} см⁻³, что позволяет электродам ионизовать распыленные атомы мишени на малом расстоянии (несколько сантиметров). Степень ионизации потока атомов металла достигает 80 %. По сравнению со стационарным разрядом скорость осаждения пленки в HiPIMS-разряде с одинаковой средней мощностью уменьшается, что является его недостатком. Это связано с тем, что часть ионов металла (с положительным зарядом), родившихся вблизи отрицательно заряженного катода-мишени, возвращается на мишень и участвует в самораспылении, соответственно на подложку поток ионов металла уменьшается, что снижает скорость осаждения пленки. В большинстве случаев в HiPIMS-разряде используется плоский катод в виде диска диаметром 50...300 мм. Область плазмы с концентрацией 10^{12} см⁻³ располагается на расстоянии менее 10 см от катода.

Мы решили исследовать характеристики HiPIMS-разряда с полым катодом. Область разряда с высокой концентрацией в этом случае в два и

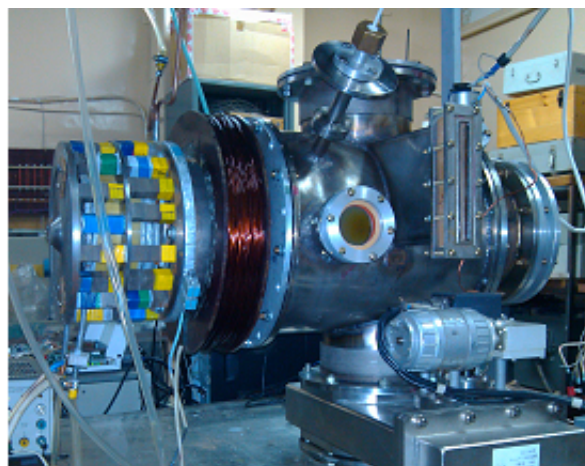
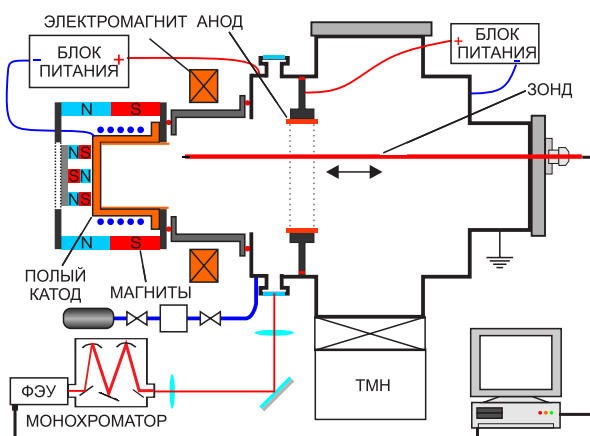
более раз больше, что должно увеличить степень ионизации потока атомов металла. Кроме того, зондовые и спектральные исследования внутри и вне полого катода [10, 16], питаемого от источника постоянного тока (мощность до 4 кВт, ток до 10 А) показали, что ионизация распыляемых атомов металла происходит не вблизи катода, а за пределами выходного сечения, и возвращения ионов металла назад, на катод не происходит. Имеется предположение, что в случае мощных импульсов (ток свыше 100 А) эта ситуация изменится мало, и, следовательно, скорость осаждения изменится незначительно.

Цель данных исследований — получить начальные данные о пространственных и временных параметрах мощного импульсного магнетронного разряда с полым катодом. Для этого было необходимо создать источник питания мощных высоковольтных импульсов тока, систему зондовых и спектральных измерений, разработать необходимое программное обеспечение.

Экспериментальная установка и методы исследования

Схема установки показана на рис. 1. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 14 см, длина 10 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Напряжение импульсного источника разряда до 900 В, максимальная сила тока 150 А, длительность импульса 50...350 мкс, частота 100...200 Гц. Магнитное поле создается столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода, а также электромагнитом, установленным вблизи выходного сечения. Концы столбиков соединены кольцевыми железными магнитопроводами. Индукция магнитного поля вблизи цилиндрической поверхности катода составляет 500 Гс. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от выходного сечения полого катода установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов, образуя на выходе магнетрона поле, остроугольной (касповой) конфигурации.

Скрещенные $E \times B$ поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более 10^{12} см⁻³). Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покинуть полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального керны потока составляет



а

б

Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) установки магнетронного разряда с полым катодом
Fig. 1. Diagram (a) and appearance (б) of a magnetron discharge device with a hollow cathode

порядка 5 см на расстоянии 20 см от выходного сечения магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза и установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Из источника плазма поступает в технологическую камеру, в которой установлен медный диск с подложками для нанесения пленок.

Воздух из камеры откачивают турбомолекулярным насосом до давления $5 \cdot 10^{-6}$ Торр, затем напускают аргон до давления 3–10 мТорр. Разряд зажигается системой предьонизации (2 кВ, 5...10 мА), а затем включается импульсный источник. Система предьонизации обеспечивает повторяемость разряда.

Система диагностики состоит из зондовой и спектральной. С помощью зондов Лэнгмюра мож-

но определять концентрацию плазмы, температуру электронов, плазменный и плавающий потенциалы в различные моменты времени импульсного разряда. Спектральная диагностика позволяет измерять динамику различных спектральных линий. Излучение из плазмы фокусируется на входную щель монохроматора МДР-12 (обратная дисперсия 1,3 нм/мм) и регистрируется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-100. Все данные выводятся на компьютер с помощью системы сбора и обработки информации. Для регистрации применяются двух лучевой цифровой осциллограф Bordo 241 (150 МГц) и плата Nation Instruments.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы силы тока I и напряжения разряда U , а также силы ионного тока насыщения зонда $I_{зонд}$. Длительность разряда 150 микросекунд. Ток достигает

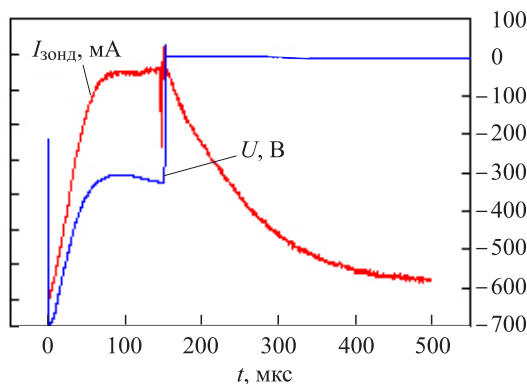
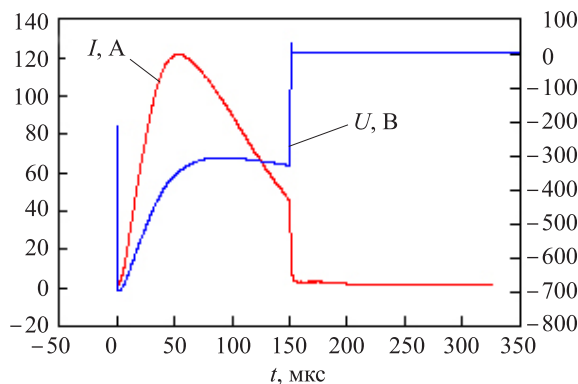


Рис. 2. Осциллограммы силы тока I и напряжения U HiPIMS-разряда (а) и силы ионного тока насыщения зонда $I_{зонд}$ (б) на расстоянии 19 см от среза магнетрона ($p = 10$ мТорр, $W = 4,42$ Дж, $P_{имп} = 29,5$ кВт, $P_{ср} = 440$ Вт)

Fig. 2. Oscillograms of the current intensity I and the voltage U HiPIMS of the discharge (a); ion current saturation probe $I_{зонд}$ (b) at a distance of 19 cm from the cut of the magnetron. ($p = 10$ mTorr, $W = 4,42$ J, $P_{имп} = 29,5$ kW, $P_{ср} = 440$ W)

максимальной величины 120А на микросекунде, напряжив в момент начала разряда равно -700 В, затем выходит на плато с величиной -350 В. Из осциллограммы ионного тока $I_{\text{зонд}}$ видно, что после выключения импульса тока ($t = 150$ мкс) плазма рекомбинирует в течение сотен микросекунд.

На рис. 3, а приведены осциллограммы тока разряда I и ионного тока насыщения зонда (напряжение на зонде 60 В) на различных расстояниях Z от мишени. Здесь $Z = 0$ соответствует краю магнетрона на выходе. Зонд расположен на радиусе $R = 6$ см, т. е. на 1 см от боковой поверхности катода-мишени. Время достижения максимума тока возрастает по мере увеличения расстояния от дна ($Z = -11$ см). Разряд начинается в глубине мишени, а затем распространяется к выходному сечению. При этом в течение начального периода ($t < 15$ мкс) внутри мишени ($Z < 0$) ток отрицательный. Это свидетельствует о наличии электронов с энергией более 60 эВ. Ток зонда на расстоянии $Z = 17$ см от среза мишени имеет два максимума.

На рис. 3, б показано распределение по радиусу ионного тока зонда, установленного на расстоянии $Z = 19$ см. Ионный ток зонда также имеет два максимума. Первый максимум на разных радиусах достигается в одно и то же время и совпадает по времени с максимумом разрядного тока. Время второго максимума ближе к концу импульсного тока увеличивается с ростом радиуса.

На рис. 4 показано, как изменяется в течение импульсного разряда интенсивность излучения спектральных линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии $Z = 19$ см от магнетрона. Интенсивность атомов аргона $\text{Ar } 6965$ нм (газа, в котором производится разряд) нарастает с увеличением тока разряда, и максимум излучения ($t = 25$ мкс) достигается немного ранее максимума тока ($t = 60$ мкс)

(рис. 4, а). Интенсивность излучения распыленных с поверхности мишени атомов меди $\text{Cu } 2766$ нм медленно нарастает в течение разряда, максимум интенсивности расположен вблизи выключения тока ($t = 200$ мкс) (рис. 4, б). Интенсивность излучения ионов аргона $\text{Ar}^+ 4806$ нм достигает максимума в момент $t = 60$ мкс, это время совпадает с первым максимумом ионного тока (см. рис. 3, б). Затем интенсивность излучения ионов аргона начинает уменьшаться (рис. 4, в). Интенсивность излучения ионов меди $\text{Cu}^+ 2136$ нм нарастает медленнее и имеет максимум в момент времени $t = 180...190$ мкс — время появления второго максимума ионного тока (см. рис. 3, б).

На основании зондовых и спектральных измерений можно предложить следующую трактовку динамики разряда. Разряд начинается в глубине катода вблизи его цилиндрической поверхности, а затем распространяется к выходному сечению. К моменту времени $t = 60$ мкс разрядный ток достигает максимума, затем начинает уменьшаться. Такое поведение тока объясняется уменьшением концентрации атомов аргона в магнетроне вследствие двух причин: во-первых, поток ионов, выходящий из катода, в результате столкновений с атомами выталкивает их (ионный ветер); во вторых, температура газа возрастает и при постоянном давлении концентрация падает. Измерения потенциала плазмы вдоль оси Z показали, что внутри катода потенциал отрицательный (порядка десятков вольт), а снаружи катода он положительный (около 10 В). Таким образом, для ионов, находящихся внутри катода, создается потенциальный барьер, преодолеть который могут только ионы, обладающие большой энергией. Замагниченные электроны легче всего могут уходить из цилиндрической мишени вдоль оси разряда, где магнитное поле наименьшее. Элек-

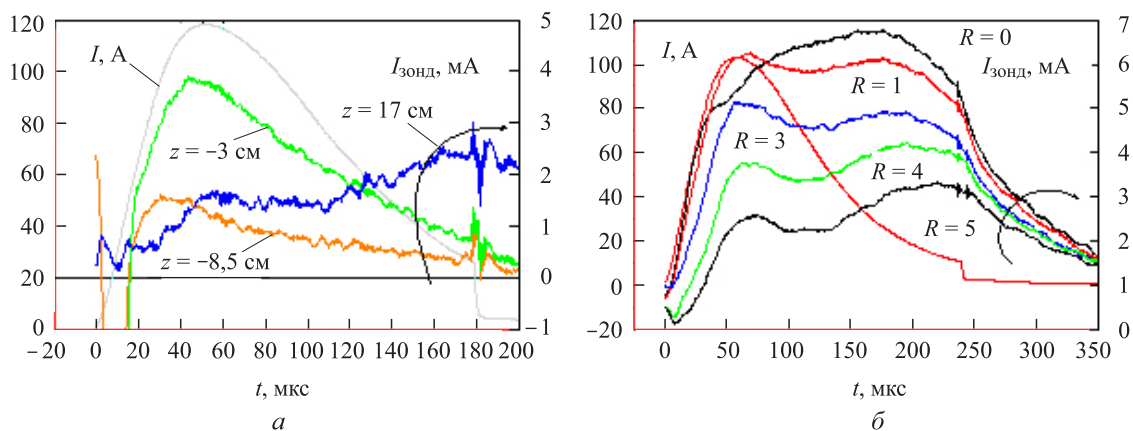


Рис. 3. Осциллограммы силы тока разряда I и ионного тока зонда:

а — во время импульсного разряда внутри и снаружи полого катода; б — на различных радиусах на расстоянии 19 см от катода ($p = 10$ мТорр, $I_{\text{эл}} = 3,5$ А)

Fig. 3. a) Oscillograms of the discharge current I and the ion current of the probe $I_{\text{зонд}}$ during the pulsed discharge inside and outside the hollow cathode; b) the dynamics of the ion current of the probe at different radii at a distance of 19 cm from the cathode ($p = 10$ мТорр, $I_{\text{эл}} = 3,5$ А)

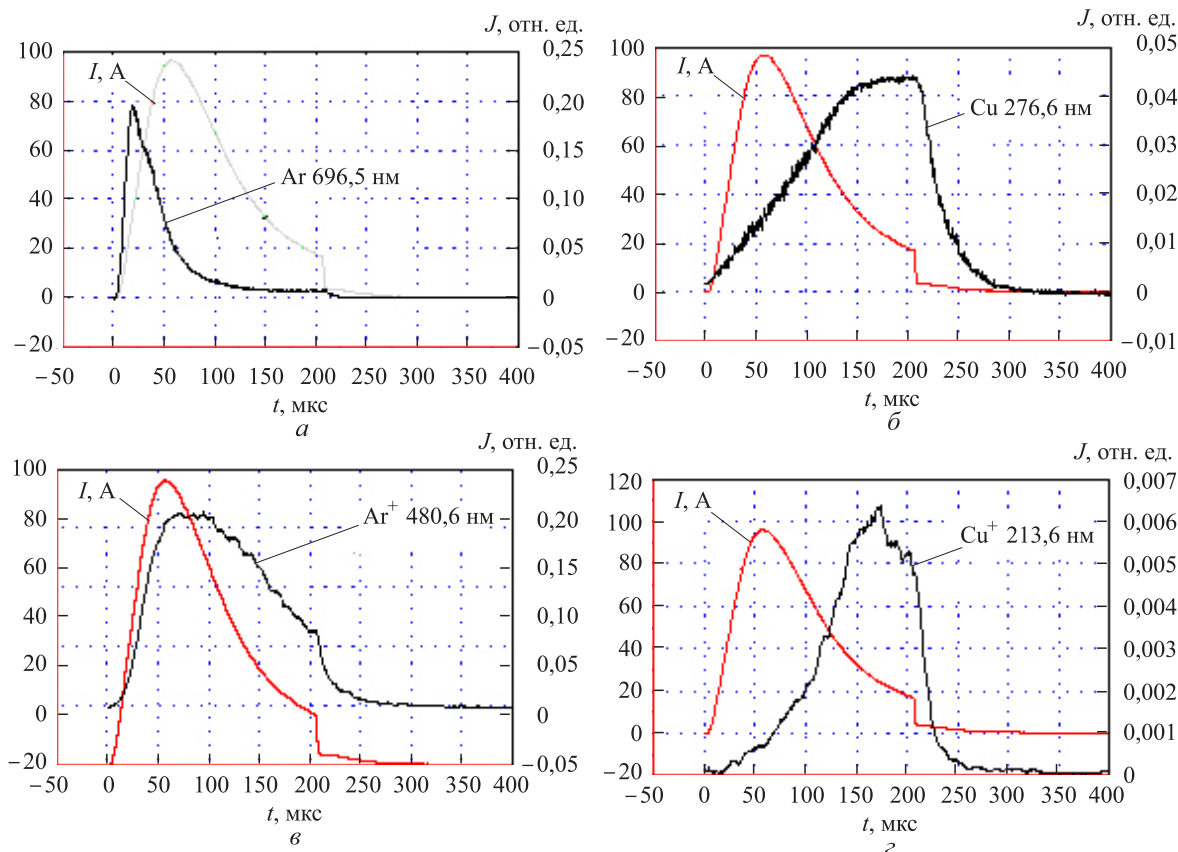


Рис. 4. Динамика излучения линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии $Z = 19$ см от среза мишени
Fig. 4. Dynamics of emission of lines of atoms and ions of argon and copper at a distance $Z = 19$ cm from the target section

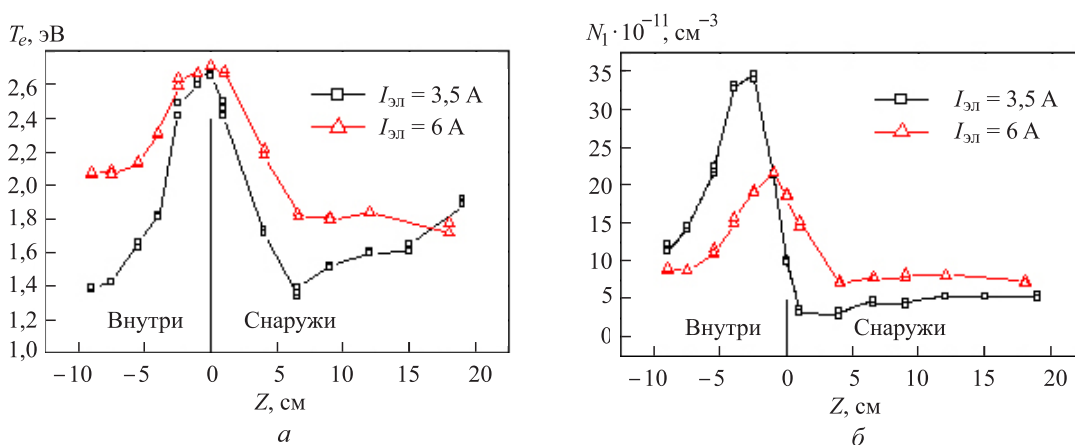


Рис. 5. Температура электронов (а) и концентрация плазмы (б) внутри и снаружи магнетрона в момент времени разряда $t = 100$ мкс на радиусе $R = 6$ см для двух значений тока электромагнита $I_{эл}$
Fig. 5. The electron temperature (а) and the plasma concentration (б) inside and outside the magnetron at a discharge time $t = 100$ мкс at a radius of $R = 6$ cm for two values of the electromagnet current $I_{эл}$

троны вытягивают из магнитной ловушки часть высокоэнергетичных ионов, которые не замагничены и могут уходить из катода по разным радиусам. К моменту времени $t = 60$ мкс эта группа (в основном ионы аргона и меди) достигают расстояния $Z = 19$ см от выходного сечения. Оценка скорости этой группы порядка 2,5...3 км/с.

В последующие моменты времени разряда ток уменьшается, также падает потенциал плазмы, об

разующий барьер для ионов. Создаются условия для выхода оставшейся части ионов, что вызывает появление второго максимума на графике ионного тока и увеличение интенсивности излучения ионов меди.

На рис. 5 представлены распределения температуры электронов и концентрации ионов вдоль оси Z , снятые на радиусе $R = 6$ см в момент времени $t = 100$ мкс для двух значений силы тока электромагнита. Видно, что температура и концентрация

сильно зависят от конфигурации магнитного поля и достигают максимальных значений вблизи выходного сечения. Вероятно, это связано с большим азимутальным током, протекающим в данной области.

Заключение

Выполнены зондовые и спектральные измерения временных характеристик импульсно-периодического разряда. Описано распределение параметров плазмы внутри и снаружи магнетрона. В результате проведенных измерений выявлена сложная картина процессов, происходящих в импульсном магнетронном разряде с полым катодом. Для более полного понимания картины необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

- [1] Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering. *J. Appl. Phys.*, 1995, v. 78, pp. 758–765.
- [2] Hopwood J. Ionized physical vapor deposition of integrated circuit interconnects. *J. Phys. Plasmas*, 1998, v. 5, pp. 1624–1631.
- [3] Rosnagel S.M. Thin film deposition with PVD and related technologies. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, v. 21, pp. 74–81.
- [4] Gorbatkin S.M., Rosnagel S.M. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, v. 14B, pp. 1853–1859.
- [5] Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Usatov I.G. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. *Plasma Physics Reports*, 2001, v. 27, no. 7, pp. 625–633.
- [6] Meng L., Raju R., Flauta R., Shin H., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2010, v. 28A, p. 112.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkan A., Park K.J., Fields S., Leeser K., Meng L., Ruzic D.N. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v. 81, pp. 123502.
- [8] Dulkan A., Ko E., Wu L., Karim I., Leeser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, v. 29A, pp. 041514–1.
- [9] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Ionization Fraction of the Sputtered Metal Flux in a Hollow Cathode Magnetron. *Plasma Physics Reports*, 2014, v. 40, no. 9, pp. 754–759.
- [10] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. *Plasma sources Science and Technology*, 2015, v. 24, pp. 035009–035015.
- [11] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode. *Thin Solid Films*, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [12] 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.
- [13] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, v. 205, pp. 1–9.
- [14] Hecimovic A. Anomalous cross-B field transport and spokes in HiPIMS plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, v. 49, pp. 1801–1806.
- [15] 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).
- [16] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Probe and Emission Spectrometry Diagnostics in Hollow Cathode Magnetron. *J. Modern Phys.*, 2012, v. 3, pp. 1494–1502.

Сведения об авторах

Полужков Николай Павлович — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), poluekt@mgul.ac.ru

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

Царьгородцев Юрий Петрович — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-physics@mgul.ac.ru

Евстигнеев Алексей Георгиевич — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evstigneev@mgul.ac.ru

Амелькин Олег Олегович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал),

Статья поступила в редакцию 27.03.2017 г.

STUDY OF A HOLLOW CATHODE MAGNETRON, OPERATING IN THE REGIME OF POWERFUL PULSES

N.P. Poluektov, I.I. Usatov, Yu.P. Tsar'gorodtsev, A.G. Evstigneev, O.O. Amel'kin

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

poluekt@mgul.ac.ru

Investigations of a magnetron discharge with a hollow cathode, which is powered by a source of powerful current pulses, are carried out. The power source and the system for measuring the parameters of the pulsed discharge plasma were developed by the staff of the physics section. With the help of probe and spectral measurements, the dynamics of a pulsed discharge is studied. Based on the data obtained, a mechanism for the formation and development of a discharge is proposed.

Keywords: hollow cathode magnetron, plasma, pulse discharge, probe and spectral measurements

Suggested citation: Poluektov N.P., Usatov I.I., Tsar'gorodtsev Yu.P., Evstigneev A.G., Amel'kin O.O. *Issledovanie magnetrona s polym katodom, rabotayushchego v rezhime moshchnykh impul'sov* [Study of a hollow cathode magnetron, operating in the regime of powerful pulses]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 89–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-89-95

References

- [1] Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering. *J. Appl. Phys.*, 1995, v. 78, pp. 758–765.
- [2] Hopwood J. Ionized physical vapor deposition of integrated circuit interconnects. *J. Phys. Plasmas*, 1998, v. 5, pp. 1624–1631.
- [3] Rossnagel S.M. Thin film deposition with PVD and related technologies. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, v. 21, pp. 74–81.
- [4] Gorbalkin S.M., Rossnagel S.M. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, v. 14B, pp. 1853–1859.
- [5] Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Usatov I.G. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. *Plasma Physics Reports*, 2001, v. 27, no. 7, pp. 625–633.
- [6] Meng L., Raju R., Flauta R., Shin H., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2010, v. 28A, p. 112.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkin A., Park K.J., Fields S., Leeser K., Meng L., Ruzic D.N. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v. 81, pp. 123502.
- [8] Dulkin A., Ko E., Wu L., Karim I., Leeser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, v. 29A, pp. 041514–1.
- [9] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Ionization Fraction of the Sputtered Metal Flux in a Hollow Cathode Magnetron. *Plasma Physics Reports*, 2014, v. 40, no. 9, pp. 754–759.
- [10] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. *Plasma sources Science and Technology*, 2015, v. 24, pp. 035009–035015.
- [11] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode. *Thin Solid Films*, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [12] 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.
- [13] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, v. 205, pp. 1–9.
- [14] Hecimovic A. Anomalous cross-B field transport and spokes in HiPIMS plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, v. 49, pp. 1801–1806.
- [15] 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).
- [16] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Probe and Emission Spectrometry Diagnostics in Hollow Cathode Magnetron. *J. Modern Phys.*, 2012, v. 3, pp. 1494–1502.

Author's information

Poluektov Nikolay Pavlovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, BMSTU (Mytishchi branch), poluekt@mgul.ac.ru

Usatov Igor' Igorevich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor, BMSTU (Mytishchi branch), caf-physics@mgul.ac.ru

Tsar'gorodtsev Yuriy Petrovich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor, BMSTU (Mytishchi branch), caf-physics@mgul.ac.ru

Evstigneev Aleksey Georgievich — Head of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), evstigneev@mgul.ac.ru

Amel'kin Oleg Olegovich — student, BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

Received 27.03.2017