

УДК 537.525

**ИСТОЧНИКИ ШИРОКИХ ПУЧКОВ БЫСТРЫХ МОЛЕКУЛ
С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ХОЛОДНЫМИ КАТОДАМИ
И ЭМИССИОННЫМИ СЕТКАМИ**

© 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 08.04.2011 г.

Приводятся результаты исследований источников пучков прямоугольного и круглого сечений площадью до 0.8 м^2 быстрых нейтральных атомов и молекул, получаемых в результате перезарядки при столкновениях с молекулами газа ионов, ускоренных разностью потенциалов между плазменным эмиттером источника и вторичной плазмой в рабочей вакуумной камере. В качестве эмиттера используется плазма тлеющего разряда, при котором электроны удерживаются в электростатической ловушке, образованной холодным полым катодом и отрицательной по отношению к катоду и камере эмиссионной сеткой. Для предотвращения пробоев между эмиттером и катодом при токе в цепи последнего до 10 А, а также между эмиттером и сеткой при напряжении между ними до 10 кВ катод и сетка выполнены в виде изолированных друг от друга секций, соединенных с источниками питания через резисторы. При сопротивлении резистора $R > U/I_0$, где U – напряжение источника питания, I_0 – минимальный для данного материала секции ток устойчивого горения вакуумной дуги, переход от тлеющего разряда к стационарной дуге полностью исключается, несмотря на многочисленные пробои микросекундной длительности, обусловленные загрязнением электродов источника во время работы диэлектрическими пленками и другими стимуляторами дуги.

ВВЕДЕНИЕ

Травление поверхности ионами через маску (шаблон) является эффективным методом получения газодинамических канавок глубиной от единиц до десятков микрометров на поверхности бесконтактных торцовых уплотнений компрессоров и газовых подшипников, изготовленных из сверхтвердых износостойких материалов [1]. В случае изделий из проводящих материалов широко применяется иммерсионное травление ионами, ускоряемыми подаваемым на изделие напряжением отрицательной полярности из плазмы, в которую это изделие погружено. Если материал изделия является диэлектриком, то иммерсионное травление невозможно и обрабатывать его нужно ионным пучком большого поперечного сечения с нейтрализованным объемным зарядом.

Однако не все типы ионных источников подходят для травления диэлектриков. Например, источник пучка ионов аргона $\varnothing 0.5 \text{ м}$ [2] при давлении в рабочей камере 0.02–0.04 Па, энергии ионов 1 кэВ и плотности тока ионов 25 А/м^2 может достаточно однородно травить плоские металлические подложки диаметром до нескольких сотен миллиметров со скоростью 2–5 мкм/ч. Использовать же его для травления диэлектрических материалов, например оксида алюминия или нитрида кремния, нецелесообразно. Дело в том,

что значительная доля распыляемого материала через сетки ионно-оптической системы поступает внутрь источника, отравляет его термоэмиссионные катоды и осаждаются на его аноде, сетках и других элементах конструкции. Осаждение непроводящих покрытий внутри источника быстро приведет к выходу его из строя.

В источниках пучков быстрых нейтральных молекул с поперечным сечением площадью до $0.5\text{--}1 \text{ м}^2$ [3, 4] для поддержания достаточной электропроводности поверхности используемых в них холодных полых катодов внутренняя поверхность единственной эмиссионной сетки источника с геометрической прозрачностью 75–80% непрерывно распыляется ионами, ускоряемыми в слое между сеткой и плазменным эмиттером. Поэтому кроме поступающего через отверстия сетки материала обрабатываемого диэлектрического изделия на катоде непрерывно осаждаются атомы металла. В большинстве источников быстрых нейтральных молекул сетки изготовлены из листа титана толщиной до 3 мм, а диаметр отверстий в сетках составляет от 2 до 8 мм. При распылении сетки толщиной 3 мм со скоростью до 5 мкм/ч источник может травить диэлектрические материалы не менее 500 ч, после чего отработавшую свой срок сетку заменяют новой.

В качестве источников питания разряда и ускоряющего напряжения обычно используют два источника постоянного тока конверторного типа с защитой от образования на электродах катодных пятен вакуумной дуги. Однако при травлении диэлектрических материалов или при обработке любых материалов быстрыми молекулами кислорода или других химически активных газов количество стимуляторов катодных пятен на холодном полом катоде и на эмиссионной сетке резко возрастает. В результате частота пробоев между плазменным эмиттером и этими электродами может превысить максимально допустимую частоту срабатывания устройства защиты от катодных пятен, что приведет к выходу источников питания из строя.

Поэтому при травлении диэлектриков целесообразно использовать источник быстрых нейтральных молекул с полым катодом и сеткой в виде наборов отдельных изолированных электрически друг от друга секций [3]. Их можно соединить с источниками питания через индивидуальные резисторы, ограничивающие ток в цепи каждой секции величиной, меньшей минимального тока горения дуги. В таком источнике при пробое диэлектрической пленки на поверхности отдельной секции зажигания дуги не происходит. В данной работе приводятся результаты исследований трех источников с секционированными электродами пучков быстрых молекул квадратного, прямоугольного и круглого поперечного сечения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 представлена схема источника пучка квадратного сечения $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$ с электростатической ловушкой, образованной холодным полым катодом длиной 0.9, шириной 0.9 и глубиной 0.13 м, а также квадратной эмиссионной сеткой, состоящей из 15 параллельных сеточных секций 1 шириной по 56 мм с зазорами между ними по 4 мм. В каждой секции, изготовленной из листа титана толщиной 2 мм, просверлены отверстия $\varnothing 7.6$ мм на расстоянии 8 мм между их центрами. Геометрическая прозрачность такой секционированной сетки примерно равна 80%. С помощью керамических изоляторов, защищенных от запыления экранами, секции крепятся на держателях.

Секции изолированы друг от друга и через индивидуальные вводы напряжения, а также через индивидуальные сеточные резисторы 2 и амперметры 3 и 4 соединены с отрицательным полюсом источника ускоряющего напряжения 5. Положительный полюс источника 5 через отдельный ввод напряжения соединен со стержневым анодом 6 диаметром 20 мм, введенным внутрь полого катода через отверстие в его боковой поверхности. Площадь поверхности анода, находящейся внутри полого катода, равна 0.012 м^2 .

Полый катод состоит из расположенных на расстоянии 64 мм друг от друга восьми внутренних П-образных катодных секций 7 каждая длиной 900, шириной 56 и глубиной 125 мм, семи охватывающих их внешних П-образных катодных секций 8 длиной 910, шириной 100 и глубиной 130 мм, а также двух плоских торцовых катодных секций 9 и 10 на расстоянии по 3 мм от крайних П-образных секций 7. Все катодные секции изготовлены из листа титана толщиной 2 мм и с помощью защищенных от запыления керамических изоляторов смонтированы на плоском электроде 11 длиной 900 и шириной 600 мм, закрепленном с помощью опорных изоляторов на задней стенке охлаждаемого водой заземленного корпуса источника (на рис. 1 не показан).

Секции изолированы друг от друга и через 17 индивидуальных вводов напряжения, а также через 17 индивидуальных катодных резисторов 12 и амперметр 13 соединены с отрицательным полюсом источника питания разряда 14. Положительный полюс источника 14 соединен с анодом 6 и с электродом 11. Соединение анода 6 с электродом 11, площадь поверхности которого в 90 раз больше, исключает эффект электростатической ловушки и паразитный газовый разряд за пределами полого катода в пространстве между ним и корпусом источника пучка. Объем V образованной полым катодом и сеткой электростатической ловушки равен 0.105 м^3 , а площадь S ограничивающей этот объем поверхности равна 2.09 м^2 .

Источник устанавливается на окне высотой 1050 и длиной 950 мм прямоугольной вакуумной камеры высотой 1400, длиной 1400 и шириной 400 мм, откачиваемой диффузионным насосом. Рабочий газ через игольчатый натекаль и описанное в [5] устройство предварительной ионизации подается в камеру, а из нее попадает в источник пучка через его эмиссионную сетку.

После включения устройства предварительной ионизации камера и полый катод источника заполняются слабоионизованным газом. При подаче между анодом 6 и секциями 1 эмиссионной сетки ускоряющего напряжения 1–6 кВ от источника питания 5, а также напряжения 0.5–1 кВ от источника питания разряда 14 между анодом 6 и катодными секциями 7–10 плазма низкой концентрации внутри полого катода инициирует при давлении аргона, азота или кислорода ~ 0.1 Па тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов [6].

После зажигания разряда можно наблюдать через оптическое окно вакуумной камеры и прозрачную эмиссионную сетку однородное свечение плазменного эмиттера 15. Ток в цепи катода регулируется изменением напряжения источника 14, измеряемого вольтметром 16, и при давлении 0.05–0.5 Па может достигать 5 А. Ионы, ускоренные в слое положительного объемного заряда

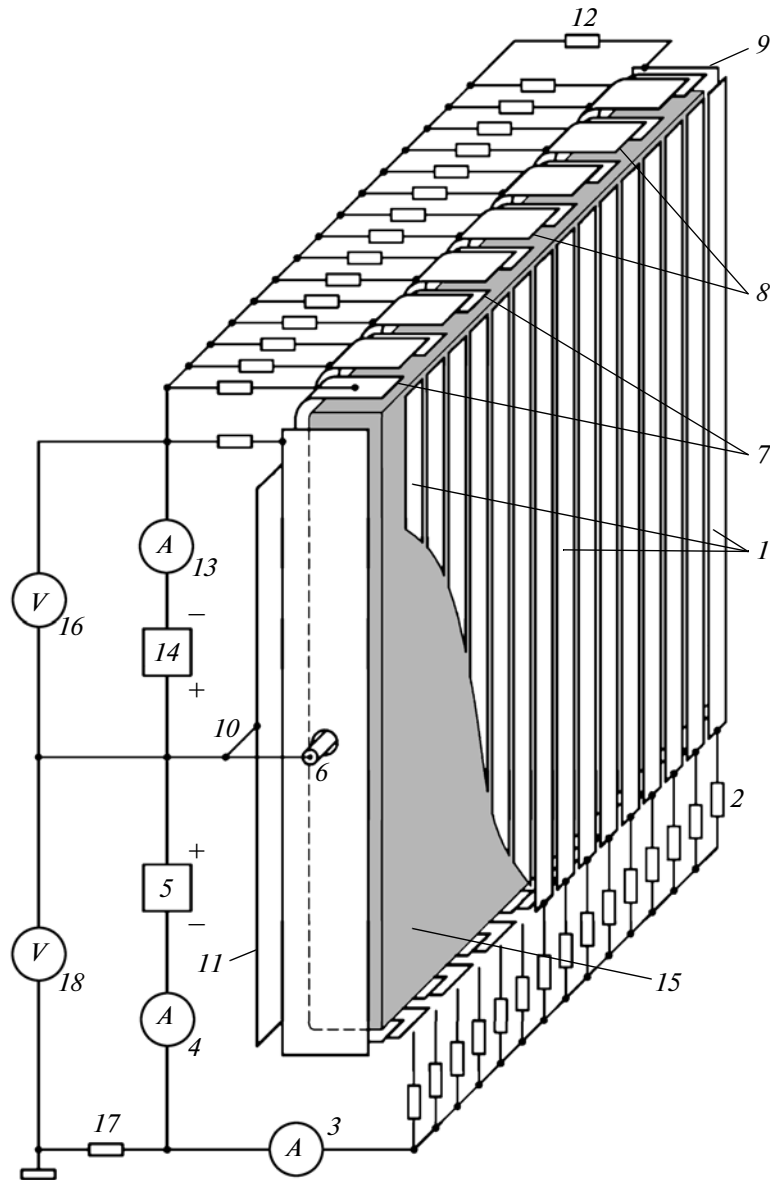


Рис. 1. Схема источника пучка быстрых нейтральных молекул с квадратным поперечным сечением $0,9 \times 0,9 \text{ м}^2$. 1 – секции эмиссионной сетки; 2 – сеточные резисторы; 3, 4, 13 – амперметры; 5 – источник ускоряющего напряжения; 6 – анод; 7–10 – секции полого катода; 11 – плоский электрод; 12 – катодные резисторы; 14 – источник питания разряда; 15 – плазменный эмиттер; 16 – вольтметр; 17 – резистор обратной связи; 18 – киловольтметр.

между эмиттером 15 и сеточными секциями 1, через отверстия в секциях пролетают во вторичную плазму в рабочей вакуумной камере, где при столкновениях с молекулами газа превращаются в быстрые нейтральные молекулы [5].

При протекании через резистор обратной связи 17 тока поступающих в камеру положительных зарядов на секциях эмиссионной сетки индуцируются отрицательные по отношению к камере потенциалы, препятствующие проникновению электронов из вторичной плазмы в плазменный эмиттер 15. В случае полной отсечки электронов потенциал вторичной плазмы превышает потен-

циал камеры менее чем на 10 В [7]. При достаточной величине площади погруженной в плазменный эмиттер 15 поверхности анода 6 анодное падение разряда отрицательно и также не превышает 10 В. Поэтому энергию ускоренных ионов и быстрых молекул можно полагать равной величине, соответствующей измеряемому киловольтметром 18 напряжению между анодом и заземленной камерой.

Пренебрегая током эмиссии электронов с поверхности секций сетки 1 в результате ее бомбардировки ионами из плазменного эмиттера 15, можно эквивалентный ток пучка быстрых ней-

тральных молекул полагать равным измеряемому амперметром 4 току I_i ионов, покидающих поверхность эмиттера 15 в направлении сетки, помноженному на ее прозрачность $\eta \approx 0.8$.

Представленный на рис. 2 и 3 источник пучка прямоугольного сечения $0.17 \times 0.9 \text{ м}^2$ отличается от описанного выше лишь меньшей примерно в 5 раз длиной сеточных и катодных элементов. Кроме того, длина и глубина его П-образных катодных секций, начиная с четвертой от центра, монотонно возрастают, а ширина перфорированных участков сеточных секций соответствует ширине полого катода, увеличивающейся вблизи его торцов (рис. 3). Источник устанавливается на цилиндрической вакуумной камере высотой 1100 и диаметром 600 мм (рис. 2) и используется для травления быстрыми атомами аргона длинномерных изделий. Переменная ширина полого катода позволила уменьшить до 5% неравномерность распределения тока пучка по длине его сечения и, соответственно, неоднородность травления планетарно вращающихся внутри камеры (рис. 2) изделий в пределах ее рабочей зоны высотой 800 мм. При использовании катода с постоянной шириной 170 мм интенсивность травления в середине указанной зоны на 25% выше, чем на ее краях.

Внутри полого катода этого источника через отверстие в центре второй от торца катодной секции введен анод в форме камертона (рис. 3б). Он электрически соединен с плоским электродом длиной 900 и шириной 150 мм, закрепленным с помощью опорных изоляторов на охлаждаемом водой несущем фланце. Этот электрод с большой площадью поверхности также служит поглотителем электронов и препятствует возникновению паразитного разряда в пространстве между фланцем и полым катодом. На нем с помощью керамических изоляторов закреплены держатели всех катодных секций. Объем V электростатической ловушки, образованной показанными на рис. 3а полым катодом и сеткой, равен 0.019 м^3 , а площадь S ограничивающей этот объем поверхности равна 0.56 м^2 .

Под защитным кожухом источника расположены 33 ввода (рис. 3в) для соединения источников питания 5 и 14 (рис. 1) с анодом, сеточными и катодными секциями, а также 17 катодных резисторов ПЭВ-50 сопротивлением по 200 Ом с рассеиваемой мощностью до 50 Вт и 15 сеточных резисторов ПЭВ-50 сопротивлением по 1 кОм. В описанном выше источнике пучка сечением $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$ использованы точно такие же вводы, однако большая поверхность охлаждаемого водой несущего фланца позволила использовать в нем более крупные резисторы ПЭВ-100 с большей в 2 раза мощностью рассеивания, разместить их в один слой и в результате уменьшить высоту защитного кожуха почти в 2 раза.

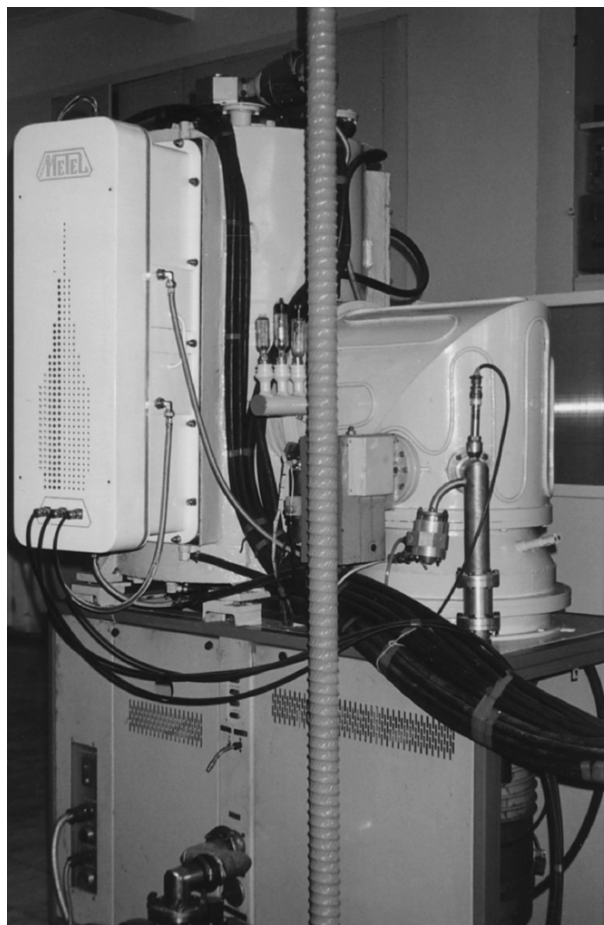


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для испытаний источника пучка прямоугольного сечения $0.17 \times 0.9 \text{ м}^2$ и травления пучком быстрых атомов аргона длинномерных изделий в вакуумной камере $\varnothing 600$ и высотой 1100 мм.

На рис. 4а показан внешний вид источников пучков быстрых нейтральных молекул круглого сечения $\varnothing 180 \text{ мм}$, а на рис. 4б — секционированного полого катода одного из этих источников после длительной эксплуатации. Из двенадцати катодных Г-образных секций половина — внутренние секции, охватываемые шестью внешними секциями. Ширина зазоров между внутренними и внешними секциями катода не превышает 2 мм. При эффективном диаметре 0.21 м, глубине полого катода 0.09 м и зазоре между ним и эмиссионной сеткой 5 мм объем V образованной ими электростатической ловушки равен 0.0033 м^3 , а площадь S ограничивающей этот объем поверхности равна 0.13 м^2 . В центре дна полого катода расположен дисковый анод $\varnothing 30 \text{ мм}$. Эмиссионная сетка источника состоит из шести изолированных друг от друга секторов с отверстиями диаметром 7.6 мм на расстоянии 8 мм между их центрами.

Как и в описанных выше источниках пучков квадратного и прямоугольного сечения все катод-

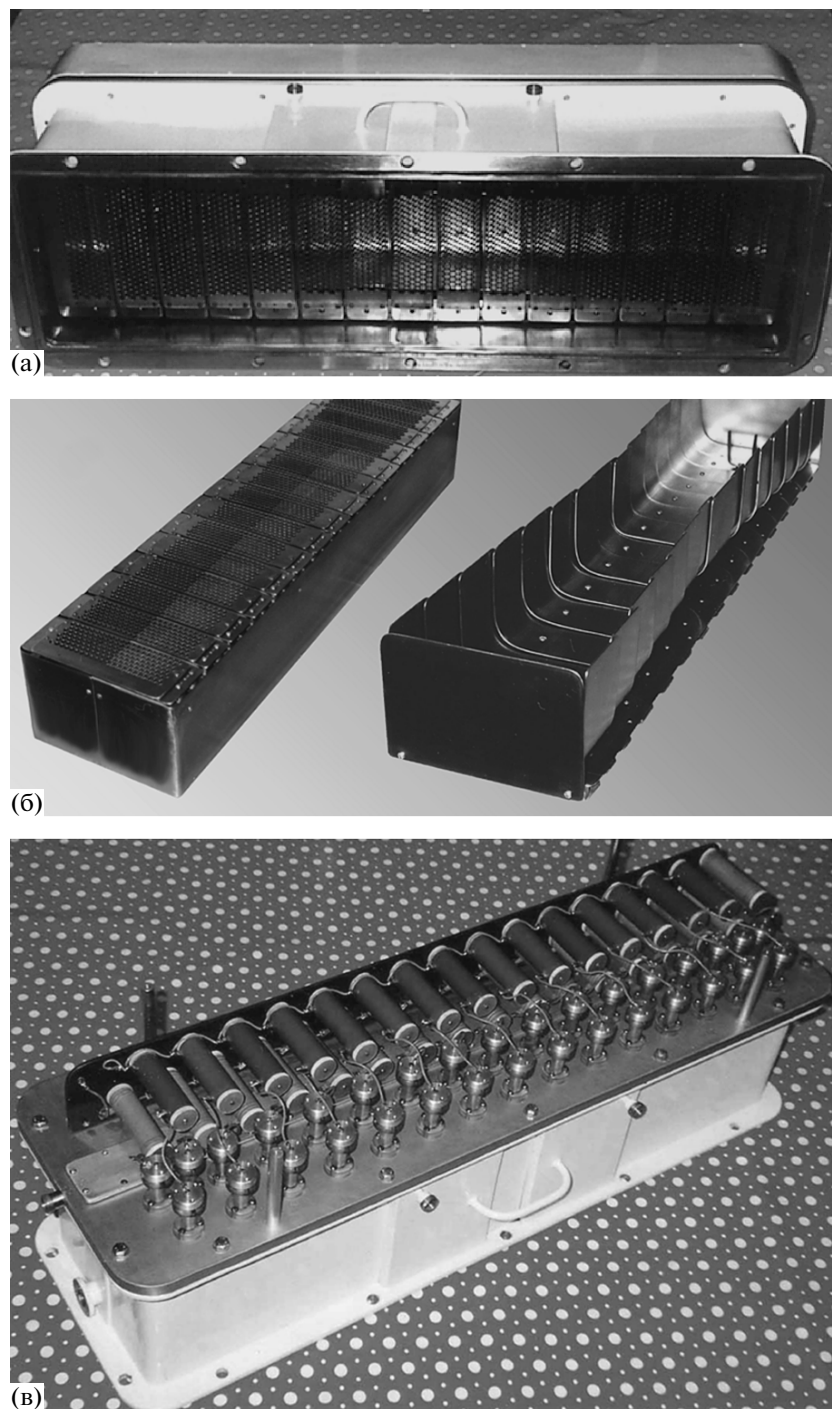


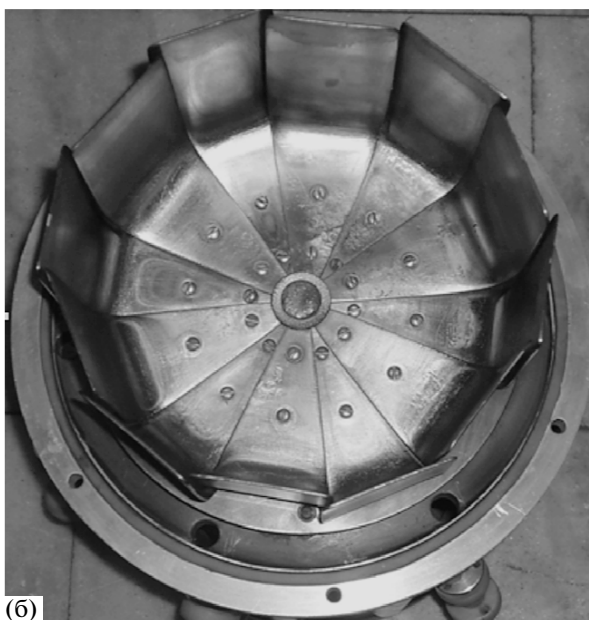
Рис. 3. Внешний вид: **а** – источника пучка прямоугольного сечения $0.17 \times 0.9 \text{ м}^2$, **б** – его секционированной эмиссионной сетки (слева) и секционированного полого катода (справа) с увеличивающейся вблизи его торцов шириной и с анодом в форме камертона, **в** – вводов напряжения, сеточных и катодных резисторов, смонтированных под защитным кожухом на охлаждаемом водой несущем фланце.

ные, сеточные секции и анод соединены с источниками питания разряда и ускоряющего напряжения через 19 вводов напряжения, 12 катодных резисторов и 6 сеточных резисторов, расположенных под защитным кожухом (рис. 4а). Катодные секции с помощью керамических изоляторов

смонтированы на соединенном электрически с анодом и поэтому являющемся поглотителем электронов круглом электроде $\text{Ø}180 \text{ мм}$, закрепленном с помощью опорных изоляторов на охлаждаемом водой несущем фланце заземленного корпуса источника. Источник пучка круглого се-



(a)



(б)

Рис. 4. Внешний вид источников пучков круглого сечения $\varnothing 180$ мм с секционированными эмиссионными сетками (а) и полового катода из 12 секций с анодом $\varnothing 30$ мм в центре его дна (б).

чения устанавливается на посадочном фланце с проходным отверстием диаметром 250 мм установки “Булат-6” и используется для травления через маску фасонных канавок глубиной до 20 мкм на поверхности плоских образцов из оксида алюминия [8], нитрида кремния и других материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 5 представлены распределения токов в цепях сеточных резисторов 2 (рис. 1) сопротивлением по 1 кОм источника пучка сечением 0.9×0.9 м² при ускоряющем напряжении 4 кВ и измеряемом амперметром 4 токе ионной эмиссии I_i от 1 до 4 А. При давлении аргона $p = 0.5$ Па (штриховые ли-

нии на рис. 5) измеряемый амперметром 3 (рис. 1) ток в цепи эмиссионной сетки примерно в 8 раз выше тока в цепи камеры, равного разности показаний амперметров 4 и 3. При токе ионной эмиссии $I_i = 1$ А (рис. 5) ток в цепи ближайшей к аноду секции сетки $I_1 = 52$ мА, максимальный ток $I_6 = 70$ мА наблюдается в цепи шестой от анода секции сетки, а с дальнейшим увеличением номера секции k ток в ее цепи I_k монотонно снижается до 37 мА при $k = 15$. С увеличением тока эмиссии до 4 А токи в цепях секций сетки возрастают примерно в 4 раза, а их распределение становится более однородным.

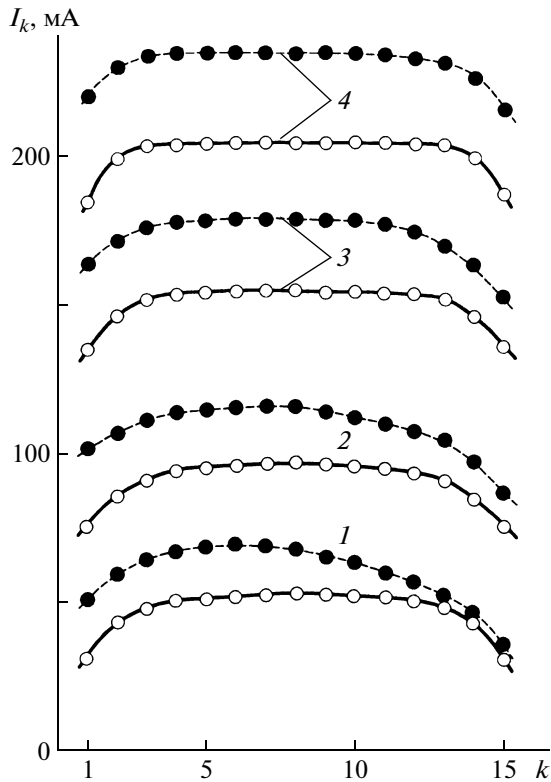


Рис. 5. Зависимости тока в цепи секции эмиссионной сетки источника пучка сечением $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$ от ее порядкового номера со стороны анода при энергии пучка 4 кэВ, давлении аргона 0.05 Па (сплошные линии), 0.5 Па (штриховые) и эквивалентном токе пучка 0.8 (1), 1.6 (2), 2.4 (3) и 3.2 А (4).

С уменьшением давления аргона до 0.05 Па отношение суммарного тока в цепях секций сетки к току в цепи камеры снижается от ~ 8 до ~ 6 , представленные на рис. 5 сплошными линиями распределения токов по секциям становятся симметричными относительно центральной секции с номером $k = 8$ и более однородными, причем увеличение I_i от 1 до 4 А сопровождается ростом отношения $I_1/I_8 \approx I_{15}/I_8$ от 0.5 до 0.9.

При токе ионной эмиссии $I_i = 1$ А и давлении аргона 0.5 Па ток 0.11 А в цепи камеры через резистор 17 (рис. 1) сопротивлением 1 кОм создает на нем падение напряжения 110 В, а ток 70 мА через резистор шестой секции создает на нем максимальное среди сеточных резисторов падения напряжения $U_6 = 70$ В. Поэтому отрицательный относительно камеры потенциал пятой секции равен -40 В. При диаметре отверстий сетки 7.6 мм и плотности тока ионной эмиссии $\sim 1.25 \text{ А/м}^2$ он полностью отсекает ток электронов из вторичной плазмы в камере в плазменный эмиттер. Потенциалы остальных секций сетки еще ниже, и поэтому электроны из вторичной плазмы вообще не могут проникать через сетку в источник пучка.

С увеличением тока ионной эмиссии до $I_i = 4$ А провисание потенциала в отверстиях сетки возрастает, и поэтому для отсечки тока электронов из камеры запирающий потенциал сетки необходимо увеличить. В рассматриваемом источнике пучка это требование выполняется автоматически, так как при $I_i = 4$ А ток через резистор 17 повышается до 0.45 А, токи через сеточные резисторы возрастают до ~ 0.24 А (рис. 5) и потенциалы секций сетки становятся примерно равными -210 В.

При постоянном токе ионной эмиссии с уменьшением в 10 раз давления аргона токи в цепях секций сетки немного снижаются, а ток в цепи резистора 17 повышается. В результате запирающая электроны из камеры разность потенциалов между камерой и сеткой лишь увеличивается, что гарантирует стабильную работу источника пучка во всем диапазоне давления от 0.05 до 0.5 Па даже при использовании в качестве одного из рабочих газов кислорода. В этом случае на катодных и сеточных секциях наблюдается множество ярких искр, обусловленных непрерывными пробоями образующихся на их поверхностях пленок окиси титана. Однако работу источника пучка с энергией быстрых молекул до 4 кэВ и эквивалентным током до $I_i \eta = 4 \cdot 0.8 = 3.2$ А эти пробои не нарушают.

При давлении аргона 0.05 Па и указанных максимальных параметрах мощность, рассеиваемая в сеточных резисторах сопротивлением 1 кОм, равна $15RI_k^2 = 15 \cdot 1000 \cdot 0.23^2 = 784$ Вт. Измерение токов в цепях секций полого катода показало, что при ускоряющем напряжении $U = 4$ кВ они практически равны токам в цепях секций сетки, а при $U = 1$ кВ лишь незначительно их превышают. Поэтому мощность, рассеиваемая в катодных резисторах сопротивлением по 200 Ом, примерно равна $17 \cdot 200 \cdot 0.23^2 = 178$ Вт. В результате суммарная рассеиваемая в резисторах мощность 962 Вт оказывается в 13 раз меньше мощности 12.8 кВт, транспортируемой пучком в рабочую камеру.

Попытки уменьшить рассеиваемую мощность в результате снижения сопротивлений катодных резисторов от 200 до 100 Ом и сеточных резисторов от 1 до 0.5 кОм не увенчались успехом, так как при максимальных параметрах на катодных секциях возникали кратковременные дуговые разряды, а на одной из секций сетки при $U = 4$ кВ мог установиться стационарный дуговой разряд с током до 8 А. Увеличение давления аргона до 1 Па приводит к пробоем между плазменным эмиттером и вторичной плазмой в камере. Уменьшение давления ниже 0.05 Па сопровождается повышением напряжения между секциями катода и плазменным эмиттером и быстрым падением тока ионной эмиссии I_i до нуля.

Характеристики источника пучка прямоугольного сечения $0.17 \times 0.9 \text{ м}^2$ с теми же сопротивле-

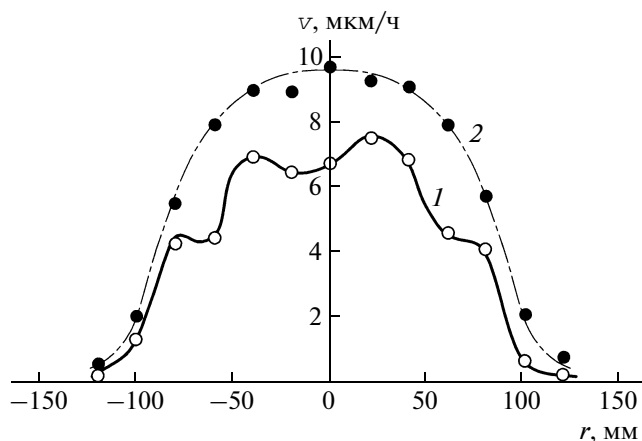


Рис. 6. Зависимость от расстояния r до оси пучка скорости v травления: 1 – подложки из нержавеющей стали пучком круглого сечения с энергией 3 кэВ и эквивалентным током 0.4 А при давлении аргона 0.2 Па на расстоянии от эмиссионной сетки источника 0.2 м; 2 – медной подложки, полученная в работе [5] при тех же параметрах без секционирования сетки.

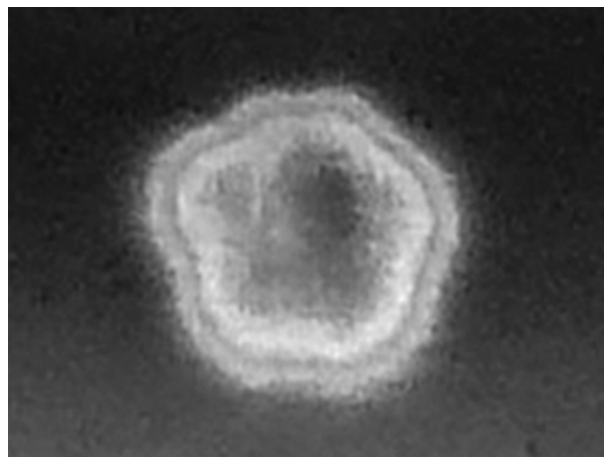


Рис. 7. Отпечаток на медной фольге быстрых атомов аргона, прошедших через отверстие диаметром 3 мм в пластине на расстоянии 50 мм от фольги и 200 мм от эмиссионной сетки источника пучка. Прямые, проведенные через участки с увеличенным радиусом отпечатка и его центр, лежат в плоскостях, перпендикулярных щелевым зазорам между шестью секциями круглой сетки.

ниями резисторов 200 Ом и 1 кОм практически не отличаются от характеристик источника пучка сечением $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$. Так как здесь сечение пучка примерно в 5 раз меньше, то плотность эквивалентного тока пучка в 5 раз выше. Испытания показали, что и в этом случае указанные выше запирающие потенциалы секций сетки обеспечивают стабильную работу источника пучка в диапазоне ускоряющего напряжения от 1 до 4 кВ и давления p от 0.1 до 0.5 Па. Повышение напряжения между секциями катода и плазменным эмиттером этого источника, а также снижение тока ионной эмиссии I_i начинаются при давлениях, меньших 0.1 Па. Кроме того, из-за увеличения ширины полого катода вблизи его торцов токи в цепях секций сетки практически равны друг другу и лишь в цепях первой и пятнадцатой секций они на 10% ниже.

Из-за меньшего в 2.5 раза числа секций сетки максимальный ток ионной эмиссии I_i источников пучка круглого сечения (рис. 4) с энергией до 4 кэВ составляет 1.5 А. Кроме того, эти источники устойчиво работают лишь в диапазоне давления аргона 0.2–0.5 Па, а при $p < 0.2$ Па ток ионной эмиссии быстро снижается.

Исследование пространственного распределения в рабочей вакуумной камере скорости травления материалов пучком быстрых атомов аргона показало, что деление круглой сетки на сектора изменяет угловые характеристики пучка ускоренных частиц. На рис. 6 кривой 1 представлено радиальное распределение скорости v травления подложки из нержавеющей стали пучком атомов аргона с энергией 3 кэВ и эквивалентным током 0.4 А при давлении 0.2 Па на расстоянии от эмис-

сионной сетки источника 0.2 м. От полученного в работе [5] и представленного на рис. 6 кривой 2 распределения скорости травления медной подложки таким же источником без секционирования сетки оно отличается большей неоднородностью и даже немонотонностью.

Для выяснения причин немонотонности распределения в камере было установлено устройство, использовавшееся в [5] для измерения угла расходимости и углового разброса быстрых атомов. Приведенная на рис. 7 фотография отпечатка на медной фольге быстрых атомов аргона, прошедших через отверстие $\varnothing 3$ мм в пластине на расстоянии 50 мм от фольги и 200 мм от сетки, свидетельствует о том, что азимутальную однородность угловых характеристик ускоренных ионов, прошедших через отверстия сетки, нарушают ионы, прошедшие через щелевые зазоры между сеточными секторами.

Если распределение угла вылета ионов через отверстие сетки можно считать азимутально-симметричным, то угловой разброс ионов, прошедших через щелевой зазор, максимален в плоскости, перпендикулярной щели. Поэтому на краях круглого отпечатка имеются участки, на которых его радиус увеличен. Прямые, проведенные через центр отпечатка и эти участки, оказываются лежащими в плоскостях, перпендикулярных щелевым зазорам между шестью секциями круглой сетки установленного на камере источника пучка. Это подтверждает связь рассматриваемых участков с большим угловым разбросом быстрых атомов в плоскостях, перпендикулярных зазорам.

Чтобы устранить неоднородность распределения интенсивности травления круглых подложек, приходится во время обработки вращать их вокруг оси пучка [8]. Аналогичные возмущения угловых характеристик пучка ионами, прошедшими через зазоры между секциями сеток, были обнаружены и в описанных выше источниках пучков прямоугольного и квадратного сечения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сечение резонансной перезарядки ионов аргона σ_c при увеличении их энергии от 1 до 4 кэВ снижается от $2.7 \cdot 10^{-19}$ до $1.9 \cdot 10^{-19}$ м² [9]. Пренебрегая нагревом газа в камере, можно полагать, что при давлении 0.05 Па плотность газа $n_0 = 1.25 \cdot 10^{19}$ м⁻³, а длина перезарядки $\lambda_c = 1/\sigma_c n_0$ увеличивается с ростом энергии от 0.3 до 0.4 м. При большем в 10 раз давлении длина перезарядки изменяется от 0.03 до 0.04 м. В последнем случае плазма, синтезируемая путем нейтрализации заряда образующихся в результате перезарядки медленных ионов электронами со стенок камеры [7], сосредоточена вблизи поверхности эмиссионной сетки, и ток ионов из нее на сетку примерно в 8 раз выше, чем на стенки камеры.

При минимальном рабочем давлении 0.05 Па длина перезарядки также меньше ширины камеры 0.4 м, ток ионов в цепи сетки и в этом случае превышает ток в цепи камеры, хотя уже не в 8, а в 6 раз. Выполнение условия $\lambda_c < B$, где B – ширина эмиссионной сетки источника, позволяет при значительной величине эквивалентного тока пучка быстрых молекул, например 3.2 А, ограничить ток в цепи камеры меньшей на порядок величиной 0.45 А. Используя эмиссионную сетку из достаточного числа отдельных секций, соединенных с источником ускоряющего напряжения U через индивидуальные резисторы сопротивлением $R > U/I_0$, где I_0 – минимальный для данного материала электрода ток устойчивого горения вакуумной дуги, а также резистор обратной связи с таким же сопротивлением, можно полностью исключить переходы от тлеющего разряда к стационарной дуге.

Указанное выше условие $\lambda_c < B$ выполнялось для всех трех описанных выше источников, что и позволило обеспечить устойчивую работу при энергии до 4 кэВ и эквивалентном токе пучка до 1.2 А для источника с 6 секциями круглой эмиссионной сетки и до 3.2 А для источников с 15 секциями сетки. При увеличении сопротивлений сеточных резисторов в 2 раза до 2 кОм все источники устойчиво работают при энергии пучка до 8–10 кэВ. Однако для повышения в 2 раза эквивалентного тока пучка необходимо также в 2 раза увеличить число секций эмиссионной сетки и полого катода источника.

Зависимость нижней границы рабочего диапазона источника от его размера связана с отсутствием в разряде положительного анодного падения, которое приводит к расплавлению анода и возникает при его площади S_a , меньшей его критической величины S_a^* :

$$S_a < S_a^* = (2m/M)^{1/2} S, \quad (1)$$

где M и m – массы иона и электрона; S – площадь поверхности, ограничивающей объем V ловушки, и с функционированием источника в среднем диапазоне давления области эффекта электростатической ловушки, в котором катодное падение разряда минимально [10]. Нижняя граница среднего диапазона p_0 удовлетворяет уравнению

$$\Lambda(p) = L = 4V/S_a, \quad (2)$$

где $\Lambda(p)$ – обратно пропорциональная давлению длина пути в газе при давлении p эмитированного катодом электрона, при прохождении которого он расходует всю энергию на возбуждение и ионизацию газа; L – средняя длина их пути в ловушке до попадания на анод. С учетом (1) и (2) легко показать, что минимальное рабочее давление p_0^* источника пучка удовлетворяет уравнению

$$\Lambda(p) \approx a(M/2m)^{1/2}, \quad (3)$$

где $a = 4V/S$ – ширина электростатической ловушки тлеющего разряда. Для рассмотренных источников квадратного, прямоугольного и круглого сечений ширина ловушки равна соответственно $4 \cdot 0.105/2.09 = 0.2$ м, $4 \cdot 0.019/0.56 = 0.14$ м и $4 \cdot 0.0033/0.13 = 0.1$ м. Например, при давлении аргона 1 Па и катодном падении разряда 415 В длина Λ равна 2.46 м [10]. В источнике пучка квадратного сечения она увеличится до $a(M/2m)^{1/2} = 0.2 \cdot 192 = 38.4$ м при уменьшении давления в $38.4/2.46 = 15.6$ раза, т.е. до 0.06 Па, что практически совпадает с приведенным выше нижним рабочим давлением источника 0.05 Па. Для источников прямоугольного и круглого сечений решения уравнения (1) равны 0.09 Па и 0.12 Па, что удовлетворительно согласуется с установленными опытным путем нижними рабочими давлениями 0.1 Па и 0.2 Па.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ширине эмиссионной сетки источника быстрых нейтральных молекул, превышающей длину перезарядки ускоренных ионов, в цепи сетки протекает почти весь ток медленных ионов, образованных в результате перезарядки, а эквивалентный ток пучка на порядок превышает ток в цепи рабочей вакуумной камеры. В этих условиях можно полностью исключить переходы в дуговой режим сильноточного тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов, используемого для генерации однородного плазменного эмиттера источника, и использовать в качестве

источников питания выпрямители напряжения промышленной частоты повышающих трансформаторов с емкостными фильтрами и регулируемой напряжения на их первичных обмотках.

Для этого нужно изготовить эмиссионную сетку и холодный полый катод источника в виде наборов изолированных друг от друга секций и соединить эти секции с источниками электропитания через индивидуальные резисторы. При этом достаточно ограничить ток в цепи каждой секции величиной $U/R < I_0$, где R – сопротивление резистора в ее цепи, U – напряжение источника питания, I_0 – минимальный ток устойчивого горения дуги. При энергии пучка до 10 кэВ и эквивалентном токе пучка до нескольких ампер мощность, рассеиваемая в сеточных и катодных резисторах, в десять с лишним раз меньше мощности, транспортируемой пучком в рабочую вакуумную камеру. Для повышения тока пучка и снижения рассеиваемой в резисторах мощности необходимо увеличивать число секций сетки и катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоров А.И., Семенов А.П. Обработка газовых подшипников с применением ионного распыления. М.: Наука, 1976.
2. Hayes A.V., Kanarov V., Vidinsky B. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 4. P. 1638.
3. Metel A.S., Grigoriev S.N. // US Pat. 6,285,025. Int. Cl. H01S 1/00; H01S 3/00. 2001.
4. Grigoriev S., Melnik Yu., Metel A. // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 156. № 1/3. P. 44.
5. Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 166.
6. Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. М.: Янус-К, 2005.
7. Метель А.С., Мельник Ю.А., Панин В.В. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 4. С. 387.
8. Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Метель А.С., Панин В.В. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6. С. 23.
9. Phelps A.V. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1991. V. 20. № 3. P. 557.
10. Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 12. С. 1140.