

Плазменный источник ионов газов и металлов на основе разряда низкого давления с полым катодом

А.П.Семенов, И.А.Семенова, Г.В.Троян¹

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН
670047 Россия, Улан-Удэ

e-mail: semenov@pres.bscnet.ru

¹Томский государственный университет

634050 Россия, Томск

e-mail: toe@main.tusur.ru

Разработан компактный источник ионов газов и металлов на основе отражательного разряда с холодным полым катодом, в котором распыляемая ионами аргона с энергией до 10 кэВ плоская мишень (Cu, Mo, W, C) диаметром 6 мм установлена на дне изолированного от нее полого катода. Постоянный магнит создает в анодной полости магнитное поле с индукцией 0,1 Тл. Поток ионов из катодной плазмы отражательного разряда с полым катодом характеризуется плотностью ионного тока на распыляемой мишени ~ 100 мА/см² при ускоряющем напряжении до 10 кВ и токе разряда 0,2-0,5 А. Плотность отбираемого ионного тока обеспечивает образование избыточного давления паров металла в катодной и анодной полостях. Извлечение пучка, содержащего ионы плазмообразующего газа и металла, легко осуществляется через отверстие в отражательном катоде. Долевое соотношение ионов металла в извлекаемом пучке 0,05-0,1. Полный ток ионного пучка 20-30 мА.

Введение

В общем случае к конструкциям плазменных источников положительных ионов газов и металлов, особенно работающих в тяжелых вакуумных условиях (воздействие химически активной газовой среды, внезапное повышение давления), предъявляются требования повышенной надежности и эффективности, обеспечения достаточно высоких параметров эмитирующей плазмы и сравнительно больших токов стационарных ионных пучков. Общим свойством всех газоразрядных источников ионов металлов является зажигание и горение разряда в парах металла. Среди различных способов образования паров предпочтительно физическое распыление мишени в вакууме потоком плазменных ионов. Ионы испускаются плазмой разряда и ускоряются полем проводящей мишени, имеющей отрицательный потенциал относительно плазмы. В этом случае практически нет температурных ограничений на получение паров широкого ряда металлов.

Приемлемые параметры плазмы для ионного распыления мишеней [1,2] достигнуты при разработке источников с

пучками ионов малого сечения. Среди этого класса ионных источников обращают на себя внимание конструкции на основе отражательного разряда с холодным полым катодом (коробчатая форма катодной полости) [3,4]. С точки зрения практического применения, такие эмиттеры привлекают технологов редким сочетанием значительных токов ионных пучков и конструкционной простоты. Коробчатая форма катодной полости обеспечивает необходимое неоднородное распределение концентрации плазмы, способствующее генерированию пучков ионов с высокой плотностью эмиссионного тока [5]. В рассматриваемых условиях, возможность продольного отбора распыляющих мишень ионов через отверстие на стенке дна полого катода и формирование ускоренного пучка ионов газов и металлов через эмиссионный канал в стенке отражательного катода. Две принципиальные возможности продольного извлечения ионов: через отверстие в стенке отражательного катода и через отверстие в катодной полости впервые рассмотрены в [6]. Извлечение ионного пучка обычно осуществляется через отверстие в отражательном катоде [7]. В то же время

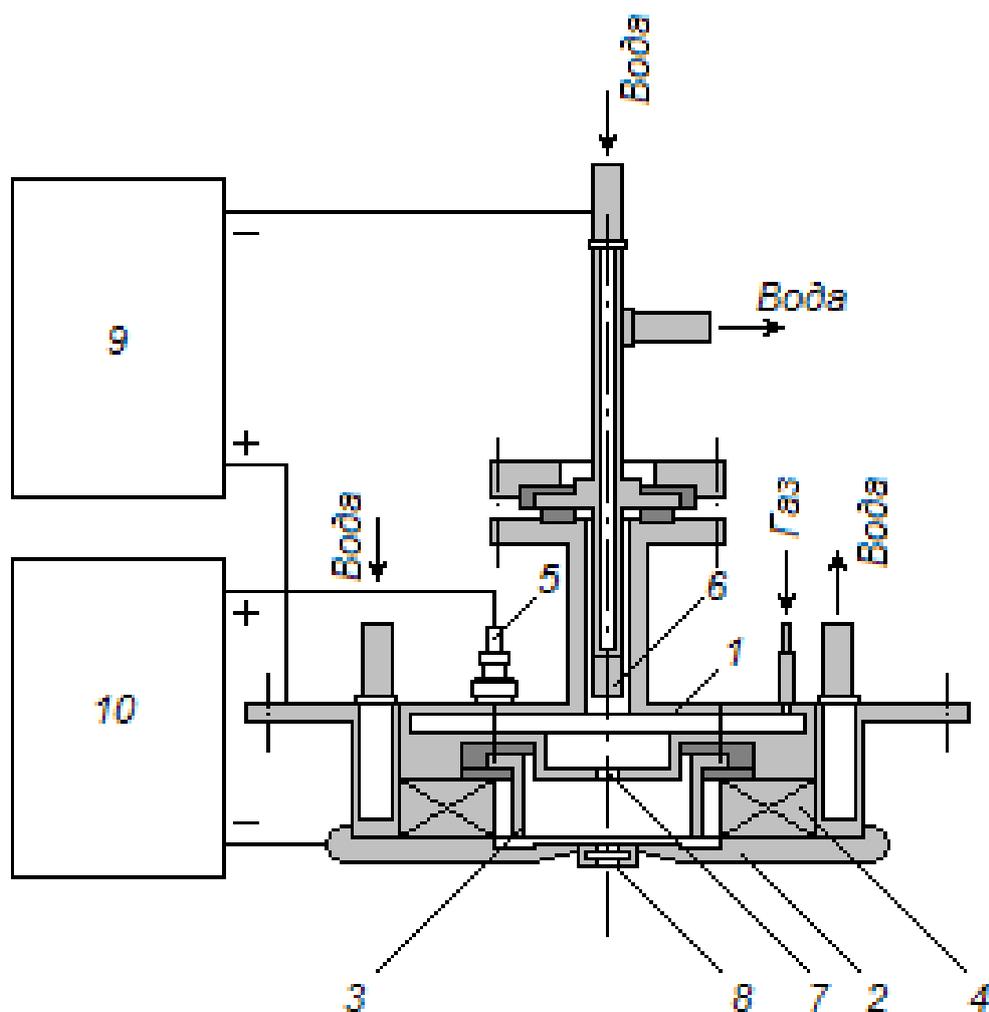


Рис. 1. Конструктивная схема ионного источника: 1-полый катод, 2-отражательный катод, 3-анод, 4-постоянный кольцевой магнит, 5-внешний электрический разъем, 6-мишень, 7-отверстие в полном катоде, 8-катодная вставка, 9,10-высоковольтные источники питания

практически отсутствуют данные о ионном токе через отверстие в катодной полости. Нет убедительных сведений о том, насколько и в каких случаях необходим и существенен выход ионов из отверстия в полости. Предполагается, что эмиссия ионов через отверстие в полном катоде может быть полезной для образования избыточного давления паров металла ионным распылением мишени, обуславливая, в частности, применение отражательного разряда с холодным полым катодом в источнике ионов металлов и газов. Известно [8], что распределение ионного тока по катоду в отражательном разряде с полым катодом неоднородно. Это позволяет сосредоточить значительную долю тока эмитируемых плазмой ионов на небольшой мишени с высоким

отрицательным потенциалом и существенно повысить плотность тока распыляющих мишень ионов и скорость распыления [9].

Таким образом, принятый подход заслуживает самостоятельного обсуждения и обуславливает тип конкретного ионного источника, конструктивная схема и принцип действия которого рассматриваются в настоящей работе.

Методика эксперимента

На рис. 1 представлена конструктивная схема экспериментального макета источника ионов газов и металлов. Отражательный разряд с полым катодом, характеризующийся свойствами аномального тлеющего разряда,

возбуждается в разрядной камере, образованной катодами 1 и 2 с осевыми отверстиями \varnothing 8 мм и цилиндрическим медным анодом 3 с отверстием \varnothing 16 и длиной 12 мм. Катоды 1 и 2, изолированные от анода 3 фторопластовыми прокладками, изготовлены из магнитной стали и служат полюсными наконечниками кольцевого магнита 4.

Кольцевым постоянным ферритовым магнитом 4 создается продольное магнитное поле в анодной полости с индукцией 0,1 Тл. Отвод тепловой мощности от катодов и магнита осуществляется к охлаждаемому проточной водой медному корпусу разрядной камеры. Анод 3 соединяется внутренним разъемом с внешним электрическим разъемом 5. В центре дна полого катода 1, на изолированном от катода держателе, установлена охлаждаемая водой плоская мишень 6 (медь) диаметром 6 мм. Расстояние между 4 мм. Катодная полость сообщается с анодной полостью отверстием 7 \varnothing 4 мм. В осевом отверстии катода 2 крепится катодная вставка 8 в форме тора \varnothing 8 мм с проходными отверстиями \varnothing 3,5 мм. Экспериментально подобранные размеры катодной вставки обеспечивают устойчивую плазменную фокусировку ионного пучка, извлекаемого из катодной плазмы дополнительным ускоряющим электродом. На токопроводящую мишень 6 подается выпрямленное напряжение до 10 кВ от регулируемого источника питания 9. Распыленные атомы мишени 6 поступают в катодную и анодную полости. Разрядное напряжение подается от стабилизированного источника тока 10 на разрядный промежуток: электрически соединенные катоды – анод. Напряжение горения в режиме полого катода для разрядных токов 0,1 – 0,5 А составляет 350-380 В. Рабочий газ – аргон, давление аргона в катодной полости 5-13 Па. Напуск рабочего газа (аргон) в катодную полость обеспечивается через отверстие на периферии полого катода. При подаче напряжения от источника 10 до

нескольких сотен вольт между катодами и анодом зажигается отражательный разряд. Полюс анод 3 заполняется плазмой, слабое свечение которой можно наблюдать через отверстие 8. При определенном критическом токе отражательного разряда протяженность катодного падения напряжения l_k перед отверстием 7 становится соизмеримой с поперечными размерами отверстия, ионная оболочка разрывается и плазма проникает в катодную полость. Условие проникновения плазмы [10]

$$l_k \leq r_n, \quad (1)$$

где r_n - радиус отверстия в полости.

Проникновение плазмы сопровождается усилением разрядного тока, снижением напряжения горения, появлением тока в катодной полости, появлением ярко светящегося плазменного шнура на оси разряда. Разряд переходит в новую форму – с полым катодом. Плазма отражательного разряда с полым катодом приобретает высокую эмиссионную способность. При подаче на мишень 6 от источника 9 напряжения отрицательной относительно катода 1 полярности до 10 кВ, однократно заряженные ионы аргона ускоряются из катодной плазмы до энергии в несколько кэВ и бомбардируют мишень 6. В результате она распыляется и одновременно эмитирует вторичные электроны с энергией, равной энергии ионов.

Определенная часть выбитых с поверхности мишени частиц ионизуется, значительная часть падает на внутреннюю поверхность полого катода, покрывая его слоем материала мишени, который повторно распыляется, но уже ионами ускоренными в катодном слое до энергии катодного падения потенциала $U_k \sim 0,85U_p$ ($U_p=350-380$ В). Тем самым роль процесса распыления катода, сопровождаемого распылением мишени, может быть весьма существенной, так как пороговая энергия распыления меньше катодного падения потенциала и вклад в распыление могут дать частицы мишени, осажденные на катод и получившие кинетическую энергию

превышающую энергию связи (сублимации поверхности), которая составляет от 0,645 Нг до 8,76 эВ W [11].

Результаты и их обсуждение

Эмиссионные свойства катодной плазмы можно характеризовать зависимостями эмиссионного тока от разрядного тока. Эмиссионные характеристики рис. 2 (2,3 и 4) получены при подаче на мишень 6 от источника 9

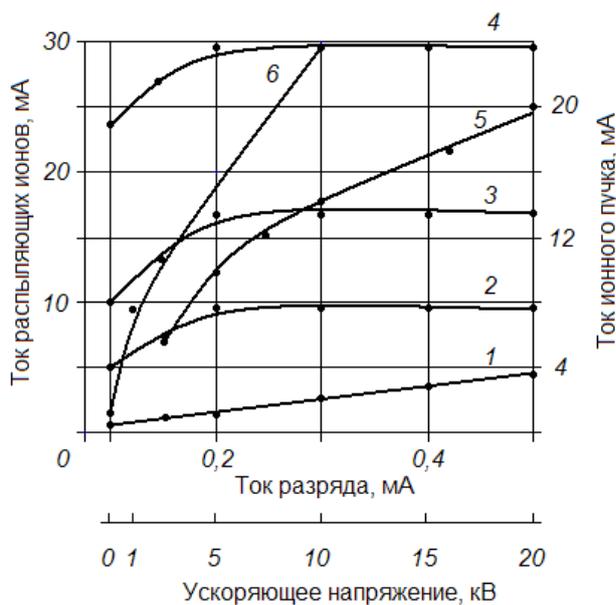


Рис. 2. Эмиссионные характеристики (1-4): $U_p=350$ В, (1)- $U=0$, (2)-1, (3)-5, (4)-10 кВ, рабочий газ – аргон, медная мишень; характеристика извлечения (5) пучка ионов Ag^+ и Cu^+ : $I_p=0,2$ А; характеристика извлечения (6) распыляющих ионов: $I_p=0,2$ А

ускоряющего напряжения отрицательной относительно катода 1 полярности 1, 5 и 10 кВ и относительно малой толщине слоя d пространственного заряда между плазмой и мишенью. При нулевом напряжении источника питания 9 тепловой ионный ток на мишень линейно растет рис. 2 (1), благодаря увеличению концентрации ионов в невозмущенной плазме вблизи мишени 6. Обычно потенциал мишени оказывается ниже потенциала плазмы. В этом случае, мишень 6 выполняет функции коллектора ионов, покидающих плазму, плотность

ионного тока определяется соотношением Бома:

$$j_i=0,4en_i(2kT_e/M_i)^{1/2}, \quad (2)$$

где n_i - концентрация плазмы, T_e - электронная температура, k - постоянная Больцмана, M_i - масса иона, e - заряд электрона.

Особенностью зависимостей рис. 2 (2, 3 и 4), при ускоряющем напряжении $U=1, 5$ и 10 кВ соответственно, является их немонотонность, которая, с одной стороны, может быть обусловлена немонотонной зависимостью $n_i(I_p)$ [12]. Расчет зависимости концентрации эмитирующей плазмы от тока разряда [12], из выражения эмиссионного тока

$$I_i=\eta n_i(R-Kn^{-1/2}U_k^{3/4})^2, \quad (3)$$

где $\eta=e(\pi kT_e/2m)^{1/2}$; R -радиус эмиссионного канала; $K=(ekT_e/1,21\varepsilon_0^2)^{1/4}$; U_k -падение потенциала на катодном слое, показывает, что при $I_p>0,25$ А концентрация плазмы в эмиссионном канале слабо зависит от тока разряда. Экспериментально наблюдаемый характер поведения зависимости $I_k(I_p)$ рис. 2 с перегибом зависимостей (2, 3 и 4) при $I_p\sim 0,2$ А качественно согласуется с ходом расчетной зависимости $n_i(I_p)$. С другой стороны, с определенными допущениями плотность ионного тока может выражаться в бесстолкновительном приближении соотношением:

$$j_i=4/9\varepsilon_0(2e/M_i)^{1/2}U^{3/2}/d^2, \quad (4)$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная, U - ускоряющее напряжение, d - толщина слоя. В этом выражении j_i определяется соотношением Бома и не зависит от U . Притом, положение эмиссионной поверхности плазмы определяется из формулы (4), преобразованной к виду:

$$d=1,05\varepsilon_0^{1/2}(ekT_e)^{-1/4}n_i^{-1/2}U^{3/4}. \quad (5)$$

Как видно из (5) при неменяющемся напряжении $U=const$ и действии фактора n_i изменяется толщина слоя d . Причем, в данной ситуации, благодаря уменьшению d , растут потери ионов на боковой стенке канала, ограниченной плоскостью дна полого катода и плоскостью распыляемой поверхности мишени. По-видимому, рост концентрации плазмы с ростом тока разряда компенсируется потерями ионов.

Поэтому, мощность, затрачиваемая на повышение разрядного тока, не дает заметного вклада в величину отбираемого ионного тока.

С ростом ускоряющего напряжения и при постоянстве тока разряда ионный ток существенно растет, рис. 2 (б). Несмотря на то что, извлекаемый из плазмы ионный ток не ограничивается пространственным зарядом и всегда является током насыщения и не зависит от ускоряющего (извлекающего) напряжения [13], вероятными причинами наблюдаемого роста ионного тока является «отжатие» эмиссионной плазменной поверхности с повышением U . Положение границы плазмы определяется из формулы (5). И как следствие уменьшение потерь тепловых ионов на стенках цилиндрического канала между плоскостью дна полого катода и поверхностью мишени. Кроме того, возможно усиление ионизационных процессов в слое d в результате ионно-электронной эмиссии и физического распыления мишени б. Так как коэффициент кинетической ионно-электронной эмиссии γ пропорционален энергии ионов и при энергии более 2 кэВ приближается к единице [14], ток вторичных электронов в цепи мишени может оказаться соизмеримым с током ионов.

Оценим вклад в ионизационные процессы ионно-электронной эмиссии. Ток на мишень можно выразить в простейшем случае соотношением

$$I = I_i + \gamma I_i + i, \quad (6)$$

где I_i - ионный ток из плазмы; γI_i - ток ионно-электронной эмиссии; i - ток от ионов, появившихся в результате ионизационных процессов в слое пространственного заряда между плазмой и мишенью. Образование ионов в слое определяется числом ионизаций за единицу времени на элементе длины dx

$$dN_i = N_e \omega_i dx / \lambda_e, \quad (7)$$

где N_e - число вторичных электронов, ω_i - вероятность ионизации, λ_e - длина свободного пробега электронов в газе.

С учетом $N_e = \gamma I_i / e$ и $\lambda = \lambda_o / p$ соотношение (7) преобразуется к виду

$$di = \gamma I_i \omega_i p dx / \lambda_o. \quad (8)$$

Используя выражение Моргулиса для вероятности ионизации

$$\omega_i = \alpha (u - U_i) e^{-(u - U_i) / \beta}, \quad \text{с учетом замены переменной } x \text{ на переменную } u \text{ интегрируем (8) в пределах от } U_i \text{ до } U$$

$$i = [1 - ((U - U_i + \beta) / \beta) e^{-(U - U_i) / \beta}] \gamma I_i p \alpha d_o \beta^2 / \lambda_o U. \quad (9)$$

При $U \gg \beta$ соотношение (9)

преобразуется к виду

$$i / \gamma I_i \sim p \alpha d_o \beta^2 / \lambda_o U. \quad (10)$$

Отношение $i / \gamma I_i$ характеризует вклад в ионизационные процессы ионно-электронной эмиссии. Подставляя в (10) $\lambda_o = 0,438$ мм, $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-2}$ В⁻¹, $\beta = 110$ В, $d_o = 4$ мм, $p = 1,3 - 13$ Па, $U = 10$ кВ, находим, что ток от ионов, образованных в слое пространственного заряда за счет γ -процессов, в 10^2 раз меньше тока ионно-электронной эмиссии, поэтому наблюдаемый рост ионного тока может быть обусловлен снижением потерь тепловых ионов на стенках канала при перемещении плазменной поверхности с ростом напряжения отрицательной полярности на мишени и завышение ионного тока ионно-электронной эмиссией, поскольку условия эксперимента не исключали такое влияние.

Заключение

Извлечение ионов из катодной плазмы на изолированную от полого катода мишень и установленную на дне полого катода характеризуется плотностью ионного тока ~ 100 мА/см² при потенциале мишени 10 кВ и токе разряда $I_p = 0,2 - 0,5$ А. Анализ влияния радиуса анода и расстояния между катодами показывает, что их увеличение приводит к снижению концентрации осевой плазмы.

Отбор пучка ионов из плазмы, содержащего ионы металла мишени и газа, выполняется через осевой эмиссионный канал в катодной вставке 8 подачей высокого ускоряющего напряжения до 20 кВ от дополнительного источника питания на отражательный катод 2 положительной полярности

относительно ускоряющего электрода (на рис. 1 дополнительный высоковольтный источник питания и ускоряющий электрод не показаны). На выходе ионного источника при токе разряда 0,2 А и ускоряющем напряжении 1-20 кВ получен пучок ионов газов и металлов с током 5-20 мА рис. 2 (5). Процесс

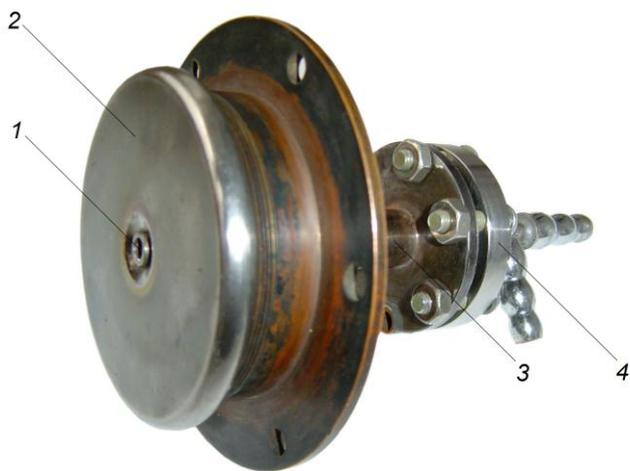


Рис. 3. Общий вид источника ионов: 1- катодная вставка, 2-отражательный катод, 3- полый катод, 4-охлаждаемый держатель мишени

появления слоя из частиц мишени на внутренней стенке полого катода свидетельствует о важной роли его распыления в повышение эффективности получения паров металла. Долевое соотношение ионов металла в извлекаемом пучке 0,05-0,1. Эксплуатационный ресурс катодной вставки составил 250-300 ч. Ионный источник устойчиво работал в условиях низкого вакуума. Общий вид действующего макета плазменного источника ионов газов и металлов представлен на рис. 3.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН проект № 2.7.2.2 и Фонда содействия отечественной науке.

Список литературы

- [1]. Семенов А. П. Техника нанесения тонких пленок распылением ионным пучком (обзор) // ПТЭ. 1990. № 4. С. 26-42.
- [2]. Семенов А. П. Выращивание тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников распылением ионным пучком (обзор) // ПТЭ. 1993. № 2. С. 11-27.
- [3]. Семенов А.П. Источники распыляющих ионных пучков на основе разрядов с холодным катодом (обзор) // ПТЭ. 1996. N4. С.3-14.
- [4]. Семенов А.П. Эмиссия ионов из разряда с полым катодом в режиме проникновения плазмы в высоковольтный ускоряющий промежуток // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 42-47.
- [5]. Глазов А. А., Кузмяк М., Новиков Д. Л. и др. Ионный источник протонного ускорителя на 1 МэВ // ПТЭ. 1964. № 1. С. 34-36.
- [6]. Семенов А. П., Мохосоев М. В. Ионный ток на выходе катодной полости ячейки Пеннинга // ТВТ. 1984. Т. 22. № 1. С. 164-165.
- [7]. Семенов А.П. Плазменный источник ионов // ПТЭ. 1984. №5. С. 23-24.
- [8]. Семенов А.П. Характеристики отражательного разряда с коробчатой катодной полостью и эмиссионные свойства плазмы разряда // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 131-135.
- [9]. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 207 с.
- [10]. Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [11] Kanaya K., Hojou K., Koga K., Toki K. Consistent theory of sputtering of solid targets by ion bombardment using power potential low // J. Appl. Phys. 1973. Vol.12. N9. P.1297-1306.
- [12]. Груздев В.А., Ремпе Н.Г. Определение параметров эмитирующей плазмы электронных источников эмиссионными методами // Тез. докл. I Всесоюзного совещания по плазменной эмиссионной электронике. Улан-Удэ: 1991. С.45-50.
- [13]. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
- [14]. Shamim M.M., Scheuer J.T., Fetherston R.P. et al. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. No 9. P. 4756 – 4759.