

ФОРВАКУУМНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2011 г. Ю. Г. Юшков, В. А. Бурдовицин, А. В. Медовник, Е. М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

Поступила в редакцию 20.08.2010 г.

Описан плазменный источник электронов, предназначенный для формирования импульсного широкоапертурного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений (5–20 Па). Источник основан на использовании тлеющего разряда с полым катодом. При ускоряющем напряжении 20 кВ, длительности импульса тока 100 мкс и частоте повторения 10 Гц ток электронного пучка составлял 100 А, а максимальная плотность энергии пучка в импульсе – 10 Дж/см². Достигнутые параметры электронного пучка и особенности функционирования источника в форвакуумной области давлений позволяют эффективно его использовать для модификации поверхностных свойств непроводящих материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка материалов импульсными сильноточными электронными пучками низкой энергии, приводящая к нагреву или оплавлению лишь тонкого поверхностного слоя, обеспечивает существенную модификацию поверхностных свойств материала на больших глубинах и, как результат, повышение микротвердости, коррозионной стойкости, а также снижение коэффициента трения [1, 2]. Для данной технологии используются, как правило, плазменные источники электронов с нестационарной [3] или квазистационарной [4] эмиссионной границей плазмы. При этом номенклатура материалов, обрабатываемых импульсными электронными пучками, была ограничена металлами, сплавами и другими проводящими веществами.

В последнее время существенное развитие получили так называемые форвакуумные плазменные источники электронов [5]. Принципиальным отличием этих устройств является их способность к генерации пучков в ранее недоступной области давлений 5–20 Па, которая может достигаться с использованием лишь одной механической (форвакуумной) ступени откачки. Указанное преимущество имеет, несомненно, значение, однако одним из главных достоинств форвакуумных источников электронов является их способность непосредственной обработки непроводящих материалов. Как показали эксперименты, в форвакуумной области давлений при воздействии ускоренного электронного пучка на изолированную мишень, несмотря на энергию пучка в несколько килоэлектронвольт, установившийся плавающий потенциал этой мишени оказывается близким к потенциалу

земли [6]. Это обуславливает возможность эффективной обработки диэлектриков электронным пучком с энергией, практически соответствующей величине ускоряющего напряжения. Применение форвакуумных плазменных электронных пушек для обработки непроводящих материалов было успешно продемонстрировано на примере сварки алюмооксидной керамики непрерывным сфокусированным электронным пучком [7].

Однако для использования электронных пучков в импульсном режиме для непосредственной поверхностной обработки непроводящих материалов, в первую очередь различных керамик, следует обеспечить генерацию в форвакуумной области давлений импульсного пучка с относительно большим поперечным сечением. При этом удельные параметры пучка, главным образом плотность энергии пучка в импульсе, должны достигать значений, достаточных для эффективной обработки поверхности. В микросекундном диапазоне длительностей эта плотность должна быть порядка 10 Дж/см² [8].

В данной работе описаны конструкция и принцип функционирования, а также приведены характеристики и параметры плазменного источника электронов, предназначенного для формирования импульсного широкоапертурного пучка в форвакуумном диапазоне давлений.

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

Схематично конструкция форвакуумного плазменного источника импульсного пучка электронов представлена на рис. 1. В форвакуумном диапазоне практически не удается создать сколько-

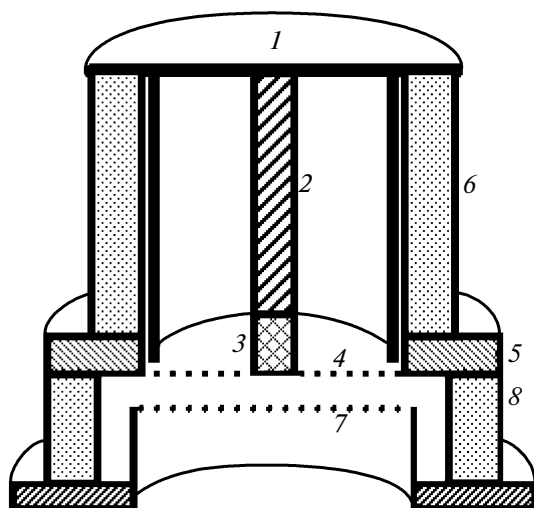


Рис. 1. Схематическое изображение форвакуумного плазменного источника импульсного пучка электронов. 1 – полый катод; 2 – центральная катодная вставка; 3 – центральный изолятор; 4 – анодная сетка; 5 – анодный фланец; 6 – изолятор разрядного промежутка; 7 – сетка экстрактора; 8 – изолятор ускоряющего промежутка.

нибудь заметный перепад давлений между областями генерации эмиссионной плазмы и формирования электронного пучка, характерный для плазменных источников электронов, функционирующих в диапазоне традиционно более низких давлений порядка 0.1 Па. Поэтому в изобарическом режиме работы плазменных источников электронов решение взаимоисключающих проблем генерации плотной эмиссионной плазмы при одновременном сохранении высокой электрической прочности ускоряющего промежутка обеспечивается сочетанием полукатодной разрядной системы с плоскопараллельным ускоряющим промежутком минимально возможной протяженности.

При этом специальные конструктивные решения узла ускоряющего промежутка препятствуют возникновению пробоя по так называемым “длинным путям”. Такие принципы построения форвакуумных плазменных электронных пушек были успешно использованы нами ранее в устройствах с непрерывным режимом работы [9]. Эти же принципы были положены в основу создания плазменных источников электронов для генерации в форвакуумной области давлений импульсных широкоапертурных электронных пучков.

Выполненный из меди катод 1 содержит цилиндрическую полость $\varnothing 93$ и высотой 70 мм. На оси полости установлен медный цилиндрический пруток 2 диаметром 19 мм. Со стороны эмиссионного отверстия на этом электроде закреплен ка-

пролоновый изолятор 3, который фиксирует положение сеточного анода 4. Сеточный анод 4 выполнен в виде двух наложенных друг на друга сеток из нержавеющей стали, размер ячейки сетки каждой из которых 0.3×0.3 мм, а геометрическая прозрачность 60%. Сеточный анод 4 закреплен на фланце 5. Собранный узел полого катода установлен на изоляторе 6.

Плоскопараллельный ускоряющий промежуток образован двумя сетчатыми электродами: анодом 4 и экстрактором 7. Расстояние между этими электродами во всех экспериментах оставалось неизменным и составляло 25 мм. Сетка экстрактора 7 (2.5×2.5 мм, 70%) также изготовлена из нержавеющей стали. Изоляторы 6 и 8 разрядного и высоковольтного промежутков выполнены из капролона. Диаметр и высота изоляторов равны соответственно 100 и 70 мм для разрядного и 146 и 40 мм для ускоряющего промежутков.

Импульс тока разряда обеспечивался искусственной формирующей линией, заряжаемой до 2–8 кВ и коммутируемой тиратроном ТГИ500/16. Длительность импульса тока составляла 100 мкс, а максимальный ток разряда без перехода в дугу достигал 100–120 А. Частота повторения импульсов тока разряда ограничивалась температурным режимом электродов источника и не превышала 10 Гц. Отбор и ускорение электронов осуществлялись приложением постоянного напряжения до 20 кВ.

Источник электронов размещался на вакуумной камере, откачиваемой механическим насосом до предельного давления 1 Па. Рабочее давление (5–15 Па) регулировалось подачей газа (аргона или воздуха) непосредственно в вакуумную камеру.

Измерения импульсных параметров разряда и пучка осуществлялись стандартными методами (делители напряжения, трансформаторы тока, цилиндр Фарадея). Для исследования распределения плотности тока по сечению пучка применялась линейка из 10 зондов $\varnothing 2.5$ мм, расположенных на расстоянии 5 мм друг от друга.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Как видно из предыдущего раздела, система электрического питания электронного источника не содержала специальных схем для обеспечения зажигания плазмообразующего разряда (в данном случае – тлеющего разряда с полым катодом). Обычно это дополнительный источник высокого напряжения короткой длительности. Для плазменных источников электронов, функционирующих в форвакуумной области давлений, за-

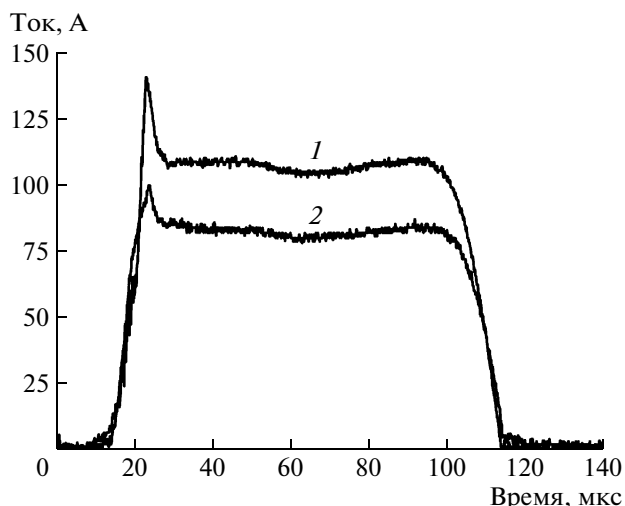


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока разряда (1) и тока эмиссии электронов (2). Ускоряющее напряжение 10 кВ, давление газа (воздуха) 12 Па.

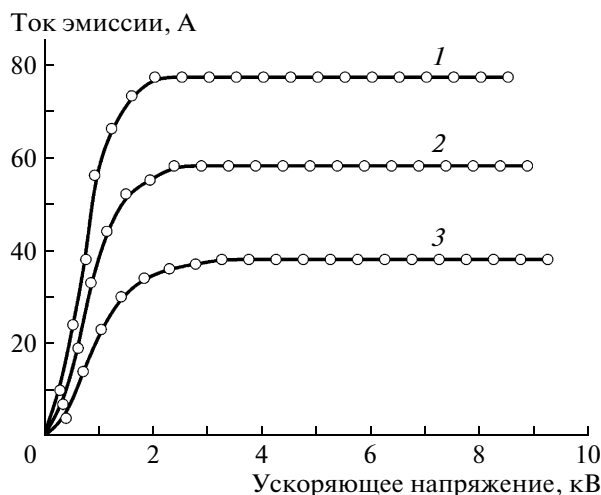


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики источника при токах разряда: 1 – 80 А, 2 – 60 А, 3 – 40 А. Давление газа (воздуха) 15 Па.

жигание разряда существенно облегчается обратным ионным потоком из плазмы “паразитного” высоковольтного слаботочного разряда, возникающего в ускоряющем промежутке при приложении высокого напряжения [10].

Поскольку величина тока разряда намного превышает пороговый ток образования катодного пятна, то предотвращение перехода разряда в дуговой режим горения становится одним из важных условий устойчивого функционирования электронного источника. Несмотря на то, что в конструкции источника не было предусмотрено принудительное распределение тока по полюсу катоду, требуемое значение диффузного тока разряда достигалось кондиционированием (тренировкой) электродов в разряде. При этом длительность процесса выхода на требуемые токи разряда сильно зависела от начальных условий. Если после разгерметизации источника это могло продолжаться несколько часов, то после нахождения в вакуумных условиях время выхода на максимальные параметры разряда не превышало 10–20 мин.

Переход в форвакуумный диапазон давлений практически не влиял на высокую стабильность и повторяемость параметров импульсного электронного пучка, характерную для плазменных источников электронов в целом. Типичные осциллограммы тока разряда и тока эмиссии электронов (полного тока пучка) представлены на рис. 2. Обратим внимание на достаточно высокую эффективность извлечения электронов из плазмы (ток пучка достигает значений, близких к току разряда). Во время импульса напряжение на ускоряющем промежутке снижалось на 1–2 кВ, что было обусловлено падением напряжения на бал-

ластном резисторе, ограничивающем ток пробоя ускоряющего промежутка.

Вольт-амперные характеристики электронного источника приведены на рис. 3. На характеристиках наблюдается четко выраженный участок насыщения тока, однозначно свидетельствующий о незначительном вкладе в полный ток пучка вторичных электронов, выбитых с эмиссионной сетки обратным потоком ионов из области ускорения и транспортировки электронного пучка. Несмотря на то, что вклад вторичных электронов может существенно увеличивать ток электронного пучка [11], такой режим работы плазменного источника не представляется эффективным, поскольку вторичные электроны формируют положительную обратную связь с первичным током пучка, существование которой обуславливает возникновение неустойчивости эмиссионного тока, приводящей к пробоям ускоряющего промежутка.

Радиальные распределения плотности тока электронного пучка для различных расстояний от экстракторной сетки 7 (рис. 1) приведены на рис. 4. Можно заметить, что вблизи экстрактора пучок имеет структуру, соответствующую эмиссионной поверхности плазмы. Трансформация радиального распределения по мере удаления от экстрактора указывает, что генерируемый пучок оказывается слабо сходящимся. Причиной такого эффекта может быть искажение плоскопараллельной формы ускоряющего промежутка за счет пучковой плазмы, проникающей через экстракторную сетку в ускоряющий промежуток. При этом по мере удаления пучка от области его формирования и ускорения величина полного тока оставалась неизменной в пределах точности измерений.

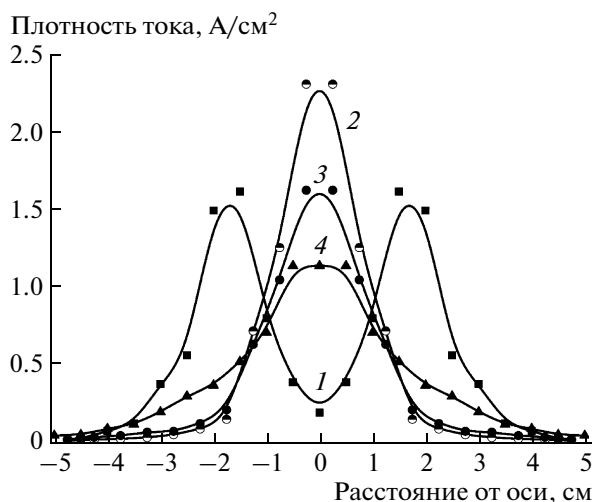


Рис. 4. Радиальные распределения плотности тока пучка электронов при ускоряющем напряжении 10 кВ. Расстояние от экстракторной сетки: 1 – 5 см, 2 – 17 см, 3 – 22 см, 4 – 33 см.

В условиях эксперимента максимальная плотность тока на оси достигалась на расстоянии 17 см от экстрактора и составляла 5 А/см². При длительности импульса тока пучка 100 мкс и ускоряющем напряжении 20 кВ максимальный ток пучка составлял 100 А, а плотность энергии пучка в импульсе достигала 10 Дж/см². Подфокусировка пучка магнитным полем обеспечивала уменьшение диаметра пучка приблизительно в 2 раза и соответствующее повышение плотности энергии в импульсе.

Полученный электронный пучок применялся для обработки поверхности алюмооксидной керамики. Факт плавления поверхности керамики свидетельствует о ее импульсном нагреве до температуры, превышающей 2000°С (температура плавления Al₂O₃ – 2050°С). Плавление керамики приводило к изменению ее поверхностных свойств. На рис. 5 в качестве примера представлен профиль микротвердости обработанной электронным пучком керамики по глубине. Вместе с тем при обработке керамики не наблюдалось ее разрушения за счет градиента температур. Последнее свидетельствует о возможности модификации поверхностных свойств непроводящих материалов без значительного нагрева их объема.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00257-а).

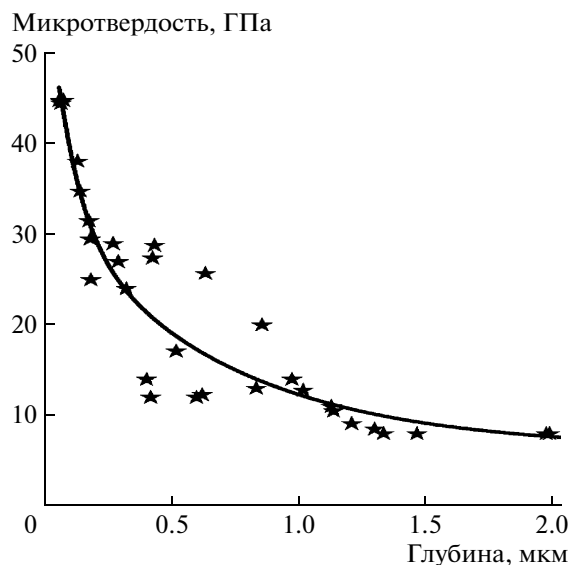


Рис. 5. Профиль микротвердости керамики, обработанной импульсным электронным пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proskurovsky D., Rotshtein V., Ozur G. и др. // Surface and Coating Technology. 2000. V. 125. P. 49.
2. Громова А.В., Колубаева Ю.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. № 9. С. 1281.
3. Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21 (2). P. 157.
4. Коваль Н.Н., Щанин П.М., Девятков В.Н. и др. // ПТЭ. 2005. № 1. С. 135.
5. Burdovitsin V.A., Oks. E.M. // Laser and Particle Beams. 2008. V. 26 (4). P. 619.
6. Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 3. С. 39.
7. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Письма в ЖТФ. 2009. № 11. С. 61.
8. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Колубаева Ю.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 10/3 (Спец. выпуск). С. 29.
9. Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М. и др. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66.
10. Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. № 10. С. 138.
11. Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Тересов А.Д. // Письма в ЖТФ. 2010. № 4. С. 23.