

УДК 621.3.032.269

## ФОРВАКУУМНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

© 2013 г. А. В. Казаков, В. А. Бурдовицин, А. В. Медовник, Е. М. Окс

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

*Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40*

*E-mail: burdov@fet.tusur.ru*

Поступила в редакцию 12.02.2013 г.

Описан плазменный источник электронов на основе дугового разряда, предназначенный для формирования импульсного широкоапертурного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений (4–15 Па). При ускоряющем напряжении 12 кВ в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса с эмиссионной поверхности площадью 80 см<sup>2</sup> извлекался ток 80 А. Распределение плотности тока по сечению пучка близко к гауссовому, при этом усредненная по поверхности плотность энергии пучка в импульсе достигала 10 Дж/см<sup>2</sup>.

DOI: 10.7868/S0032816213060049

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные электронные пучки большого сечения находят применение при модификации поверхностных свойств обрабатываемых изделий [1, 2]. Генерация таких пучков в области повышенных давлений форвакуумного диапазона (10–100 Па) [3] обеспечила возможность электронно-лучевой обработки поверхности электрически непроводящих материалов, в частности различных керамик [4, 5]. В разработанном нами ранее для этих целей плазменном источнике электронов [6] для создания эмиссионной плазмы использовался тлеющий разряд с полым катодом.

Несмотря на ряд принципиальных преимуществ разрядных систем с полым катодом (однородность и стабильность параметров плазмы, низкий уровень шумов), превышение током разряда некоторого порогового значения приводит к образованию катодного пятна и переходу в дуговой режим. При таком переходе катодное пятно возникает случайным образом в любой точке поверхности катодной полости, и процесс дугообразования резко нарушает однородность плазмы в полости, что приводит, в конечном счете, к пробую ускоряющего промежутка.

Кондиционирование (“тренировка”) электродов разрядной системы или укорочение длительности импульса обеспечивает некоторое увеличение тока диффузной формы разряда. Однако для многих применений импульсного электронного пучка, когда эффект воздействия определяется плотностью энергии в однократном импульсе, этого увеличения тока недостаточно.

Проблема ограничения максимально возможного тока в импульсных плазменных источниках

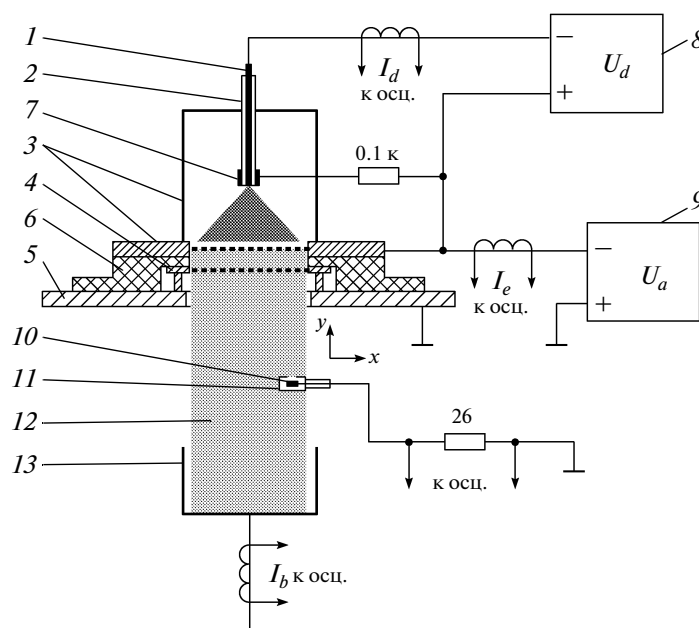
электронов на основе тлеющего разряда известна, и она традиционно решается заменой тлеющего разряда на дуговой [7]. Поскольку в этом случае обеспечивается принудительная локализация катодного пятна дуги в ограниченной области вдали от эмиссионной поверхности плазмы, то это существенно снижает влияние неустойчивостей, характерных для дугового разряда, на параметры электронного пучка.

По-видимому, аналогичный подход целесообразно использовать для дальнейшего повышения тока пучка и в импульсных электронных источниках, функционирующих в форвакуумной области давлений. В настоящей работе описана конструкция и приведены параметры форвакуумного импульсного плазменного источника электронов, в котором для создания эмиссионной плазмы используется дуговой разряд.

### ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

Конструкция форвакуумного импульсного плазменного источника электронов показана на рис. 1. Катод 1 источника представляет собой медный стержень Ø5 мм, заключенный в керамическую трубку 2. Трубка ограничивает рабочую область катода торцевой поверхностью и одновременно служит для его электрической изоляции. Анод 3 (также медный) источника – полый цилиндр, в основании которого выполнено эмиссионное окно Ø90 мм, перекрытое мелкоструктурной сеткой (0.3 × 0.3 мм).

Ускоряющий промежуток образован плоской частью анода и сетчатым электродом – экстрактором 4, закрепленным на фланце вакуумной камеры 5. Анодная и экстракторная сетки выполне-



**Рис. 1.** Конструкция электронного источника и схема измерения параметров. 1 – катод; 2 – керамический изолятор; 3 – анод; 4 – экстрактор; 5 – фланец вакуумной камеры; 6 – капролоновый изолятор; 7 – поджигающий электрод; 8 – блок питания разряда; 9 – блок питания ускоряющего промежутка; 10 – зонд; 11 – металлический экран; 12 – пучок; 13 – цилиндр Фарадея.

ны из нержавеющей стали. Капролоновый изолятор *b* служит для электрического разделения анода и экстрактора.

Источник электронов размещен на вакуумной камере, которая откачивалась механическим насосом. Рабочее давление 4–15 Па регулировалось подачей воздуха в камеру.

Стабильное зажигание дуги осуществлялось в так называемом режиме “triggerless” [8] вспомогательным разрядом по поверхности керамики между катодом *1* и поджигающим электродом *7*, электрически соединенным с анодом через резистор. Импульсный блок питания разряда *8* обеспечивал амплитуду тока разряда  $I_d = 40–120$  А в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса (до 1 мс). Частота повторения импульсов во всех экспериментах составляла 1 импульс/с. Постоянное ускоряющее напряжение  $U_a$  формировалось блоком питания *9* и регулировалось от 1 до 12 кВ. Токи разряда  $I_d$ , эмиссии  $I_e$  и пучка  $I_b$  измерялись с помощью трансформаторов тока (поясов Роговского) с чувствительностью 50 А/В (токи разряда и эмиссии) и 10 А/В (ток пучка), сигналы с которых подавались на осциллограф Tektronix TDS 2004В.

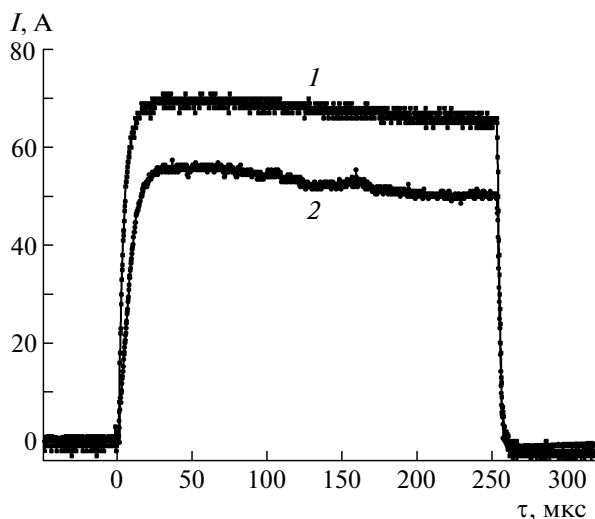
Транспортировка электронного пучка в форвакууме сопровождается образованием вблизи коллектора достаточно плотной плазмы. Электроны и ионы из этой плазмы, попадая на коллектор, могут существенно исказить результаты измерений тока ускоренного электронного пучка. По-

этому исследования характеристик электронного источника основывались на измерении тока  $I_e$  эмиссии электронов, который регистрировался в цепи источника питания ускоряющего промежутка.

Ток пучка оценивался в предположении, что потери тока эмиссии на ускоряющей сетке соответствуют ее геометрической прозрачности (70%). Напряжение горения разряда измерялось с помощью резистивного делителя НVP-15HF с коэффициентом деления 1:1000. Распределение плотности тока пучка регистрировалось плоским зондом *10*, который был помещен в металлический заземленный экран *11* с коллимирующим отверстием  $\varnothing 3$  мм. Зонд крепился на двухкоординатной системе перемещения. Радиальная координата  $r$  отсчитывалась от оси симметрии источника электронов в интервале от  $-55$  до  $+55$  мм. Вертикальная координата – расстояние  $L$  между экстрактором и зондом – изменялась в диапазоне от 135 до 225 мм.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Как показали эксперименты, стабильное зажигание дуги наблюдалось при напряжениях 2–3 кВ. Такие напряжения для инициирования дуги достаточно высоки по сравнению с [8], и наблюдаемая разница, по-видимому, связана с большей протяженностью межэлектродного промежутка вспомогательного разряда (2 мм вместо 1 мм).

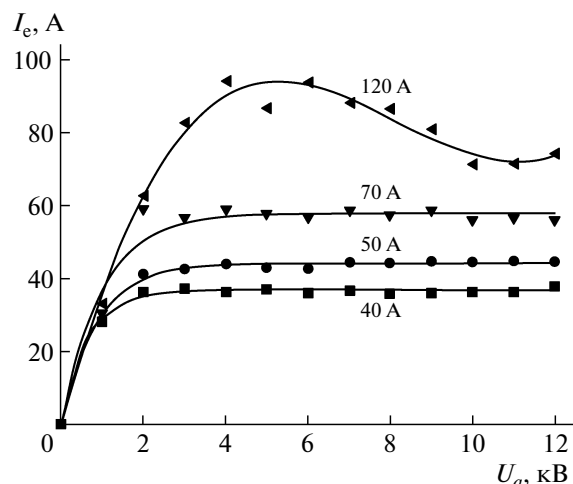


**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока разряда (1) и тока эмиссии электронов (2). Ускоряющее напряжение 12 кВ, давление газа 8 Па.

Переход в форвакуумном плазменном источнике электронов с тлеющего разряда на дуговой не оказал заметного влияния на стабильность и повторяемость параметров импульсного электронного пучка. Типичные осциллограммы тока разряда и тока эмиссии электронов представлены на рис. 2. Ток эмиссии достигает значений, близких к току разряда, что указывает на высокую эффективность извлечения.

Четко выраженный участок насыщения тока эмиссии на вольт-амперных характеристиках (в.а.х.) электронного источника при токах разряда до 70 А (рис. 3) однозначно свидетельствует о незначительном вкладе в полный ток пучка вторичных электронов, выбитых с эмиссионной сетки обратным потоком ионов из области ускорения и транспортировки электронного пучка. Наблюдаемая на этом же рисунке немонотонность зависимости  $I_e(U_a)$  для тока разряда 120 А связана, по-видимому, с проникновением эмиссионной плазмы в ускоряющий промежуток. Уменьшение давления газа практически не изменяет вида в.а.х., но приводит к снижению тока насыщения.

Важным параметром, характеризующим широкоапертурные пучки электронов, является радиальное распределение плотности тока. Нами замечено, что по мере распространения пучка его диаметр, измеренный на полувысоте распределения, уменьшается. Как указывалось ранее [6], причиной такого уменьшения может быть искажение плоскопараллельной формы ускоряющего промежутка за счет пучковой плазмы, проникающей через экстракторную сетку в ускоряющий промежуток. Ускоряющее напряжение в диапазоне от 4 до 10 кВ практически не влияет на вид ради-

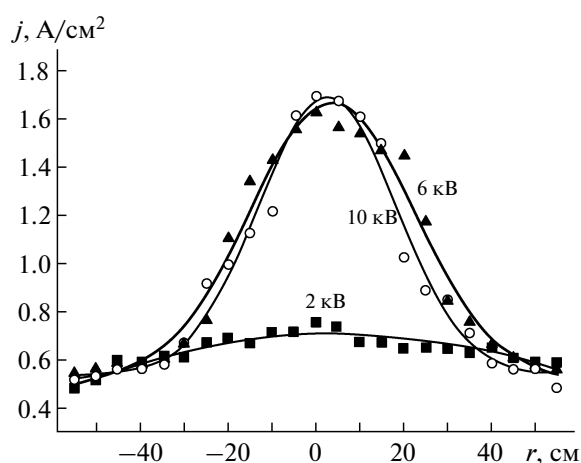


**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики источника при различных токах разряда (цифры у кривых). Давление газа 8 Па, длительность импульса 0.25 мс.

ального распределения (рис. 4), что может быть отнесено к достоинствам описываемого источника.

Испытания источника на достижение предельных параметров дали следующие результаты. При ускоряющем напряжении 12 кВ и длительности импульса вплоть до 1 мс удавалось удерживать ток эмиссии на уровне 80 А. По нашим оценкам, полная энергия электронного пучка в однократном импульсе составляла 600 Дж, а усредненная по поверхности плотность энергии пучка достигала 10 Дж/см<sup>2</sup>.

Эти параметры превосходят ранее достигнутые в аналогичном источнике на основе тлеющего разряда с полым катодом [6]. В источнике с



**Рис. 4.** Радиальные распределения плотности тока электронного пучка для различных ускоряющих напряжений (цифры у кривых). Ток эмиссии 50 А, давление газа 4 Па, расстояние анод-зонд 170 мм, длительность импульса 0.25 мс.

тлеющим разрядом достичь устойчивой эмиссии при такой длительности импульса не удавалось из-за пробоя ускоряющего промежутка, инициируемого неконтролируемым образованием катодных пятен на стенках полости, и, как следствие, “шнурованием” разряда с последующим проникновением плазмы в ускоряющий промежуток.

Большие длительности импульса тока пучка позволили не только использовать разработанный электронный источник для модификации поверхности керамических изделий, но и применить его для объемного спекания керамики (в этом случае частота повторения импульсов составляла 10 импульсов/с). Проблема неравномерного нагрева еще ждет своего решения, однако принципиальная возможность спекания компактированного порошка оксида циркония подтверждена экспериментально.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-08-00175) и Минобрнауки (проекты № 7.3101.2011 и ФЦП № 12.В37.21.0935).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Proskurovsky D., Rotshtein V., Ozur G. et al.* // Surface and Coating Technology. 2000. № 1–3. P. 49.
2. *Коваль Н.Н., Щанин П.М., Десятков В.Н. и др.* // ПТЭ. 2005. № 1. С. 135.
3. *Burdovitsin V.A., Oks E.M.* // Laser and particle beams. 2008. Issue 04. P. 619.
4. *Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М.* // Письма в ЖТФ. 2009. Вып. 11. С. 61.
5. *Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г.* // Перспективные материалы. 2011. № 6. С. 77.
6. *Юшков Ю.Г., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М.* // ПТЭ. 2011. № 2. С. 85.
7. *Окс Е.М.* Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
8. *Anders A., Brown I.G., MacGill R.A., Dickinson M.R.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 1998. № 5. P. 584.