

УДК 537.525

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ПУЧКА БЫСТРЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В НЕГО ЧЕРЕЗ ЭМИССИОННУЮ СЕТКУ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

© 2012 г. А. С. Метель, С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, В. П. Болбуков

*Московский государственный технологический университет “Станкин”**Россия, 127994, Москва, Вадковский пер., 3а**E-mail: ametel@stankin.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2011 г.

С целью увеличения эквивалентного тока пучка быстрых нейтральных атомов холодный полый катод источника пучка бомбардируют электронами, отбираемыми из плазмы в рабочей вакуумной камере и ускоряемыми в слое между плазменным эмиттером и эмиссионной сеткой источника. Бомбардировка катода ускоренными электронами на порядок увеличивает ток эмитируемых им электронов, и в результате напряжение U_c между анодом и катодом источника снижается более чем в 2 раза. Это позволяет в несколько раз повысить эквивалентный ток пучка или уменьшить рабочее давление газа. Незначительное снижение U_c с ростом ускоряющего напряжения U при полной отсечке электронов из камеры свидетельствует о влиянии вторичных электронов, эмитируемых сеткой.

ВВЕДЕНИЕ

Источники широких пучков быстрых нейтральных атомов и молекул с большим холодным полым катодом [1, 2] позволяют при давлении 0.1–1 Па получать в вакуумной камере химически активную плазму [3], нагревать пучком до 500–750°C погруженные в нее изделия и проводить химико-термическую обработку, например азотирование инструмента без затупления его режущих кромок [4]. Такие источники используются также для травления быстрыми атомами аргона металлов [5], диэлектриков [6] и для модификации свойств износостойких покрытий в результате бомбардировки в процессе их осаждения на изделия быстрыми молекулами.

Плазменный эмиттер рассматриваемых источников получают с помощью тлеющего разряда, в котором электроны удерживаются в электростатической ловушке, образованной полым катодом и отрицательной по отношению к нему и к рабочей вакуумной камере эмиссионной сеткой. Верхнее рабочее давление источника ~1 Па определяется пробоем между разделенными сеткой эмиттером и плазмой, образованной пучком в камере. Нижнее рабочее давление определяется условием отсутствия в разряде положительного анодного падения потенциала, которое с понижением давления достигает 0.5–1 кВ и приводит к плавлению анода, а также условием превышения в несколько раз нижнего граничного давления области эффекта электростатической ловушки, при приближении к которому напряжение U_c между анодом и катодом возрастает на порядок [7].

С уменьшением ширины электростатической ловушки от 0.2 до 0.05 м ниже рабочее давление источников быстрых атомов аргона повышается от 0.05 до 0.2 Па. Поэтому в источнике с небольшими габаритами, например, использовавшемся в работе [6], можно изменять давление p лишь от 0.2 до 1 Па. При $p \sim 1$ Па происходит пробой между эмиттером и плазмой в камере, а при $p < 0.2$ Па напряжение U_c резко возрастает и ток пучка падает до нуля.

В работе [8] показано, что в рассматриваемых источниках бомбардировка катода электронами, отбираемыми из плазмы в камере и ускоряемыми напряжением между этой плазмой и эмиттером, позволяет снизить напряжение U_c от ~1000 до ~100 В, если ток указанных электронов в 2 раза превысит эквивалентный ток пучка быстрых молекул. В данной работе приводятся результаты исследования влияния инъекции электронов из камеры через эмиссионную сетку источника на его характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Конструктивная схема источника представлена на рис. 1. В центре дна полого катода, образованного 12 катодными Г-образными секциями 1, установлен дисковый анод 2 диаметром 30 мм [6]. С противоположной стороны катод перекрыт плоской эмиссионной сеткой, образованной 6 секционными секциями 3 в виде секторов, отделенных друг от друга зазорами шириной 3 мм. На поверхности каждой сеточной секции, изготовленной из

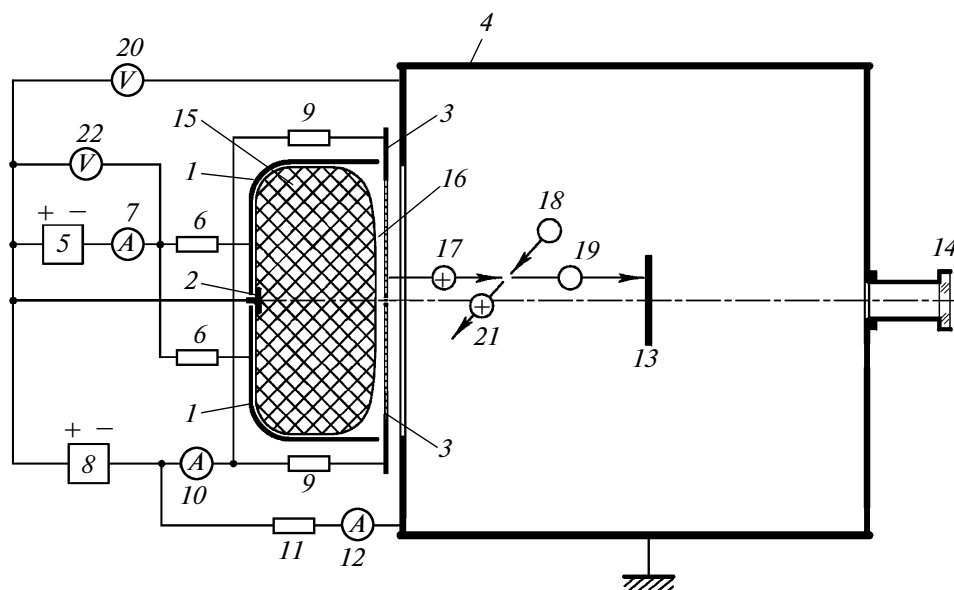


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – секции полого катода; 2 – анод; 3 – секции эмиссионной сетки; 4 – рабочая вакуумная камера; 5 – источник питания разряда; 6 – катодные резисторы; 7, 10 и 12 – амперметры; 8 – источник ускоряющего напряжения; 9 – сеточные резисторы; 11 – резистор отрицательной обратной связи; 13 – мишень; 14 – оптическое окно; 15 – плазменный эмиттер ионов; 16 – слой положительного объемного заряда; 17 – ускоренные ионы; 18 – медленные атомы газа; 19 – быстрые атомы; 20 – киловольтметр; 21 – медленные ионы, 22 – вольтметр.

титанового листа толщиной 2 мм, равномерно распределены отверстия $\varnothing 4.6$ мм на расстоянии 5 мм между их центрами.

Источник пучка установлен на торце вакуумной камеры 4 диаметром 0.5 м, причем расстояние от его сетки до противоположной стенки камеры составляет 0.7 м. Камера откачивается диффузионным насосом до давления $3 \cdot 10^{-3}$ Па, а затем через устройство предварительной ионизации газа, описанное в [6], в нее подается аргон, давление которого можно регулировать игольчатым натекателем в диапазоне от 0.01 до 1 Па. В полый катод источника пучка аргон попадает из камеры 4 через сеточные секции 3.

Катодные секции 1 соединены с отрицательным полюсом источника питания 5 через индивидуальные резисторы 6 сопротивлением по 0.2 кОм и амперметр 7, а сеточные секции 3 соединены с отрицательным полюсом источника питания 8 через индивидуальные резисторы 9 сопротивлением по 2 кОм и амперметр 10. Указанные резисторы ограничивают токи в цепях секций величиной, меньшей минимального тока устойчивого горения вакуумной дуги. При напряжении до 4 кВ и эквивалентном токе пучка до 1.2 А это исключает переход тлеющего разряда в источник в дугу.

Положительные полюса обоих источников питания 5 и 8 соединены с анодом 2, а заземленная камера 4 через резистор отрицательной обратной связи 11 и амперметр 12 соединена с отрицательным полюсом источника ускоряющего напряже-

ния 8. В центре камеры 4 на расстоянии 0.4 м от эмиссионной сетки 3 установлена изолированная от камеры плоская мишень 13 в форме квадрата со стороной 0.12 м, изготовленная из титанового листа толщиной 1.5 мм. Через кварцевое окошко 14 на противоположной стенке камеры можно с помощью пирометра измерять температуру этой мишени.

После включения устройства предварительной ионизации камера 4 и полый катод 1 источника заполнены слабо ионизованным газом. При подаче напряжения до нескольких сотен вольт от источника питания 5 между анодом 2 и катодными секциями 1, а затем ускоряющего напряжения 1–4 кВ между анодом 2 и сеточными секциями 3 от источника питания 8 плазма низкой концентрации внутри катода инициирует при давлении аргона $p = 0.2\text{--}0.5$ Па тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов [7, 9], и катодная полость заполняется однородным свечением плазменного эмиттера 15.

Катодные секции 1 и отрицательные по отношению к ним сеточные секции 3 образуют электростатическую ловушку для быстрых электронов, эмитированных катодом и образованных в окружающем плазменный эмиттер слое положительного объемного заряда. Ток разряда в цепи анода 2 регулируется изменением напряжения источника 5 и при $p = 0.2\text{--}0.5$ Па достигает нескольких ампер. Ускоренные в слое 16 между эмиттером 15 и сеточными секциями 3 ионы ар-

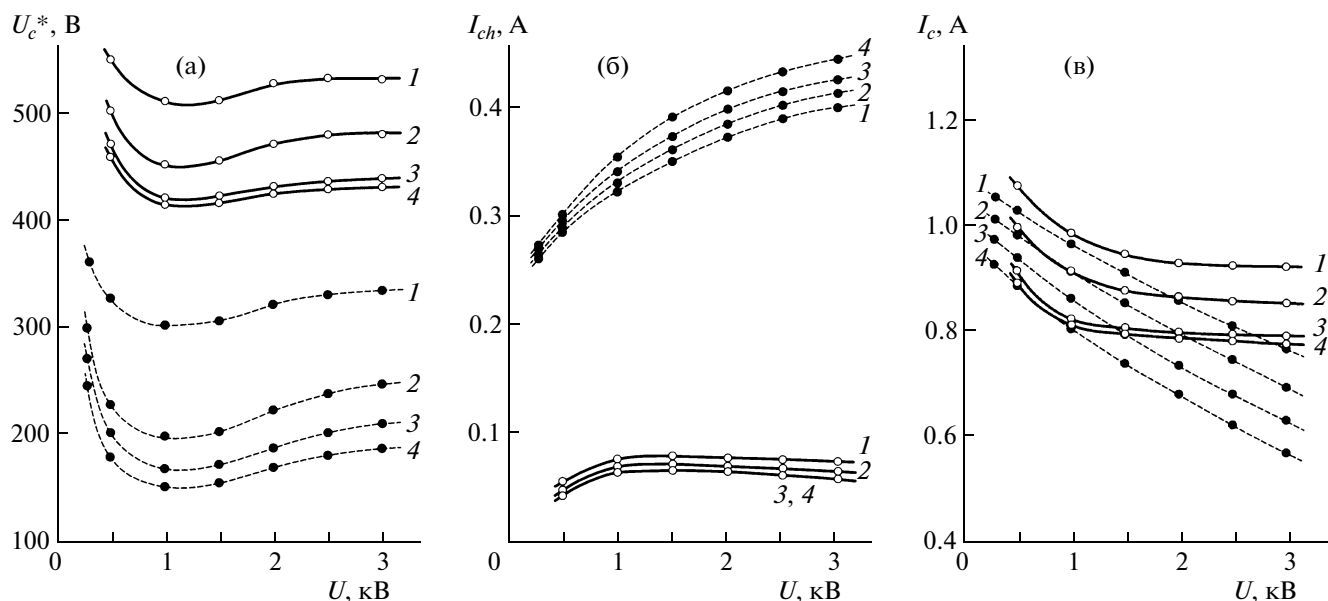


Рис. 2. Зависимости от ускоряющего напряжения U разрядного напряжения U_c^* (а), тока в цепи камеры I_{ch} (б) и тока в цепи катода I_c (в) при токе в цепи эмиссионной сетки $I_g = 0.3$ А, давлении аргона $p = 0.2$ (1), 0.3 (2), 0.4 (3), 0.5 Па (4) и сопротивлении резистора отрицательной обратной связи 7.2 кОм (сплошные линии) и 0.5 кОм (штриховые).

гона 17 через отверстия сетки поступают в образованную пучком плазму в камере 4, где при столкновениях с атомами газа 18 превращаются в быстрые нейтральные атомы 19, бомбардирующие мишень 13 и стенки камеры 4.

Между анодом 2 и камерой 4 включен киловольтметр 20, позволяющий измерять потенциал эмиттера 15 относительно камеры 4. С помощью термоэмиссионного зонда было установлено, что при сопротивлении резистора 11, равном 7.2 кОм, потенциал плазмы в камере 4 не превышает 10 В. Поэтому энергия ионов 17, ускоряемых разностью потенциалов между эмиттером и плазмой в камере, и энергия быстрых атомов аргона 19 практически равны величине, соответствующей измеряемому киловольтметром 20 напряжению U .

При $U \sim 0.5$ кВ ток ионов, испускаемых эмиттером 15 в направлении сетки 3, на два порядка превышает ток электронной эмиссии сетки. Поэтому эквивалентный ток пучка быстрых атомов аргона можно принять равным току ионной эмиссии I_i , равному сумме токов в цепях сетки I_g и камеры I_{ch} , помноженному на геометрическую прозрачность сетки $\eta \approx 0.8$ [5].

При протекании через резистор отрицательной обратной связи 11 тока поступающих на стенки камеры 4 медленных ионов 21 на сеточных секциях 3 индуцируется отрицательный потенциал 150–200 В, препятствующий проникновению электронов из камеры 4 в плазменный эмиттер 15. Плазма в камере 4 образуется в результате нейтрализации объемного заряда ионов 17 и 21 вторич-

ными электронами со стенок камеры, а также в результате ионизации газа в ней атомами 19 и электронами, эмитированными стенками камеры 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 сплошными кривыми представлены зависимости от ускоряющего напряжения U между анодом 2 и камерой 4 разрядного напряжения U_c^* , измеряемого вольтметром 22 (рис. 2а), измеряемого амперметром 12 тока I_{ch} в цепи камеры (рис. 2б) и измеряемого амперметром 7 тока I_c в цепи катода (рис. 2в) при сопротивлении $R = 7.2$ кОм резистора 11 и токе $I_g = 0.3$ А в цепи сетки 3. Штриховыми кривыми представлены те же самые зависимости при минимальном сопротивлении $R = 0.5$ кОм. Из-за падения напряжения на катодных резисторах 6 разрядное напряжение U_c^* больше катодного падения потенциала U_c тлеющего разряда, формирующего плазменный эмиттер, однако разность между ними не превышает 17 В при максимальном токе в цепи катода $I_c \sim 1$ А.

С уменьшением сопротивления R от 7.2 до 0.5 кОм ограничивающая ток электронов из камеры в источник пучка и определяемая падением напряжения на резисторе 11 при прохождении через него тока I_{ch} разность потенциалов между камерой и эмиссионной сеткой снижается от ~ 200 до ~ 100 В. При этом разрядное напряжение U_c^* снижается примерно в 2 раза (рис. 2а), а ток I_{ch} в цепи камеры возрастает на порядок (рис. 2б).

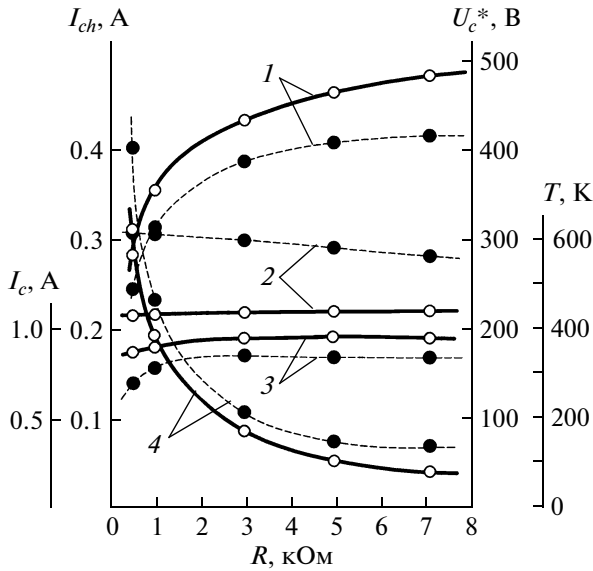


Рис. 3. Зависимости от сопротивления R резистора отрицательной обратной связи разрядного напряжения U_c^* (1), температуры мишени T (2), тока в цепи катода I_c (3) и тока в цепи камеры I_{ch} (4) при давлении аргона $p = 0.4$ Па, токе в цепи эмиссионной сетки $I_g = 0.3$ А и ускоряющем напряжении $U = 0.5$ кВ (сплошные линии) и $U = 2$ кВ (штриховые).

Зависимости разрядного напряжения U_c^* от U имеют минимум при $U \sim 1$ кВ, причем с уменьшением давления U_c^* повышается.

При сопротивлении резистора $R = 0.5$ кОм и постоянном токе в цепи эмиссионной сетки $I_g = 0.3$ А увеличение ускоряющего напряжения U от 0.3 до 3 кВ приводит к заметному снижению тока I_c в цепи катода (рис. 2в) и росту тока I_{ch} в цепи камеры (рис. 2б). С увеличением давления аргона p ток I_{ch} в цепи камеры возрастает, а ток I_c в цепи катода снижается.

При $R = 7.2$ кОм ток I_{ch} в цепи камеры слабо зависит от U и лишь незначительно снижается с ростом давления. Ток I_c в цепи катода также уменьшается с ростом давления и слабо зависит от U . Лишь с уменьшением U от 1 до 0.5 кВ он повышается примерно на 10%.

На рис. 3 представлены зависимости от сопротивления R резистора отрицательной обратной связи разрядного напряжения U_c^* , температуры T нагреваемой пучком мишени, тока в цепи катода I_c и тока в цепи камеры I_{ch} при постоянном токе в цепи сетки $I_g = 0.3$ А, ускоряющем напряжении $U = 0.5$ кВ (сплошные кривые) и 2 кВ (штриховые кривые). С уменьшением R от 7.2 до 0.5 кОм разрядное напряжение U_c^* снижается в 2 раза, ток I_{ch} в цепи камеры возрастает на порядок, а ток I_c в

цепи катода слабо зависит от R и незначительно снижается лишь при уменьшении R от 2 до 0.5 кОм. При $U = 0.5$ кВ ток I_c больше, чем при $U = 2$ кВ, а температура нагреваемой пучком мишени T практически не зависит от R . Однако при $U = 2$ кВ температура T с уменьшением R от 7.2 до 0.5 кОм монотонно возрастает от 570 до 620 К.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Инжектируемые в источник пучка через отверстие его эмиссионной сетки 3 электроны из камеры 4 (рис. 1) не попадают на поверхность сетки, и их ток проходит в цепи бомбардируемого ими катода 1. Ток в цепи сетки I_g является суммой тока поступающих на ее поверхность медленных ионов 21, образованных в камере в результате перезарядки, тока бомбардирующих сетку ускоренных ионов из плазменного эмиттера 15 и обусловленного этой бомбардировкой тока электронной эмиссии.

При $R > 7$ кОм, когда сетка практически полностью запирает в камере электроны образованной в ней плазмы, и при минимальном ускоряющем напряжении $U = 0.5$ кВ, когда током ионно-электронной эмиссии сетки можно пренебречь, ток испускаемых эмиттером 15 в направлении сетки ионов $I_i = I_g + I_{ch}$, а эквивалентный ток пучка быстрых атомов аргона $I_b = \eta I_i$, где η — геометрическая прозрачность сетки [5]. Сплошные кривые на рис. 2б показывают, что в этом случае ток в цепи камеры $I_{ch} \sim 0.05$ А на порядок меньше тока в цепи сетки $I_g = 0.3$ А.

Это обусловлено тем, что в исследованном диапазоне параметров перезарядка ускоренных ионов аргона происходит на расстоянии от сетки, не превышающем ее радиус ~ 0.1 м. Действительно, сечение резонансной перезарядки ионов аргона σ при увеличении их энергии от 0.5 до 3 кэВ снижается от $3 \cdot 10^{-19}$ до $2 \cdot 10^{-19}$ м² [10]. Если пренебречь нагревом газа в камере, то при давлении 0.2 Па плотность газа $n_0 = 5 \cdot 10^{19}$ м⁻³, и длина перезарядки $\lambda = 1/\sigma n_0$ увеличивается с ростом энергии от 0.067 до 0.1 м. При давлении 0.5 Па λ изменяется от 0.027 до 0.04 м. Поэтому основная доля образованных при перезарядке медленных ионов 21 поступает на эмиссионную сетку — ближайшую от места их образования поверхность, а не на стенки камеры, причем с увеличением давления их ток в цепи сетки немного возрастает, а ток I_{ch} в цепи камеры уменьшается.

При увеличении ускоряющего напряжения U коэффициент ионно-электронной эмиссии в результате бомбардировки титановой сетки ионами аргона возрастает до $\gamma_i \approx 1$ при максимальном ускоряющем напряжении $U = 3$ кВ [11]. Ток эмитуемых сеткой электронов повышается до $I_e = \gamma_i(1 - \eta)I_i \approx 0.2I_i$, где $\eta \approx 0.8$ — геометрическая

прозрачность сетки, и при неизменной величине тока в цепи сетки $I_g = I_i - I_{ch} + I_e = 0.3$ А ток ионной эмиссии I_i и ток в цепи камеры I_{ch} немного снижаются. Если повышение I_{ch} с увеличением U от 0.5 до 1.5 кВ можно объяснить ростом длины перезарядки λ , а также выравниванием концентрации плазмы в камере в результате ионизации газа в ней быстрыми атомами [3], то незначительное снижение I_{ch} с дальнейшим ростом U от 1.5 до 3 кВ можно связать именно с понижением тока ионной эмиссии I_i и эквивалентного тока пучка $I_b = \eta I_i$.

Ток ионов в цепи катода пропорционален току ионной эмиссии I_i и поэтому с ростом U и I_e он также снижается. Однако в цепи катода протекает и ток I_e эмитированных сеткой электронов, увеличивающийся с ростом U . При $U = 0.5$ кВ энергия бомбардирующих титановый катод электронов $\epsilon = e(U - U_c^*)$ близка к нулю и коэффициент вторичной электронной эмиссии $\gamma_e \approx 0$. С увеличением энергии ϵ до ~ 0.5 кВ он возрастает до максимальной величины $\gamma_e \sim 2$, а далее медленно снижается [12]. Поэтому бомбардирующие катод электроны сначала при $U < 0.5$ кВ снижают величину тока I_c в его цепи (сплошные кривые на рис. 2в), а затем при $U > 1$ кВ увеличивают ее. В результате при $U > 1.5$ кВ ток I_c практически не изменяется, несмотря на понижение I_i .

Повышение разрядного напряжения U_c^* с уменьшением давления p (сплошные кривые на рис. 2а) свидетельствует о том, что рабочий диапазон источника пучка 0.2–0.5 Па попадает в так называемый нижний диапазон области эффекта электростатической ловушки [7], в котором расходимая на ионизацию газа доля энергии быстрых электронов с уменьшением p снижается. Бомбардировка катода эмитированными сеткой быстрыми электронами повышает ток его электронной эмиссии. С ростом эмиссии катода разрядное напряжение U_c^* снижается [7], и поэтому зависимость U_c^* от U имеет минимум как раз при напряжении $U \sim 1$ кВ, когда энергия бомбардирующих катод электронов $e(U - U_c^*) \sim 0.5$ кэВ соответствует максимуму γ_e .

С уменьшением U ниже 0.5 кВ потенциал катода $U - U_c^*$ снижается до отрицательных значений, и эмитированные катодом быстрые электроны начинают уходить из электростатической ловушки через отверстия сетки. Это вызывает быстрый рост U_c^* и погасание разряда.

При $R = 0.5$ кОм (штриховые кривые на рис. 2) ток в цепи камеры I_{ch} на порядок выше, чем при $R = 7.2$ кОм (рис. 2б), а разрядное напряжение U_c^* в 2–3 раза ниже (рис. 2а). Рост тока электронов из

камеры обеспечивается повышением интенсивности ионизации газа в ней с увеличением давления газа и энергии быстрых атомов [3].

Кроме того, при повышении до десятков вольт потенциала плазмы в камере в результате ухода электронов из нее в источник пучка [8] увеличивается энергия электронов, эмитируемых стенками в результате бомбардировки быстрыми атомами и ускоряемых в слое между плазмой и стенками, а следовательно, и интенсивность ионизации ими газа. С увеличением U от 0.6 до 3 кВ коэффициент вторичной электронной эмиссии γ_e и ток эмитируемых катодом электронов снижаются, а I_c снижается на величину, сравнимую при $U = 3$ кВ с током быстрых электронов в источник.

Таким образом, при постоянном токе I_g в цепи сетки источника и увеличении ускоряющего напряжения U от 0.5 до 3 кВ эквивалентный ток пучка снижается менее чем на 20%. При этом инжекция электронов в источник пучка приводит к снижению тока I_c в цепи полого катода источника и увеличению на порядок тока в цепи камеры I_{ch} . Кроме того, оба тока зависят от давления, а ток катода зависит также от нестабильного коэффициента вторичной электронной эмиссии γ_e , определяемого состоянием катодной поверхности [12]. В связи с этим использовать измеряемые величины I_c и I_{ch} для оценки эквивалентного тока пучка быстрых атомов нельзя.

Меньше всего инжекция электронов влияет на ток в цепи сетки I_g . Так как ток ионной эмиссии I_i можно считать пропорциональным току в цепи сетки I_g и так как в отсутствие инжекции электронов из камеры в источник $I_i = I_g + I_{ch}$, для определения эквивалентного тока пучка $I_b = \eta I_i$ необходимо полностью запереть электроны в камере достаточно большим отрицательным потенциалом сетки, измерить при некотором значении I_g ток в цепи камеры I_{ch} и вычислить $I_b = \eta I_i = \eta(I_g + I_{ch})$ при данном I_g . Повышая затем ток пучка посредством инжекции в источник электронов из камеры, можно, не обращая внимания на величину I_{ch} , считать, что I_b увеличивается прямо пропорционально I_g .

Независимость эквивалентного тока пучка I_b от тока в цепи камеры I_{ch} при неизменном токе в цепи сетки I_g подтверждается постоянством температуры T нагреваемой пучком мишени при ускоряющем напряжении $U = 0.5$ кВ (сплошная кривая 2 на рис. 3). Незначительное снижение T от 450 до 430 К с уменьшением R от 7.2 до 0.5 кОм можно объяснить повышением до десятков вольт потенциала плазмы в камере и соответствующим снижением энергии пучка. Повышение T от 570 до 620 К при $U = 2$ кВ (штриховая кривая 2 на рис. 3) можно объяснить дополнительным нагревом мишени тепловым излучением катода, бомбардиру-

емого электронами с энергией ~ 1.8 кэВ и током до ~ 0.4 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжекция в источник пучка быстрых нейтральных атомов через эмиссионную сетку с высокой геометрической прозрачностью η электронов из плазмы, образованной пучком в рабочей вакуумной камере, в 2–3 раза уменьшает катодное падение тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов, формирующего плазменный эмиттер источника. Это позволяет в несколько раз повысить эквивалентный ток пучка или уменьшить рабочее давление газа. При постоянном токе в цепи сетки I_g инжекция электронов заметно снижает ток в цепи холодного полого катода источника и на порядок повышает ток в цепи камеры. Поэтому оценивать эквивалентный ток I_b пучка быстрых нейтральных атомов можно лишь по току в цепи сетки I_g , на который инжекция не оказывает влияния. Для определения I_b необходимо полностью запереть электроны в камере, измерить при некотором значении I_g ток в цепи камеры I_{ch} и вычислить $I_b = \eta(I_g + I_{ch})$. При последующем повышении эквивалентного тока пучка I_b посредством инжекции в источник электронов из камеры полученное значение I_b нужно умножить на относительное увеличение тока в цепи сетки I_g .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Metel A.S., Grigoriev S.N.* // US Pat. № 6,285,025. Int. Cl. H01S 1/00; H01S 3/00. 2001.
2. *Grigoriev S., Melnik Yu., Metel A.* // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 156. № 1/3. P. 44.
3. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 4. С. 387.
4. *Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С. и др.* // Вестник МГТУ “Станкин”. 2010. № 4(12). С. 47.
5. *Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В.* // ПТЭ. 2009. № 4. С. 166.
6. *Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В.* // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6. С. 23.
7. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 12. С. 1140.
8. *Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С.* // Инженерная физика. 2005. Вып. 3. С. 23.
9. *Метель А.С., Григорьев С.Н.* Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. М.: Янус-К, 2005.
10. *Phelps A.V.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1991. V. 20. № 3. P. 557.
11. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Прудников В.В.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 674.
12. *Baglin V., Wojko J., Groebner O. et al.* // 7th European Particle Accelerator Conference: Proceedings. Vienna, Austria. 2000. P. 217.