

## СИЛЬНОТОЧНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С МНОГОСТЕРЖНЕВОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКОЙ

© 2013 г. А. С. Метель, Ю. А. Мельник

Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”

Россия, 127994, Москва, Вадковский пер., 3а

E-mail: ametel@stankin.ru

Поступила в редакцию 05.05.2012 г.

Исследуются электронные пушки, формирующие при давлении  $\sim 0.01$  Па пучки диаметром до 170 мм с током до 700 А при энергии электронов 300 кэВ и длительности импульса  $\sim 200$  мкс. Эмиттером электронов является плазма тлеющего разряда, в котором электроны удерживаются в электростатической ловушке. Ловушка образована гексагональной призмой из 204 катодных стержней  $\varnothing 5$  и длиной 200 мм на расстоянии 1.5 мм друг от друга, а также расположенными внутри нее 780 катодными стержнями  $\varnothing 5$  и длиной 98 мм на расстоянии 15 мм между их осями. В центре ловушки плазменный эмиттер заполняет свободную от стержней гексагональную призму с расстоянием 280 мм между гранями и высотой  $\sim 200$  мм между анодом с эмиссионной сеткой и дном ловушки из катодных дисков  $\varnothing 23$  мм. Все катодные стержни и диски изолированы друг от друга и соединены с источником питания разряда через резисторы ТВО-2 сопротивлением по 430 Ом. Ограничение тока в цепи каждого элемента катода величиной  $\sim 2$  А позволяет при длительности  $\sim 5$  мс импульса тока тлеющего разряда с амплитудой до 1 кА полностью исключить его переходы в дугу и формировать непрерывный пучок с энергоемкостью до 40 кДж и равномерным распределением тока по сечению пучка площадью  $\sim 0.025$  м<sup>2</sup>.

DOI: 10.7868/S0032816213020225

### ВВЕДЕНИЕ

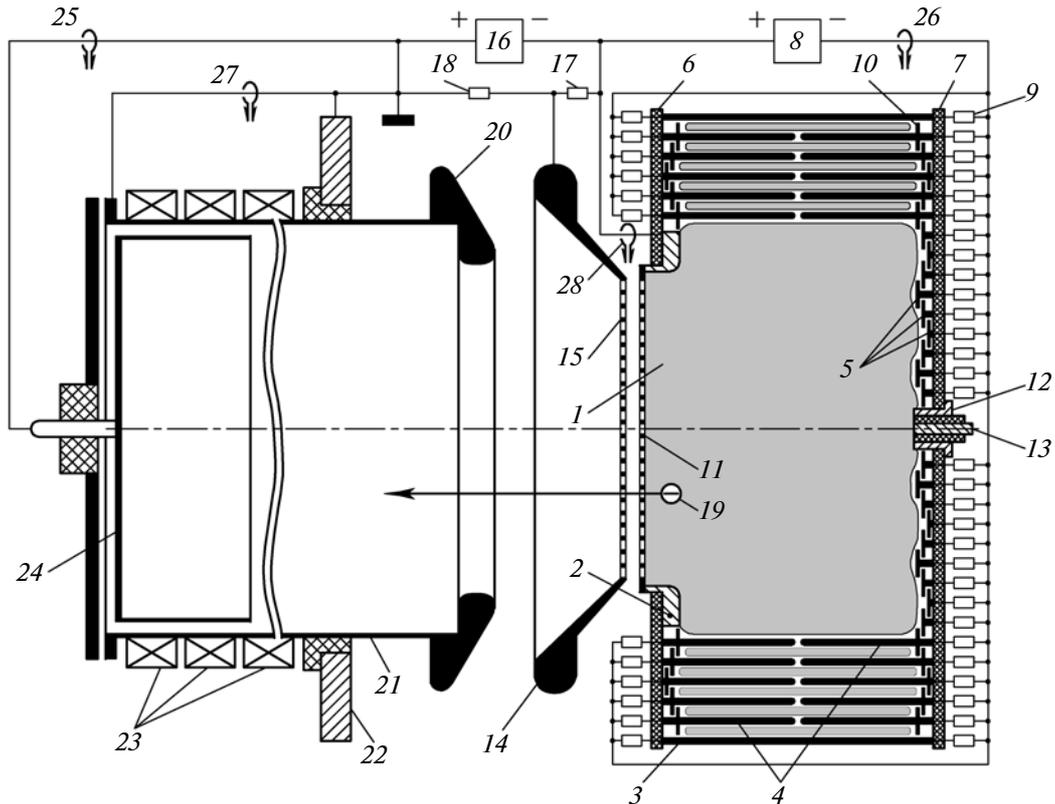
Для модификации поверхности изделий машиностроения в настоящее время широко используют ускоренные ионы [1], электроны [2] и быстрые молекулы [3, 4]. Для обработки ионами металлического изделия можно погрузить его в плазму газового разряда низкого давления и подать на изделие ускоряющее ионы напряжение отрицательной полярности [5]. Однако обрабатывать диэлектрики можно лишь с помощью источников широких пучков ионов [6] или быстрых нейтральных молекул [7, 8], а при обработке любых материалов электронами необходимы источники широких электронных пучков [9].

Основным результатом воздействия на материал ускоренных электронов является нагрев его поверхностного слоя до температуры, при которой изменяется структура материала или он переходит в жидкое, а при достаточной плотности поглощенной энергии — и в газообразное состояние. В последнем случае испаряемый в вакууме слой материала удаляется с поверхности. Если же импульсный электронный пучок лишь плавит материал, то в результате его последующего быстрого охлаждения на поверхности образуется слой, свойства которого значительно отличаются от характеристик исходного материала.

При длительности импульса  $\tau < 10^{-4}$  с характер воздействия зависит от поверхностной плотности поглощенной в течение импульса энергии электронов, а толщина модифицированного слоя примерно равна проекционному пробегу электронов в материале. Согласно формуле Шонланда [10, 11] пробег пропорционален квадрату энергии электронов  $\varepsilon$ . Например, в титане он составляет  $\sim 0.2$  мм при  $\varepsilon = 200$  кэВ и достигает 5 мм при  $\varepsilon = 1$  МэВ.

Для получения на поверхности изделия площадью  $\sim 0.02$  м<sup>2</sup> модифицированного слоя толщиной  $\sim 0.1$  мм нужна пушка с равномерным распределением тока электронов с энергией 200 кэВ по сечению пучка с энергоемкостью  $\sim 10$  кДж. Поэтому при длительности импульса тока пучка  $\tau = 100$  мкс его амплитуда должна составлять 500 А.

Указанные параметры достигаются при использовании, например, описанной в работе [12] электронной пушки, разработанной для генерации с.в.ч.-излучения. В качестве эмиттера в ней используется плазма тлеющего разряда с электростатическим удержанием электронов в полном катоде  $\varnothing 300$  и длиной 400 мм при давлении газа внутри него  $\sim 0.7$  Па. Электроны ускоряются между двумя сетками на расстоянии 12 мм друг от друга с 253 парами соосных отверстий  $\varnothing 5.1$  мм. Пушка формирует пучок диаметром  $\sim 100$  мм с током



**Рис. 1.** Схема электронной пушки. 1 – плазменный эмиттер; 2 – анод; 3 – стержень внешней оболочки; 4 – внутренние стержни; 5 – катодные диски; 6, 7 – диэлектрические фланцы; 8 – источник питания разряда; 9 – резисторы; 10 – шайбы; 11 – эмиссионная сетка; 12, 13 – электроды поджигающего устройства; 14 – фокусирующий электрод; 15 – ускоряющая сетка; 16 – генератор импульсов высокого напряжения; 17, 18 – блоки резисторов; 19 – электрон; 20 – ускоряющий электрод; 21 – тракт транспортировки пучка; 22 – боковой фланец вакуумной камеры; 23 – соленоиды; 24 – коллектор; 25–28 – пояса Роговского.

700 А при длительности  $\sim 100$  мкс импульса ускоряющего напряжения амплитудой 200 кэВ.

Для достижения указанных параметров пучка требуется обезгаживание в вакууме и тренировка полого катода импульсами разряда с постепенно возрастающей амплитудой разрядного тока. Поэтому полый катод изготовлен из молибдена высокой чистоты, а все другие элементы конструкции допускают прогрев до  $300\text{--}400^\circ\text{C}$ . Однако и после тренировки сохраняется определенная вероятность образования за время импульса  $\sim 100$  мкс катодных пятен вакуумной дуги. Переход тлеющего разряда в дугу нарушает однородность плазменного эмиттера и вызывает пробой между ускоряющими сетками пушки.

При генерации с помощью описанной в [12] пушки с.в.ч.-излучения серьезным препятствием является также высокое давление газа  $\sim 1$  Па, в десятки раз превышающее допустимое давление в замедляющей структуре. Поэтому в этой пушке используется импульсный напуск газа в полый катод.

В работе [7] в тлеющем разряде вместо сплошного полого катода использовалась электростати-

ческая ловушка из 32 изолированных друг от друга электродов. Было показано, что, соединив эти электроды с источником питания через резисторы с сопротивлением  $R > U/I^*$ , где  $U$  – напряжение источника,  $I^*$  – минимальный ток устойчивого горения дуги, можно полностью исключить переходы в дугу стационарного тлеющего разряда. Первая импульсная электронная пушка с цилиндрическим полым катодом, образованным изолированными друг от друга параллельными стержнями, соединенными с источником питания через резисторы, описана в [13].

В данной работе приводятся результаты исследования электронной пушки с генерацией плазменного эмиттера в тлеющем разряде при давлении газа  $\sim 0.01$  Па с электростатической ловушкой, содержащей около тысячи изолированных друг от друга электродов, соединенных с источником питания через индивидуальные резисторы.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 представлена схема электронной пушки. Эмиттером электронов является плазма  $I$

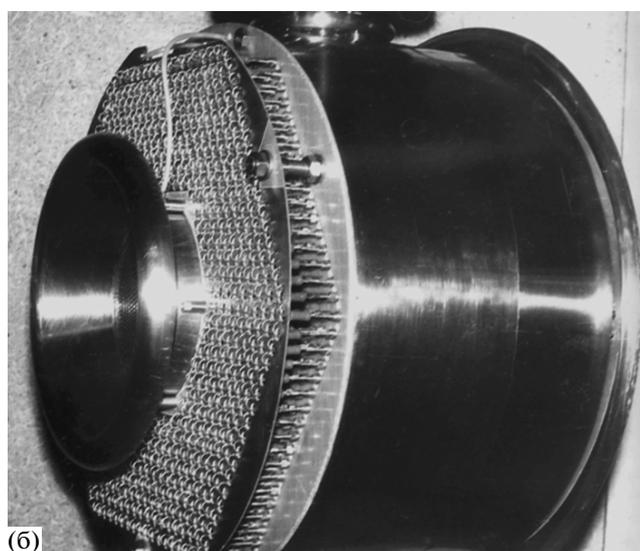
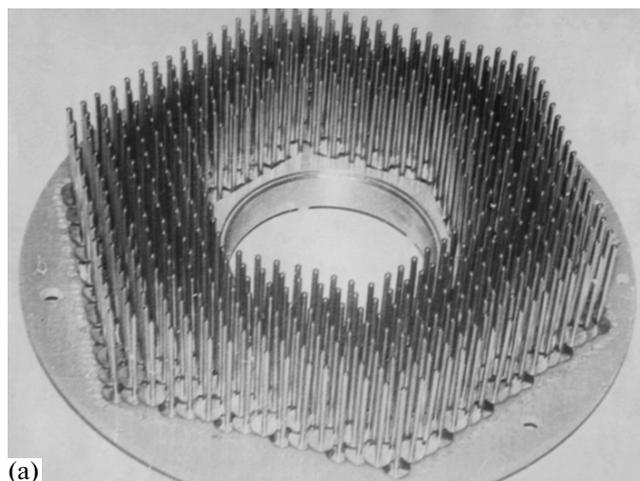
теющего разряда между анодом 2 и многоэлектродным холодным катодом, включающим внешнюю гексагональную оболочку из 204 параллельных катодных стержней 3 диаметром 5 и длиной 200 мм на расстоянии 1.5 мм друг от друга, расположенные внутри нее гексагональные ряды катодных стержней 4 диаметром 5 и длиной 98 мм на расстоянии 15 мм между их осями, а также катодные диски 5 толщиной 1 и диаметром 23 мм.

Все катодные стержни и диски закреплены на двух фланцах 6 и 7 из капролона, изолированы друг от друга и соединены с отрицательным полюсом источника питания разряда 8 через резисторы 9 (ТВО-2-430 Ом). Для предотвращения контакта с диэлектрическими фланцами 6 и 7 разрядной плазмы, заполняющей промежутки между стержнями 4, у основания каждого стержня 4 имеется металлическая шайба 10 диаметром 23 и толщиной 1 мм. Шайбы 10 и диски 5 расположены в три слоя на расстоянии 1 мм между слоями.

В первом варианте пушки 1104 внутренних стержня образуют 8 гексагональных слоев, а диаметр установленной на аноде 2 эмиссионной сетки 11 равен 110 мм [14]. На рис. 2а показан внешний вид этого анода и внутренних стержней с шайбами на капролоновом фланце 6. В центре противоположного фланца 7 (рис. 1) установлено устройство поджига разряда с коаксиальными электродами 12 и 13. При подаче между ними импульса высокого напряжения свободное от стержней пространство заполняется плазмой импульсной дуги.

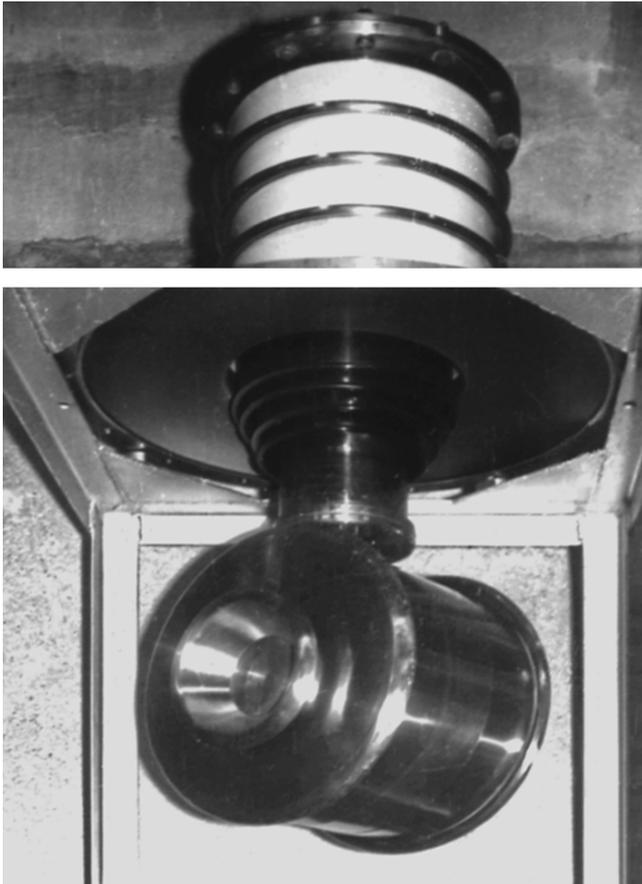
Диэлектрические фланцы жестко связаны между собой тремя стальными стойками, на которых крепятся также резисторы 9 (рис. 2б). Расстояние между эмиссионной сеткой 11 (рис. 1) и соединенной с фокусирующим электродом 14 ускоряющей сеткой 15 равно 13 мм. В сетках толщиной по 1 мм имеется 85 пар соосных отверстий  $\varnothing 6$  мм с шагом 10 мм между их центрами.

В качестве источника ускоряющего напряжения используется генератор прямоугольных импульсов высокого напряжения 16 на основе искусственных формирующих линий. Временная задержка между включением линий снижает неравномерность вершины импульса до 1% [15]. Генератор 16 с волновым сопротивлением 20 Ом формирует на согласованной активной нагрузке из соединенных последовательно блоков резисторов 17с сопротивлением 2 Ом и 18с сопротивлением 18 Ом импульсы напряжения длительностью 200 мкс и амплитудой до  $U = 500$  кВ. Падение напряжения на блоке резисторов 17 ускоряет электроны 19 в промежутке между сетками 11 и 15 до энергии  $0.1eU$ , а далее они ускоряются до энергии  $eU$  падением напряжения на блоке резисторов 18 в промежутке между фокусирующим электродом 14 и заземленным электродом 20.



**Рис. 2.** Внешний вид: а — смонтированных на диэлектрическом фланце внутренних катодных стержней с шайбами и анода без эмиссионной сетки; б — эмиссионного блока электронной пушки без переднего экрана, закрывающего индивидуальные резисторы катодных стержней.

Электрод 20 закреплен на тракте транспортировки пучка 21 длиной 0.8 м, изолированном от бокового фланца 22 вакуумной камеры. Перемещающий тракт 21 относительно фланца 22 в горизонтальном направлении, можно изменять расстояние между электродом 20 и сеткой 15 от 70 до 120 мм. Для перемещения в вертикальном направлении электрода 14 вместе со всем эмиссионным узлом, закрепленным на секционированном высоковольтном вводе конденсаторного типа (рис. 3), используется смонтированное внутри центральной обкладки ввода юстировочное устройство. Оно позволяет также изменять угол наклона оси эмиссионного узла к горизонту и вращать его вокруг вертикальной оси вакуумной камеры.



**Рис. 3.** Внешний вид эмиссионного узла пушки, закрепленного на секционированном высоковольтном вводе конденсаторного типа, установленном на съемном верхнем фланце вакуумной камеры.

На тракте 21 (рис. 1) снаружи камеры установлены соленоиды 23, создающие магнитное поле с индукцией до 0.02 Тл. На дне тракта установлен коллектор 24 для измерения поясом Роговского 25 тока прошедшего через тракт пучка. Импульсы тока в цепи многостержневого катода, тракта 21 и анода 2 измеряются поясами Роговского соответственно 26, 27 и 28.

Второй вариант пушки содержит внутри внешней оболочки из 204 стержней 3 не восемь, а пять гексагональных рядов из 780 стержней 4 (рис. 1). На диэлектрическом фланце 6 установлен анод 2 большего размера с эмиссионной сеткой 11 диаметром 180 мм. В ней и в отстоящей от нее на 13 мм ускоряющей сетке такого же размера просверлено по 253 соосных отверстия  $\varnothing 6$  мм на расстоянии 10 мм между их центрами. Все радиальные размеры фокусирующего электрода 14, ускоряющего электрода 15, тракта транспортировки 21 и коллектора 24 увеличены по сравнению с первым вариантом пушки на 35 мм.

Вакуумная камера пушки откачивается диффузионным насосом с азотной ловушкой. Давление

аргона в камере регулируется игольчатым натекателем в диапазоне от 0.01 до 0.1 Па. Источником питания разряда 8 служит батарея конденсаторов емкостью 5 мФ. Амплитуда тока тлеющего разряда между анодом 2 и катодными стержнями 3 и 4, а также катодными дисками 5 регулируется напряжением зарядки батареи до 0.5–1 кВ.

Тлеющий разряд инициируется инъекцией в ловушку плазмы дугового разряда. Импульсная дуга через резистор 1 Ом разряжает конденсатор емкостью, регулируемой от 40 до 400 мкФ. Положительный полюс этого конденсатора соединен с анодом 2, а отрицательный — с электродом 12. Дуга инициируется пробоем по поверхности диэлектрической втулки промежутка между электродами 12 и 13 при подаче на поджигающий электрод 13 импульса высокого напряжения положительной полярности. Линия задержки позволяет регулировать временной интервал между поджигающим импульсом и фронтом импульса ускоряющего напряжения от 0 до 200 мкс.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В исследованном диапазоне давления аргона 0.01–0.1 Па амплитуда тока тлеющего разряда с многостержневой электростатической ловушкой, устанавливающегося после импульса инициирующей его дуги, зависит от амплитуды тока дугового разряда. На рис. 4а представлены осциллограммы тока  $I$  в цепи катода первого варианта электронной пушки с 1104 внутренними катодными стержнями и тока  $I_0$  в цепи катода 12 дугового разряда при давлении аргона 0.05 Па, зарядном напряжении 650 В батареи 8 и максимальной емкости 400 мкФ разряжаемого дугой конденсатора.

После поджига дуги ее ток за несколько микросекунд возрастает до 360 А, а затем снижается на порядок в течение 500 мкс. При этом измеряемый поясом Роговского 26 ток в цепи многостержневого катода ионов, вытягиваемых из дуговой плазмы 1 напряжением 650 В источника питания 8, медленно возрастает в течение 200 мкс до 20 А, а затем при токе дуги  $\sim 200$  А резко снижается.

Самостоятельный тлеющий разряд устанавливается лишь при амплитуде тока дуги 500 А и выше. На рис. 4б представлена осциллограмма тока  $I_0$  при давлении аргона 0.02 Па и минимальной емкости конденсатора 40 мкФ. Длительность импульса тока дуги  $I_0$  примерно равна 50 мкс, а его амплитуда немного превышает 500 А. В этом случае ток тлеющего разряда  $I$  в цепи катода за время импульса тока дуги  $I_0$  сравнительно быстро возрастает до 400 А. Он продолжает увеличиваться и после погасания дуги, через  $\sim 100$  мкс после поджигающего дугу высоковольтного импульса достигает максимальной величины 650 А, а далее

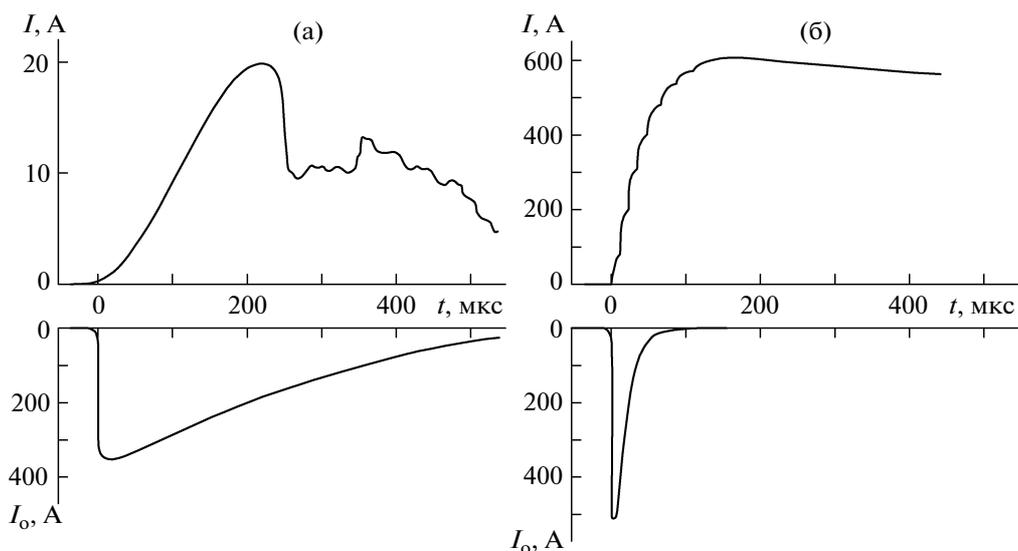


Рис. 4. Осциллограммы тока в цепи поджигающего электрода  $I_0$  и общего разрядного тока в цепи катода  $I$  при давлении аргона в камере  $p = 0.05$  Па и амплитуде  $I_0 < 500$  А (а), а также при  $p = 0.02$  Па и  $I_0 > 500$  А (б).

снижается с постоянной времени  $\tau_p \sim 5$  мс. Фронт импульса тока  $I$  состоит из восьми участков в виде ступенек. При исследовании второго варианта электронной пушки с пятью рядами внутренних катодных стержней на фронте импульса тока  $I$  также обнаружены ступеньки, и их число также равно числу гексагональных слоев внутренних катодных стержней.

Для измерения температуры электронов  $T_e$  в плазменном эмиттере  $I$  (рис. 1) использовались как одиночные зонды, так и электростатический анализатор с двумя сетками и коллектором. Измерения проводились при заземленном аноде  $2$  в отсутствие тракта  $21$  с ускоряющим электродом  $22$  и фокусирующего электрода  $14$  с сеткой  $15$ .

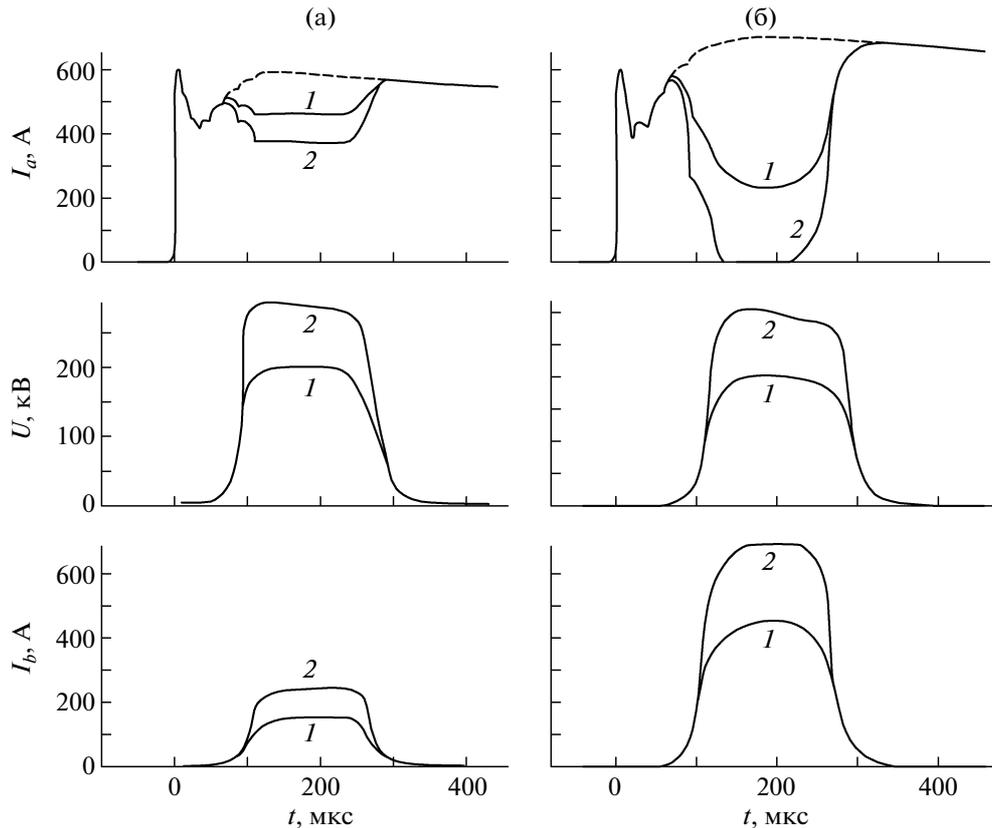
Зонды и анализатор вводятся в эмиттер  $I$  через заглушку фланца  $22$  и отверстия в сплошной диафрагме, установленной на аноде  $2$  вместо сетки  $11$ . Первая сетка анализатора соединена с анодом, между ней и второй сеткой прикладывается напряжение, задерживающее ионы, а на коллектор подается напряжение, задерживающее электроны. В первом варианте с 1104 внутренними стержнями распределение электронов по энергии близко к максвелловскому с температурой  $T_e$  от 15 эВ при давлении аргона  $p = 0.02$  Па и токе тлеющего разряда  $I = 400$  А до 10 эВ при  $p = 0.1$  Па и  $I = 700$  А. Во втором варианте с 780 внутренними катодными стержнями температура электронов во всем исследованном диапазоне параметров составляет  $\sim 1$  эВ.

На рис. 5а представлены осциллограммы измеряемого поясом Роговского  $28$  тока  $I_a$  в цепи анода  $2$  первого варианта электронной пушки, ускоряющего напряжения  $U$  между анодом  $2$  и заземленной камерой  $22$ , а также тока  $I_b$  в цепи кол-

лектора  $24$  при расстоянии 100 мм между электродом  $20$  и сеткой  $15$ , индукции 0.02 Тл в тракте транспортировки  $21$ , давлении аргона  $p = 0.02$  Па и зарядном напряжении 650 В батареи  $8$ .

При подаче на анод  $2$  через 70 мкс после поджига дуги импульса ускоряющего напряжения регистрируется импульс тока  $I_b$  в цепи коллектора, а на осциллограмме  $I_a$  появляется участок, где показанная штриховой линией сумма  $I_a + I_b$  примерно равна току в цепи анода в отсутствие ускоряющего напряжения  $U$ . С увеличением  $U$  от 200 до 300 кВ амплитуда  $I_b$  возрастает от 150 до 250 А. При этом измеряемый поясом Роговского  $27$  ток в цепи тракта  $21$  на два порядка меньше  $I_b$ . На осциллограммах  $I_b$  отсутствуют ступеньки, наблюдаемые на осциллограммах токов в цепях катода  $I$  (рис. 4б) и анода  $I_a$  (рис. 5а). Однако в отсутствие магнитного поля в тракте  $21$  амплитуда тока  $I_b$  в цепи коллектора заметно снижается, а измеряемый поясом Роговского  $27$  ток в цепи тракта  $21$  возрастает до величины, сравнимой с  $I_b$ . Это свидетельствует о попадании электронов на стенки тракта.

На рис. 5б представлены осциллограммы тока  $I_a$  в цепи анода второго варианта электронной пушки, ускоряющего напряжения  $U$  и тока  $I_b$  в цепи ее коллектора при тех же расстоянии между электродом  $20$  и сеткой  $15$ , индукции магнитного поля, давлении аргона и зарядном напряжении батареи  $8$ , что и в первом варианте электронной пушки (рис. 5а). Так как в данном случае число отверстий в эмиссионной сетке  $11$  в 3 раза больше, ток в цепи коллектора  $I_b$  при той же плотности тока электронной эмиссии из плазмы  $I$  и рав-



**Рис. 5.** Осциллограммы тока в цепи анода  $I_a$ , ускоряющего напряжения  $U$  и тока в цепи коллектора  $I_b$  для первого (а) и второго (б) вариантов пушки при давлении аргона в камере  $p = 0.02$  Па и амплитуде ускоряющего напряжения 200 кВ (1) и 300 кВ (2). Штриховые кривые – осциллограммы тока в цепи анода  $I_a$  при  $U = 0$ .

ных ускоряющих напряжениях также примерно в 3 раза больше.

При ускоряющем напряжении  $U \sim 200$  В ток электронного пучка, практически равный току  $I_b$  в цепи коллектора, достигает 440 А. При  $U \sim 300$  В он становится равным току в цепи многостержневого катода, а ток  $I_a$  в цепи анода обращается в ноль. Это означает, что анод становится отрицательным по отношению к плазменному эмиттеру 1, и все образованные в разряде электроны поступают в ускоряющий промежуток. Как и в первом варианте пушки, на осциллограммах  $I_b$  отсутствуют ступеньки, наблюдаемые на осциллограмме  $I_a$ , а при обращении  $I_a$  в ноль вершина импульса  $I_b$  становится плоской. В отсутствие магнитного поля ток в цепи тракта также возрастает, однако его отношение к току в цепи коллектора меньше, чем в первом варианте пушки, где причиной угловой расходимости электронов может быть более высокая температура электронов в плазменном эмиттере 1.

Испытания пушек показали, что импульсный тлеющий разряд длительностью до 5 мс с амплитудой тока до 1 кА регулярно поджигается через каждые 2 мин, необходимые для зарядки конденсаторов генератора 1б, и при давлении аргона 0.01 Па.

Более того, разряд с указанными параметрами продолжает зажигаться и при полном прекращении подачи аргона в вакуумную камеру, т.е. при остаточном давлении воздуха в вакуумной камере  $\sim 0.005$  Па.

Осциллограммы токов в цепях отдельных гексагональных рядов стержней 4 показывают, что ступеньки, наблюдаемые на осциллограмме тока  $I$  в цепи многостержневого катода, отражают процесс заполнения плазмой промежутков между рядами стержней 4. Резкое увеличение скорости нарастания тока  $I$  в начале каждой ступеньки совпадает с проникновением плазмы в очередной промежуток и появлением тока в цепи следующего гексагонального ряда стержней. Поэтому по числу ступенек можно определять число заполненных плазмой промежутков.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики используемого для генерации плазменного эмиттера 1 (рис. 1) тлеющего разряда с многостержневой электростатической ловушкой зависят от ширины  $a$  и длины  $L$  ловушки. Как и в случае разряда с полым катодом [16], ши-

рина  $a$  равна среднему пробегу электронов в ловушке между отражениями в катодном слое

$$a = 4V/S, \quad (1)$$

где  $V$  – объем пространства, в котором осциллируют электроны;  $S$  – площадь поверхности, ограничивающей это пространство.

Многостержневая ловушка отличается от полога катода тем, что часть поверхности  $S$ , площадь которой равна  $S_{\text{out}}$ , охватывает объем  $V$ , а остальная поверхность площадью  $S_{\text{in}} = S - S_{\text{out}}$  сама заключена внутри объема  $V$ . Для первого варианта пушки площадь рабочей поверхности внешних стержней 3, дисков 5 и шайб 10 равна  $S_{\text{out}} \approx 0.4 \text{ м}^2$ , а объем пространства внутри этих катодных элементов равен  $V_{\text{out}} = 0.03 \text{ м}^3$ . Площадь 1104 внутренних стержней равна  $S_{\text{in}} \approx 1.7 \text{ м}^2$ , а их суммарный объем равен  $V_{\text{in}} \approx 0.002 \text{ м}^3$ .

При полном заполнении ловушки плазмой ее объем  $V = V_{\text{out}} - V_{\text{in}} \approx 0.03 - 0.002 = 0.028 \text{ м}^3$ , площадь ограничивающей его поверхности  $S = S_{\text{out}} + S_{\text{in}} \approx 2.1 \text{ м}^2$  и ширина ловушки  $a = 4 \cdot 0.028/2.1 \approx 0.05 \text{ м}$ . Длина ловушки  $L$  равна среднему пути осциллирующих в ловушке электронов до ухода из нее [16] в результате попадания на поверхность анода 2, сетки 11, поджигающих электродов 12 и 13 и в результате вылета через отверстия сетки 11 в ускоряющий промежуток:

$$L = 4V/S_0, \quad (2)$$

где  $S_0 \approx 0.028 \text{ м}^2$  – площадь выходной апертуры ловушки, в нашем случае равная сумме площадей анода 2, эмиссионной сетки 11 с отверстиями и электродов 12 и 13. Таким образом, длина нашей многостержневой ловушки  $L = 4 \cdot 0.028/0.028 = 4 \text{ м}$ .

При катодном падении тлеющего разряда  $U_c = 390 \text{ В}$ , комнатной температуре и давлении  $p = 1 \text{ Па}$  аргона с ценой ионизации  $W = 26 \text{ эВ}$  средний пробег между ионизирующими столкновениями эмитированного катодом электрона равен  $\lambda_N = 0.15 \text{ м}$  [17]. Длина пути, который должен пройти этот электрон в аргоне при  $p = 1 \text{ Па}$ , чтобы израсходовать при столкновениях всю свою энергию  $eU_c$ , равна  $\Lambda = (eU_c/W) \lambda_N = (390/26) \cdot 0.15 = 2.25 \text{ м}$ . Поэтому являющаяся решением уравнения  $\Lambda(p) = L$  величина нижней границы  $p_0$  диапазона давления, в котором  $U_c$  минимально и не зависит от давления, равна  $p_0 = 2.25/4 \approx 0.5 \text{ Па}$ , а являющаяся решением уравнения  $\lambda_N(p) = a$  величина верхней границы  $p^*$  этого диапазона равна  $p^* = 0.15/0.05 = 3 \text{ Па}$ . Полученные величины давления и даже являющаяся решением уравнения  $\lambda_N(p) = L$  величина давления погасания разряда  $p^{\text{ex}} = 0.15/4 \approx 0.04 \text{ Па}$  [17] превышают давление газа в вакуумной камере при формировании электронного пучка с током 700 А и энергией 300 кэВ (рис. 5б).

Для второго варианта пушки с 780 внутренними стержнями площадь анода с сеткой примерно равна  $S_0 = 0.058 \text{ м}^2$ , объем ловушки  $V \approx 0.029 \text{ м}^3$  и ее поверхность  $S \approx 1.6 \text{ м}^2$ . В этом случае  $L = 4 \times 0.029/0.058 = 2 \text{ м}$  и давление погасания разряда  $p^{\text{ex}} = 0.15/2 = 0.075 \text{ Па}$ .

Плотность молекул газа при комнатной температуре и давлении в вакуумной камере 0.01 Па равна  $n_0 \sim 2.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . В то же время плотность тока электронной эмиссии при токе пучка 700 А и суммарной площади 253 отверстий эмиссионной сетки  $0.007 \text{ м}^2$  составляет  $j_e \sim 10^5 \text{ А/м}^2$ , что при  $T_e \sim 1 \text{ эВ}$  соответствует концентрации плазмы  $n_e \sim 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Приведенные оценки давления погасания  $p^{\text{ex}}$  и концентрации плазмы  $n_e$  свидетельствуют о том, что во время импульса плотность газа в ловушке становится значительно выше, чем в камере.

Существенный вклад в повышение плотности газа в многостержневой ловушке вносят продукты эрозии катода 12 (рис. 1) дугового разряда и десорбция газа с большой поверхности катодных стержней. Температура стержней незначительно отличается от комнатной, и за 2 мин между импульсами на их поверхности адсорбируется, по крайней мере, мономолекулярный слой газа. При его десорбции в результате бомбардировки катодной поверхности ионами плотность молекул в пространстве между стержнями может достигать величины, соответствующей давлению  $\sim 0.5 \text{ Па}$ . За время импульса этот газ не успевает покинуть объем ловушки через эмиссионную сетку 11, и поэтому ионизационный манометрический преобразователь на вакуумной камере регистрирует после импульса лишь незначительный скачок давления. Кроме того, при токе разряда  $I = 700 \text{ А}$  средняя плотность тока ионов на катоде с площадью поверхности  $S \approx 1.6 \text{ м}^2$  достигает  $440 \text{ А/м}^2$ , и на разрядные характеристики уже может влиять катодное распыление.

Тлеющий разряд с многостержневой ловушкой отличается от разряда с полым катодом и тем, что в процессе его установления ширина ловушки  $a$  и ее длина  $L$  заметно изменяются. Во втором варианте пушки начальный объем ловушки, ограниченный внутренним гексагональным рядом из 132 стержней, равен  $V = 0.01 \text{ м}^3$ , площадь ограничивающей его поверхности  $S = 0.3 \text{ м}^2$ , длина ловушки  $L = 4 \cdot 0.0116/0.058 = 0.8 \text{ м}$ , а ее ширина  $a = 4 \cdot 0.0116/0.3 = 0.15 \text{ м}$ . В процессе заполнения промежутков между стержнями плазмой ширина ловушки снижается с 0.15 до 0.07 м, а ее длина возрастает от 0.8 до 2 м.

Для проникновения дуговой плазмы через первый ряд внутренних стержней необходимо, чтобы при заданном напряжении источника питания разряда  $\delta$ , например 650 В, удвоенная ши-

рина слоя между дуговой плазмой и стержнями стала меньше расстояния 10 мм между ними. Это условие определяет пороговую зависимость зажигания тлеющего разряда от амплитуды тока инициирующей его дуги.

Если в первом варианте пушки дуговая плазма не прошла через первый ряд стержней, ток  $I$  в цепи катода вытягиваемых из нее ионов почти в 20 раз меньше тока дуги (рис. 4а). Однако после прохождения плазмы через первый ряд начинается размножение быстрых электронов в катодных слоях [18] стержней первого и второго рядов, концентрация плазмы несамостоятельного тлеющего разряда между ними быстро увеличивается и ток  $I$  в цепи катода возрастает за 12 мкс до 80 А (рис. 4б). В этот момент разрядная плазма проходит через второй ряд стержней и через 25 мкс после поджигающего импульса ток  $I$  возрастает до 200 А.

Когда на 50-й микросекунде плазма проходит пятый ряд стержней, ток тлеющего разряда достигает 400 А, а ток  $I_0$  инициировавшей его дуги снижается до нуля. Поэтому далее через шестой, седьмой и восьмой ряды внутренних стержней проходит плазма уже самостоятельного тлеющего разряда. Его ток достигает установившейся величины ~600 А после полного заполнения плазмой всего многостержневого катода. Время установления ~100 мкс хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [19] для цилиндрического полого катода объемом 0,07 м<sup>3</sup> из 120 параллельных стержней, также соединенных с источником питания через индивидуальные резисторы. Резисторы демпфируют высокочастотные колебания, генерируемые на фронте нарастания тока [19, 20]. С одной стороны, это увеличивает время формирования плазменного эмиттера  $I$  (рис. 1), а с другой — повышает его однородность.

На порядок более высокую температуру электронов в первом варианте пушки можно объяснить образованием в промежутках между стержнями первого ряда двойного электростатического слоя, разделяющего периферийную плазму в промежутках между стержнями и центральную плазму, непосредственно контактирующую с эмиссионной сеткой  $11$ . Электроны, ускоренные в слое с перепадом потенциала ~20 В, многократно пролетают через центральную плазму, отражаясь от окружающих ее стержней и изменяя направление движения. Здесь они обмениваются энергией друг с другом, с медленными электронами, возбуждают и ионизируют газ и атомы распыляемого ионами металла. В результате формируется максвелловское распределение электронов по энергии с температурой  $T_e \sim 10$  эВ.

Во втором варианте пушки отношение площади поперечного сечения плазмы в зазорах между стержнями внутреннего ряда к общей площади рабочей поверхности стержней значительно больше,

чем в первом варианте, и поэтому условие образования в разряде двойного слоя [16] не выполняется. Здесь электроны поступают из периферийной плазмы в центральную плазму в результате диффузии, и их температура составляет  $T_e \sim 1$  эВ.

Описанный источник широкого электронного пучка с генерацией плазменного эмиттера в тлеющем разряде с многостержневой ловушкой и с двухступенчатой схемой формирования пучка отличается по сравнению с источником [12] рядом преимуществ.

Во-первых, при первичном формировании пучка с током в сотни ампер при напряжении ~30 кВ между сетками на расстоянии 13 мм друг от друга вероятность пробоя промежутка между ними значительно меньше, чем при расстоянии 12 мм и напряжении между ними ~200 кВ [12]. Ширина ~100 мм промежутка второй ступени ускорения обеспечивает его электрическую прочность при напряжении до 500 кВ.

Во-вторых, диффузное горение тлеющего разряда без образования катодных пятен вакуумной дуги при токе ~1 кА и длительности импульса  $\tau \sim 5$  мс достигается без использования каких-либо специальных материалов, очистки и тренировки поверхности катода. В описанных выше экспериментах длительность импульса пучка была ограничена лишь параметрами источника прямоугольных высоковольтных импульсов.

В-третьих, нет необходимости в импульсной подаче газа, так как плотность молекул газа и атомов материала катода в многостержневой ловушке во время сильноточного импульса автоматически повышается на порядок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плазменный эмиттер электронов, получаемый с помощью тлеющего разряда с многостержневой электростатической ловушкой, позволяет формировать импульсный пучок с равномерным распределением тока до 700 А по его сечению диаметром до 170 мм электронов с энергией до 300 кэВ при длительности импульса ~200 мкс. Соединение тысячи катодных стержней с источником питания разряда через индивидуальные резисторы исключает переход тлеющего разряда с током до 1 кА в дугу и обеспечивает однородность плазменного эмиттера.

Десорбция газа с поверхности катодных стержней площадью ~2 м<sup>2</sup> и их распыление ионами во время импульса тлеющего разряда повышают плотность молекул газа и атомов металла внутри многостержневого катода на порядок по сравнению с плотностью газа в вакуумной камере. Тлеющий разряд инициируется импульсом дугового разряда длительностью 50 мкс с амплитудой тока не менее 0,5 кА и устанавливается в результате после-

довательного заполнения радиальных рядов катодных стержней сначала дуговой плазмой, а затем плазмой уже самостоятельного тлеющего разряда.

При одной и той же амплитуде тока разряда в цепи катода  $I$  ток пучка в цепи коллектора  $I_b$  возрастает с повышением ускоряющего напряжения. Он перестает расти при  $I_b = I$ , когда в ускоряющий промежуток поступают все образованные в разряде электроны. При максимальном достигнутом токе 700 А пучка электронов с энергией 300 кэВ его энергоемкость при длительности импульса 200 мкс составляет 40 кДж, и при площади сечения пучка 0.025 м<sup>2</sup> поверхностная плотность энергии, поглощаемой дном коллектора, превышает 10<sup>6</sup> Дж/м<sup>2</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Metel A.* // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 156. № 1/3. P. 38.
2. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1983.
3. *Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Yu.A. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2011. V. 50. № 8. P. 08JG04-1.
4. *Метель А.С., Мельник Ю.А., Панин В.В.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 4. С. 387.
5. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Прудников В.В.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 674.
6. *Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Radkovskii G.V., Bersenev V.V.* // Surf. Coat. Technol. 1997. V. 96. № 1. P. 81.
7. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Болбуков В.П.* // ПТЭ. 2012. № 1. С. 130.
8. *Метель А.С.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 3. С. 281.
9. *Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 9. С. 1846.
10. *Schonland B.F.J.* // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1923. V. 104. № 725 (Sep.) P. 235.
11. *Schonland B.F.J.* // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1925. V. 108. № 745 (May). P. 187.
12. *Goebel D.M., Watkins R.M.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 2. P. 388.
13. *Метель А.С.* // ПТЭ. 1987. № 1. С. 164.
14. *Мельник Ю.А., Метель А.С., Ушаков Г.Д.* // VII Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике: Тезисы докладов. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1988. Ч. 1. С. 113.
15. *Филиппов В.Г.* // ПТЭ. 1981. № 1. С. 120.
16. *Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 12. С. 1140.
17. *Метель А.С., Григорьев С.Н.* Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. М.: Янус-К, 2005.
18. *Метель А.С.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 10. С. 1928.
19. *Метель А.С.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 12. С. 2329.
20. *Булычев С.В., Вялых Д.В., Дубинов А.Е. и др.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 11. С. 1019.