ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 1, с. 73–80

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.384.659+537.533.2

МНОГОДУГОВОЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ЭМИТТЕР ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ПУЧКА

© 2025 г. М. С. Торба[a,*], С. Ю. Дорошкевич[a], М. С. Воробьев[a], А. А. Гришков[a], Н. Н. Коваль[a], Р. А. Картавцов[a], М. А. Мокеев[a], Д. А. Шпанов[a]

[a] *Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

** e-mail: torba@opee.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 01.07.2024 г.
После доработки 09.08.2024 г.
Принята к публикации 07.10.2024 г.

Представлены результаты исследований по генерации радиально сходящегося электронного пучка в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером. Достигнуты режимы генерации электронного пучка, достаточные для модификации поверхности металлических материалов и изделий цилиндрической формы с расчетной плотностью энергии пучка на коллекторе до 20 Дж/см^2 при длительности импульса до 500 мкс. С использованием автоматизированной системы измерения параметров плазмы и одиночного зонда Ленгмюра в диапазоне тока дугового разряда 50–120 А и длительности импульса 50–500 мкс проведены измерения распределения параметров эмиссионной плазмы в сеточном плазменном эмиттере в азимутальном и аксиальном направлениях. Приведены сравнения электронных ветвей зондовой характеристики при различных давлениях рабочего газа ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па и $p = 8.5 \cdot 10^{-2}$ Па). Созданный источник электронов открывает новые возможности для модификации поверхности различных материалов и изделий цилиндрической или более сложной форм с целью изменения функциональных и эксплуатационных свойств этой поверхности.

DOI: 10.31857/S0032816225010106, **EDN:** GHJDYY

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники электронов с плазменным катодом [1–8] на основе дугового разряда низкого давления с сеточной/слоевой стабилизацией границы эмиссионной плазмы неоднократно демонстрировали свою эффективность в области модификации поверхности различных материалов и изделий, приводящей к кратному улучшению функциональных свойств их поверхности [9–13]. Несмотря на конструкционную и техническую простоту использования планарных электронных пучков [14–17] для обработки материалов и изделий сложной формы, в обычных условиях не представляется возможным проводить обработку таких изделий с достаточным качеством. Также несомненным минусом таких пучков при обработке изделий сложной формы является эффект геометрической тени, который не позволяет обработать некоторые участки изделия с развитой поверхностью (например, коронарные стенты).

Решение представленных выше проблем возможно путем генерации радиально сходящего электронного пучка. Однако для задач модификации поверхности металлических изделий электронным пучком длительностью десятки и даже сотни микросекунд требуется плотность энергии пучка уровня 10 Дж/см^2, что в условиях баллистической фокусировки пучка приводит к необходимости обеспечения эмиссионного тока уровня 0.15 А/см^2 при эмиссионной площади уровня 100 см^2 и выше, что затруднительно реализовать в источниках на основе термоэлектронной и ионно-электронной эмиссии.

В работах [18, 19] генерация электронного пучка производится на основе взрывной электронной эмиссии. Электронный пучок в таких системах генерируется в пушке диодного типа со взрывоэмиссионным катодом внутренним

диаметром 8 см, в который встроены 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы (в каждую секцию катода) [18], а также в цилиндрическом источнике триодного типа с диаметром катода 15 см и длиной 95 см [19]. Перечисленные системы генерируют радиально сходящиеся электронные пучки с максимальной плотностью энергии до 30 Дж/см^2 при различных диаметрах анода. Однако источники на основе взрывной электронной эмиссии также обладают рядом особенностей, а именно: небольшой длительностью импульсов (не более нескольких микросекунд), относительно низким ресурсом катода, однородностью пучка, напрямую зависящей от возникновения эмиссионных центров на катоде, сложностью управления мощностью пучка в течение импульса его генерации и др.

Высокую плотность энергии электронного пучка также может обеспечить плазменный катод [20], который при стабилизации границы эмиссионной плазмы обладает рядом преимуществ перед источниками на основе взрывной электронной эмиссии, такими как большой срок службы, некритичность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность. Также за счет использования эмиссионной сетки можно разделить разрядный и ускоряющий промежутки, что позволяет независимо друг от друга управлять основными параметрами пучка (током, энергией ускоренных электронов, длительностью и частотой следования импульсов).

При горении дугового разряда низкого давления происходит его шнурование. Это приводит к появлению неоднородности эмиссионной плазмы, распределение которой в объеме плазменного эмиттера влияет на распределение плотности тока пучка. В связи с этим работа посвящена измерению параметров эмиссионной плазмы (концентрации, температуры электронов, потенциала плазмы), определению аксиального и азимутального распределений концентрации плазмы в созданном многодуговом плазменном эмиттере и демонстрации возможностей такого источника электронов для решения задач по электронно-пучковой модификации поверхности различных материалов и изделий.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследования является источник электронов с сеточным плазменным эмиттером *9* на основе дуги низкого давления, позволяющий генерировать радиально сходящийся электронный пучок (рис. 1) энергией до 50 кэВ и током до 120 А, длительностью до 500 мкс и частотой следования импульсов 1 Гц [21]. В вакуумной камере *10* размещен многодуговой сеточный плазменный эмиттер, представляющий собой протяженный полый тороид из нержавеющей стали длиной 320 мм и внутренним диаметром 220 мм, корпус которого является анодом дугового разряда. Конструкция плазменного эмиттера имеет две основных области: область *1*, в которой происходят генерация дугового разряда и наработка эмиссионной плазмы и область *2*, в которой заряженные частицы приобретают высокую энергию, соответствующую ускоряющему напряжению U_0. Промежутки

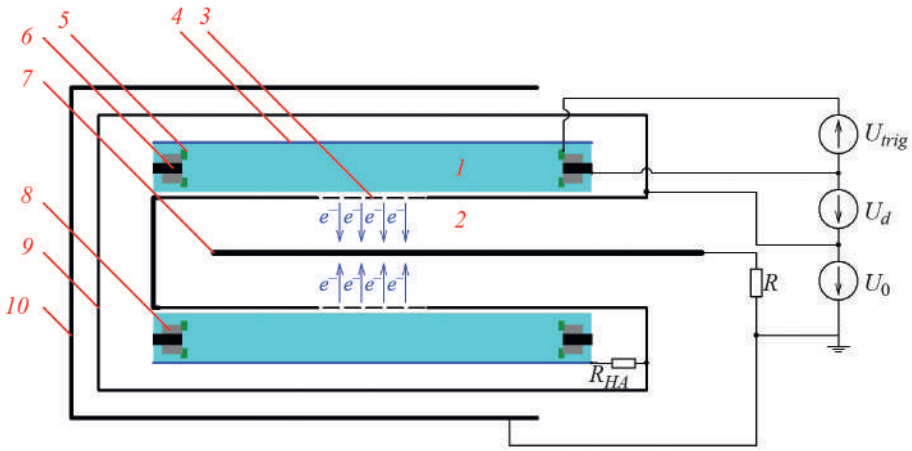


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – область горения дугового разряда, *2* – ускоряющий промежуток, *3* – мелкоструктурная эмиссионная сетка, *4* – полый анод, *5* – поджигающий электрод, *6* – катод, *7* – коллектор, *8* – диэлектрик, *9* – плазменный эмиттер, *10* – вакуумная камера.

разделены мелкоструктурной металлической сеткой *3* с размером ячейки 0.14×0.14 мм^2. Внутри плазменного эмиттера расположен полый анод *4*, выполненный из фольги из нержавеющей стали, который подключен через сопротивление ($R_{HA} = 25$ Ом) к основному аноду. Катодные узлы, создающие плазму дугового разряда (далее плазмогенераторы), закреплены на торцах протяженного полого тороида и разнесены на угол 120° относительно друг друга, по три с каждой стороны. Рабочий газ аргон подается в систему через трубки одинаковой длины, которые подключены к катодам, имеющим аксиальное отверстие 1 мм.

Дуговой разряд низкого давления инициируется источником U_{trig} путем пробоя по поверхности диэлектрика *8* между поджигающим электродом *5* и катодом *6*, после чего в пространстве полого анода загорается основной разряд U_d. Полый анод, подключенный через сопротивление к эмиссионной сетке, позволяет ускорить переключение тока дугового разряда от каждого плазмогенератора в область эмиссионной сетки для повышения коэффициента извлечения электронов из эмиттера.

Отбор электронов из эмиссионной плазмы и их ускорение до коллектора *7*, роль которого выполняет стержень из нержавеющей стали диаметром 16 мм, осуществляются через ячейки эмиссионной сетки под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 50 кВ, приложенного между эмиссионным электродом и коллектором. Коллектор располагается равноудаленно от эмиттера на оси источника электронов на расстоянии 9.4 см от эмиссионной сетки до края стержня. Параметры системы (ток разряда I_d, ток на коллекторе I_{col}, ток ускоряющего промежутка I_0 и ток камеры I_{ch}) измеряются поясами Роговского с чувствительностью 50 А/В.

Для всех типов источников электронов с плазменным катодом и сеточной/слоевой стабилизацией границы эмиссионной плазмы важными параметрами, ответственными за стабильную и эффективную генерацию электронного пучка, являются концентрация плазмы, ее потенциал и температура электронов. В данной работе измерение параметров плазмы дугового разряда и снятие зондовых характеристик осуществлялись с помощью автоматизированной системы измерения [22]. Эта система позволяет не только обеспечить требуемую статистическую достоверность получаемых данных, но и проводить измерение параметров плазмы в различные моменты генерации разряда и наблюдать их динамику. Система измерения фиксирует мгновенные значения как тока зонда, так и напряжения смещения на нем. В качестве зонда использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром 0.3 мм. Зонд был расположен в центре области горения разряда равноудаленно от торцевых стенок эмиттера.

Структурная схема системы измерения представлена на рис. 2, она состоит из трех блоков: измерительный блок, микроконтроллер и формирователь синхроимпульсов. Измерительный блок включает в себя аналого-цифровой преобразователь (АЦП), делитель напряжения для измерения напряжения смещения и шунт для измерения тока зонда.

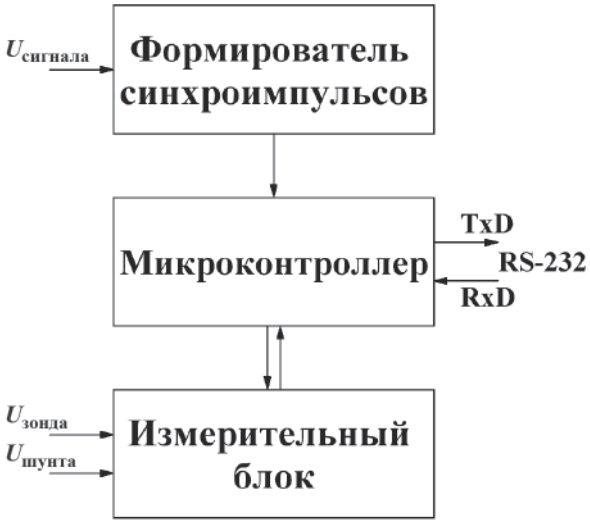


Рис. 2. Структурная схема зондовой системы измерения параметров эмиссионной плазмы.

При генерации разряда возникает необходимость синхронизации начала момента измерения относительно импульсов тока разряда, поэтому отдельным блоком выступает формирователь синхроимпульсов. Максимальное количество точек, хранящихся в памяти за однократное измерение, составляет 1000. При количестве измерений более 1000 система передает данные на ПК и снова проводит измерения до тех пор, пока не достигнет заданного количества измерений. После передачи данных на ПК в окне программы отображается измеренная зондовая характеристика. Также имеется функция изменения времени задержки измерения от фронта импульса тока разряда, что позволяет

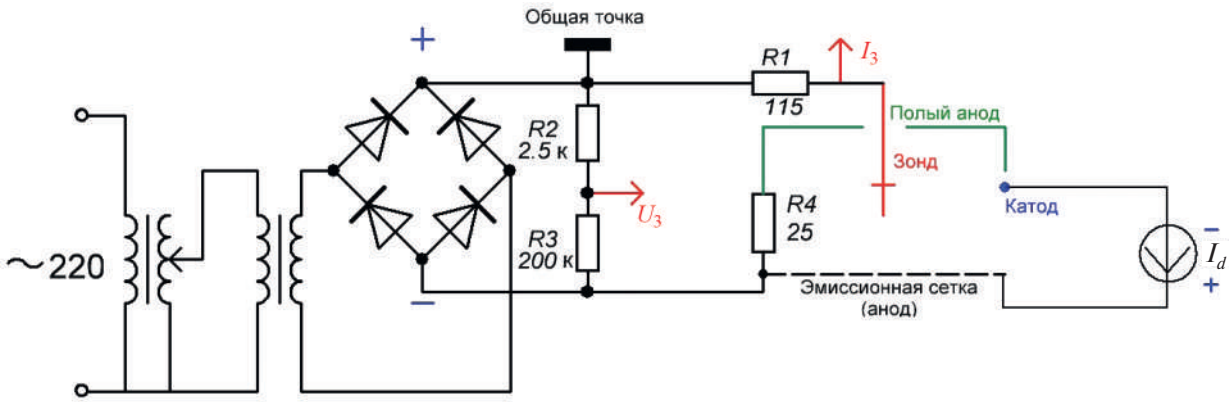


Рис. 3. Схема измерения зондовой характеристики относительно анода дугового разряда.

измерять параметры эмиссионной плазмы в течение импульса тока разряда и прослеживать динамику ее параметров. За один импульс генерации система измеряет одну точку ВАХ-зонда. Поскольку в данном случае рассматривается генерация разряда с частотой в 1 Гц, измерение нескольких сотен точек занимает несколько минут с учетом времени передачи данных и вывода их на экран.

Схема измерения зондовых характеристик представлена на рис. 3. Зонд подключался относительно полого анода дугового разряда, имеющего гораздо большую площадь в сравнении с катодом, чтобы вносить минимальные искажения в генерируемую плазму. Измерение параметров плазмы (потенциал плазмы, температура и концентрация электронов) проводилось с использованием электронной ветви зондовой характеристики. Напряжение смещения подавалось на зонд от лабораторного автотрансформатора через разделительный трансформатор и диодный мост. Электропитание системы измерения было гальванически отвязано от общей сети напряжения. Измерение напряжения смещения и тока зонда осуществлялось относительно общей точки системы измерения. Для определения потенциала плазмы и температуры электронов была построена зависимость логарифма тока зонда от напряжения смещения. Электронный ток насыщения определялся по зондовой характеристике в точке потенциала плазмы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Напряжение горения дугового разряда измерялось с помощью высоковольтного щупа. На основе полученных данных были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) при различных давлениях рабочего газа (рис. 4). При повышении давления рабочего газа происходит

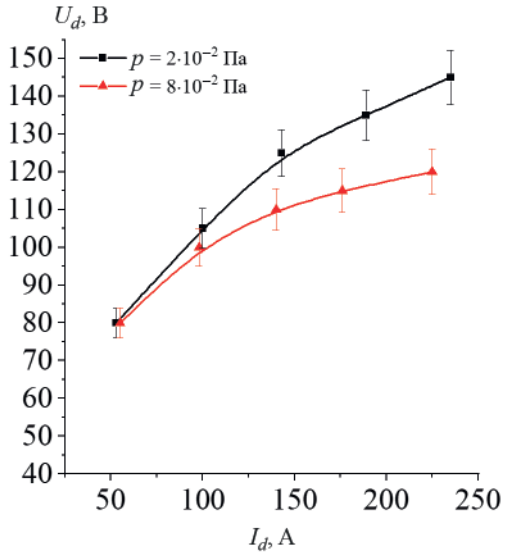


Рис. 4. ВАХ дугового разряда низкого давления в источнике электронов с плазменным катодом.

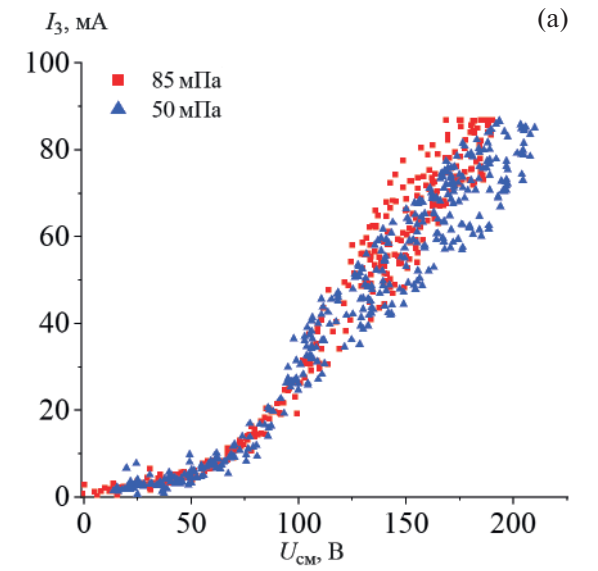
снижение напряжения горения разряда, связанное с увеличением количества актов ионизации в объеме и повышением концентрации эмиссионной плазмы. К примеру, при токе разряда $I_d = 140$ А напряжение разряда при повышении давления газа (с $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Па до $p = 8 \cdot 10^{-2}$ Па) уменьшается примерно на 15 В.

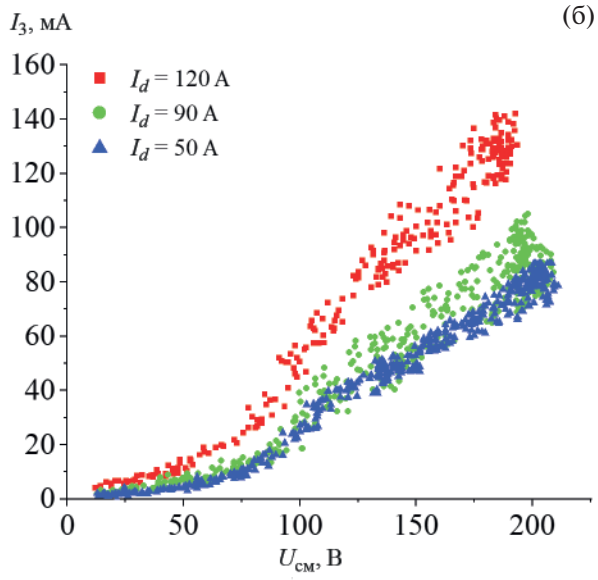
На рис. 5 представлены результаты зондовых измерений. Из рис. 5а следует, что параметры плазмы слабо зависят от давления в диапазоне

50–85 мПа, тогда как на рис. 5б виден явный рост концентрации плазмы при изменении тока разряда. Сравнение зондовых характеристик, полученных в различные моменты времени, относительно начала импульса (рис. 5в), показало, что потенциал плазмы растет примерно до 60 мкс и практически не изменяется после, что, вероятно, связано с временем заполнения плазмой объема эмиттера. Из зондовых характеристик (рис. 5в) была рассчитана также концентрация плазмы в различные моменты: в начале импульса (20 мкс) она составила $2.6 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, в середине импульса (60 мкс) – $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, а в конце (100 мкс) достигла значения $5.8 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$. Потенциал плазмы в течение импульса менялся с 100 до 120 В. Данные изменения свидетельствуют о расширении плазмы в течение импульса и установлении квазистационарного режима генерации примерно к 60-й микросекунде.

В данных экспериментах электронный ток насыщения варьирует в пределах 23–65 мА. Таким образом, в близких к рабочим режимах температура электронов дугового разряда составила T_e = 35 эВ, а концентрация электронов в плазме достигала значения $n_e = 8.1 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ при токе I_d = 120 А, тогда как при токе разряда I_d = 80 А концентрация плазмы составляла $5.8 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, что свидетельствует о существенной зависимости концентрации от тока дугового разряда. Стоит отметить, что полученная величина T_e представляет собой некоторую среднюю величину энергии электронов, а не энергию полностью термализованных электронов разряда.

На азимутальном распределении (рис. 6) концентрация плазмы составила $n_e = (5.7 \pm 0.4) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ при токе разряда I_d = 120 А и $n_e = (3.6 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$при токе I_d = 90 А. Температура электронов в среднем составила 40 эВ, а потенциал плазмы составил около 90 В. Полученное распределение показало удовлетворительную неоднородность концентрации плазмы в данной конфигурации электродной системы плазменного эмиттера для получения однородного радиально сходящегося электронного пучка.





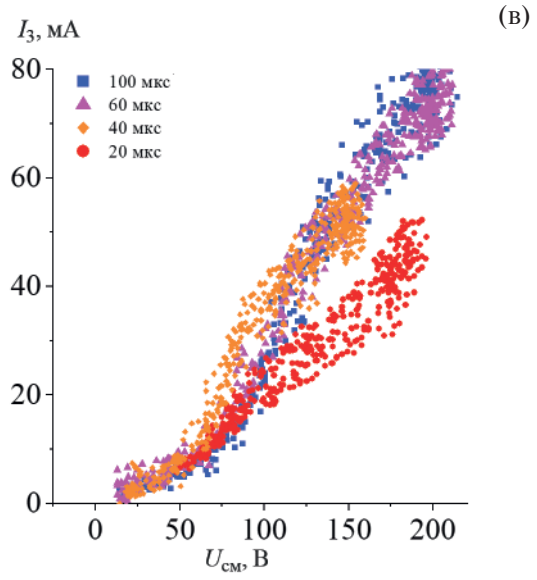


Рис. 5. Сравнение зондовых характеристик при различных давлениях (I_d = 70 А) (**а**), токах разряда ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па) (**б**), моментах относительно начала импульса (I_d = 80 А, $p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па) (**в**).

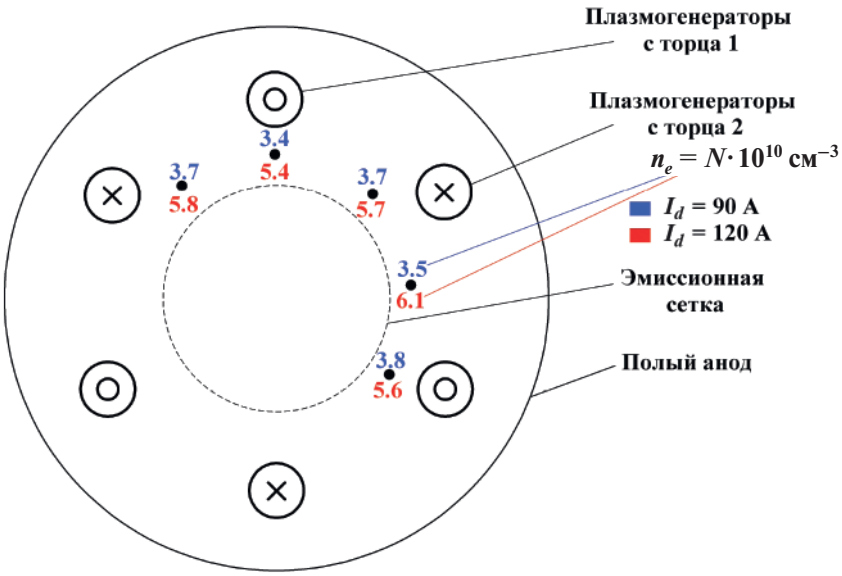


Рис. 6. Азимутальное распределение концентрации эмиссионной плазмы ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па).

Аксиальное распределение (рис. 7) концентрации эмиссионной плазмы по длине плазменного эмиттера показало, что концентрация плазмы дугового разряда уменьшается с $9 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ до $3 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ по мере удаления от плазмогенератора, на оси которого располагался зонд. Вероятно, полученное снижение концентрации связано с неоптимальным радиусом окружности (22 см), на которой расположены плазмогенераторы. Потенциал плазмы в аксиальном распределении изменялся несущественно и составлял примерно 110 В.

Эксперименты по генерации радиально сходящегося электронного пучка с использованием созданного сеточного плазменного эмиттера показали, что в данной конфигурации системы можно получить плотность энергии до 20 Дж/см^2, что является достаточным для обработки поверхности металлических изделий различных форм. Характерные осциллограммы тока разряда и тока пучка представлены на рис. 8а. Из предположения, что весь ток в ускоряющем промежутке I_0 является эмиссионным током из плазменного эмиттера $I_0 = I_{em}$, следует (рис. 8а), что коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера, равный отношению $\alpha = I_{em}/I_d$, составляет около 0.75. На рис. 8б представлен автограф электронного пучка на коллекторе из нержавею-

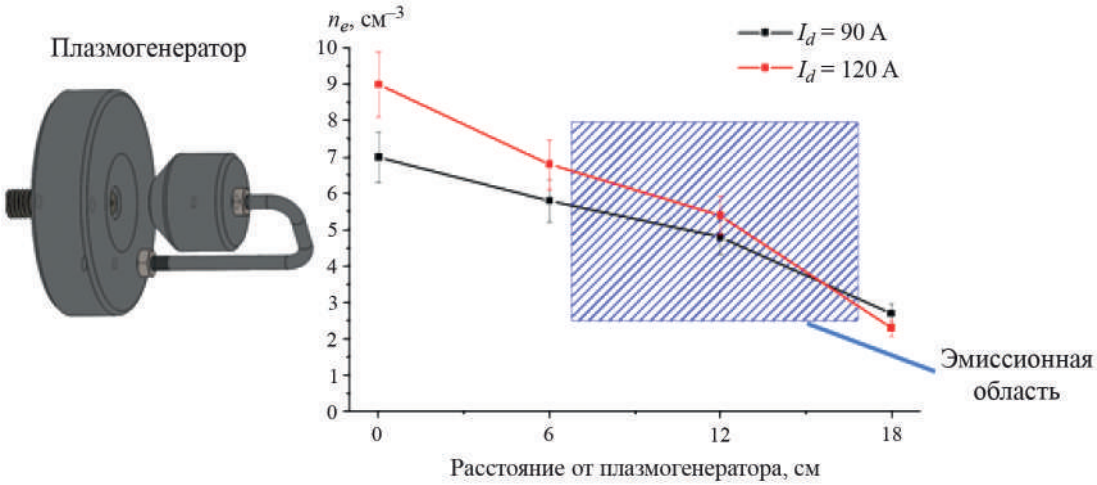


Рис. 7. Аксиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы на оси плазмогенератора ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па).

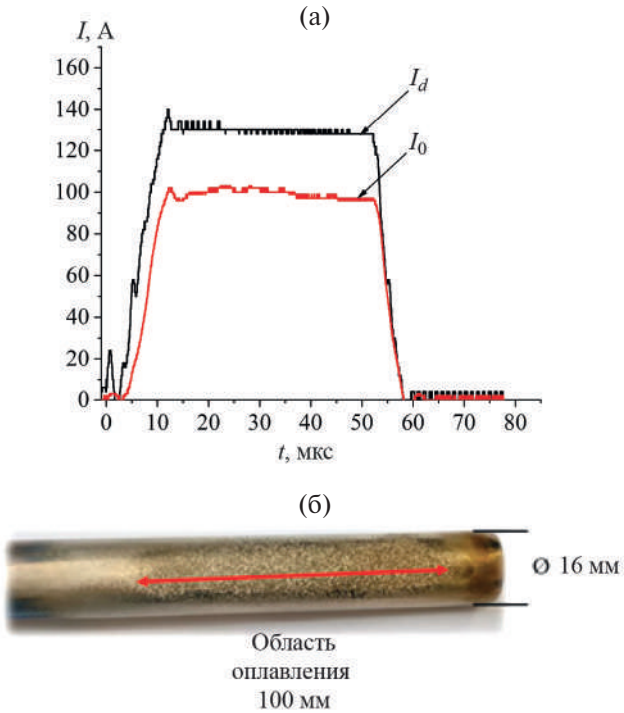


Рис. 8. Осциллограммы токов разряда и токов в ускоряющем промежутке ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ Па) (**а**) и автограф электронного пучка на коллекторе из нержавеющей стали при токе пучка $I_b = 100$ А, ускоряющем напряжении $U_0 = 45$ кВ и длительности импульса $\tau = 150$ мкс ($J \approx 13$ Дж/см^2) (**б**).

щей стали при токе пучка $I_b = 100$ А, ускоряющем напряжении $U_0 = 45$ кВ и длительности импульса $\tau = 150$ мкс ($J \approx 13$ Дж/см^2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования продемонстрировали удовлетворительную неоднородность концентрации плазмы, заполняющей объем плазменного эмиттера, при различных токах многодугового разряда и давлениях рабочего газа, что косвенно может говорить о равномерности обработки различных материалов и изделий цилиндрической и более сложной форм при помощи источника электронов с радиально сходящимся пучком. Для азимутального распределения в середине плазменного эмиттера концентрация плазмы в среднем составила $n_e \approx (3.6 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ для тока разряда 90 А и $n_e \approx (5.7 \pm 0.4) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$ для тока 120 А. Полученные зависимости параметров плазмы от давления показали незначительные различия, в то время как при изменении тока разряда с 50 до 120 А концентрация эмиссионной плазмы менялась с $(3.8 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$до $(8.1 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$. Используемая автоматизированная система измерения позволила получить динамику параметров плазмы в течение импульса тока разряда. Так, в центральной области эмиттера плазма нарабатывается в течение 60 мкс. Это подразумевает генерацию дугового разряда длительностью порядка 100 мкс и более в данной конфигурации электродной системы, что также важно учитывать при разработке источников электронов на основе сеточных плазменных катодов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00939).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М.* Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. *Гаврилов Н.В., Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Окс Е.М. и др.* Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. Екатеринбург: Наука, 1993.
3. *Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н.* Эмиссионная электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
4. *Крейндель Ю.Е., Мартенс В.Я., Съедин В.Я., Гаврилцев С.В.* // ПТЭ. 1982. № 4. С. 178.
5. *Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Крейндель Ю.Е., Толкачев В.С., Щанин П.М.* // ПТЭ. 1987. № 1. С. 167.
6. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. Новосибирск: Наука, 1983.
7. *Grigoriev S.V., Koval N.N., Devjatkov V.N., Teresov A.D.* // Proc. 9th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2008. P. 19.
8. *Григорьев С.В., Девятков В.Н., Миков А.В., Москвин П.В., Тересов А.Д.* // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 58.
9. *Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н.* Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под ред. А.И. Потекаева. Томск: НТЛ, 2007.
10. *Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Денисова Ю.А.* Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали. Новокузнецк: Полиграфист, 2012.
11. *Волков К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А.* Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013.
12. *Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С.* Формирование структурно-фазовых состояний и свойств поверхности

титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014.
13. *Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Аксенова К.В.* Усталость силумина, модифицированного электронно-пучковой обработкой. Новокузнецк: Полиграфист, 2016.
14. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. Томск: НТЛ, 2016.
15. *Воробьев М.С., Григорьев С.В., Москвин П.В., Сулакшин С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 199.
16. *Воробьев М.С., Гамермайстер С.А., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А., Щанин П.М.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 12. С. 24.
17. *Воробьев М.С., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 109.
18. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 84. https://doi.org/10.31857/S0032816223030072
19. *Энгелько В.И., Павлов Е.П., Ткаченко К.И., Щеголихин Н.П.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 1. С. 67. https://doi.org/10.55176/2414-1038-2019-1-67-74
20. *Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Воробьев М.С.* // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 12. С. 7. https://doi.org/ 10.17223/00213411/63/10/7
21. *Torba M.S., Doroshkevich S.Y., Vorobyov M.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. № 87. Suppl. 2. P. 318. https://doi.org/10.1134/S1062873823704798
22. *Doroshkevich S.Y., Vorobyov M.S., Kovalsky S.S. et al.* // J. Physics: Conference Series. Proc. 14th Inter. Conf. “Gas Discharge Plasmas and Their Applications”. 2019. V. 1393. 012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012006