

04;10;12

Получение плотных электронных пучков в пушке с плазменным анодом на основе отражательного разряда

© Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский, Д.С. Назаров, К.В. Карлик

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 23 июля 1996 г.

В работе впервые предложен и реализован способ получения низкоэнергетич- ных сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом на основе отражательного разряда.

Созданные к настоящему времени источники низкоэнергетичных (10-40 кэВ) сильноточных (> 10 кА) электронных пучков [1-2] активно применяются для модификации поверхностных слоев материалов [3-5]. Электронная пушка таких источников включает в себя взрывоэмиссионный катод и плазменный анод на основе параллельно работающих дуговых источников, расположенных по окружности отверстия в анодном электроде. Возбуждение дуги осуществляется высоковольтным импульсным пробоем по поверхности диэлектрика. Генерируемая дуговыми источниками анодная плазма заполняет ускоряющий промежуток (диод) и пространство дрейфа пучка обычно за несколько микросекунд. После этого на катод подается импульс ускоряющего напряжения амплитудой до 40 кВ, что приводит к возбуждению взрывной электронной эмиссии с образованием плотной прикатодной плазмы. Ускоряющее напряжение сосредоточивается в двойном слое между катодной и анодной плазмами, в котором и формируется электронный пучок. Пройдя отверстие в анодном электроде, пучок транспортируется в плазме до коллектора. Предварительное заполнение диода и дрейфового пространства плазмой позволяет резко увеличить напряженность электрического поля на катоде (перед возбуждением взрывной эмиссии) и первичный электронный поток по сравнению с вакуумным диодом [1-2]. Для предотвращения пинчевания пучка система помещается в ведущее магнитное поле. В таких источниках получены пучки с током до 40 кА, длительностью до 5 мкс и диаметром до 8 см.

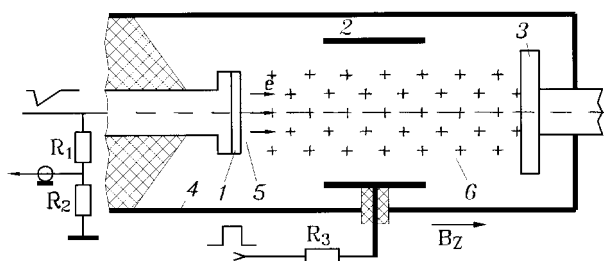


Рис. 1. Схема электронной пушки. 1 — катод, 2 — анод, 3 — коллектор, 4 — камера, 5 — катодная плазма, 6 — анодная плазма; R_1 , R_2 — делитель напряжения, R_3 — балластное сопротивление.

Однако использование эрозионной плазмы вакуумных дуг имеет ряд недостатков. Продукты эрозии (пары, плазма, микрочастицы) могут загрязнять поверхностный слой обрабатываемого материала, а микрочастицы даже вызывать его растрескивание. Стабильность параметров эрозионной плазмы хуже, чем газоразрядной, ввиду нестационарного характера эрозии электродов в дуге. Кроме того, поскольку инициирование дуги осуществляется по поверхности диэлектрика, стабильность параметров образующейся плазмы сильно зависит от состояния этой поверхности (например, от количества и состава вещества, осевшего на поверхность вследствие эрозии коллектора под действием электронного пучка). В результате нестабильность плотности энергии пучка на коллекторе может достигать 30%. При необходимости создания плазменного канала большой длины приходится устанавливать в пространстве дрейфа дополнительные источники плазмы, что снижает надежность и усложняет конструкцию электронной пушки. И наконец, энергетические затраты на создание анодной плазмы достаточно велики, поскольку общий ток в дуговых источниках сравним обычно с током в диоде [2], хотя из анодной плазмы при формировании пучка используется лишь ионная компонента тока.

Нами создана электронная пушка, в которой анодная плазма формируется с помощью импульсного отражательного (пеннинговского) разряда, имеющего характер тлеющего. Схематически электронная пушка изображена на рис. 1. Катодами пеннинговского разряда являются коллектор пучка и собственно взрывоэмиссионный катод электронной

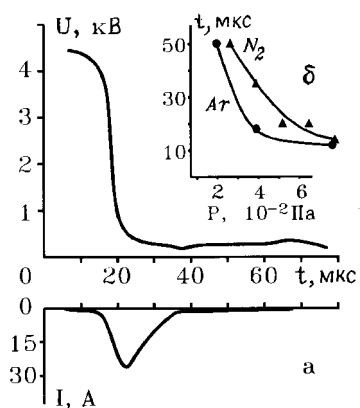


Рис. 2. а) Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке и тока разряда. б) Зависимость времени зажигания разряда от давления в разрядном промежутке для азота ($R_3 = 330\Omega$) и аргона ($R_3 = 96\Omega$).

пушки. Анодом служит полый цилиндр внутренним диаметром 9.4 см и длиной 11 см. Напуск газа (N_2 , Ar) осуществлялся стационарно с помощью прибора СНА-2. Давление газа контролировалось по ионизационному манометру ПМИ-2. Питание разряда осуществлялось от конденсатора 0.5 мкФ, заряженного до напряжения 4–5 кВ, через управляемый воздушный разрядник. Ток разряда ограничивался балластным резистором ($R_3 \simeq 96\text{--}330\Omega$) и контролировался с помощью шунта ($\sim 1.5\Omega$). Напряжение горения разряда регистрировалось активным делителем. Импульс ускоряющего напряжения формировался, как и ранее [1,2] при разряде накопительного конденсатора ($C = 3$ мкФ) через управляемый разрядник на диод. Токи диода и пучка регистрировались поясами Роговского, напряжение на диоде — резистивным делителем R_1 , R_2 . Энергия в пучке измерялась с помощью калориметра на основе медного поглотителя и терморезистора КМТ-8. Индукция внешнего магнитного поля составляла ~ 0.24 Т.

Предварительно нами были изучены некоторые характеристики разряда. На рис. 2 приведены типичные осциллограммы тока разряда и напряжения на разрядном промежутке (а), а также зависимости времени запаздывания зажигания разряда от давления газа (б). Послед-

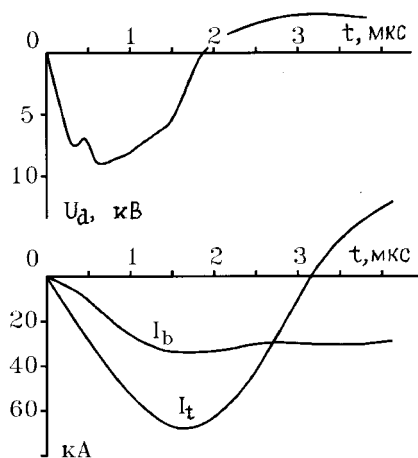


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на диоде U_d тока пучка I_b и полного тока I_t . Рабочий газ — аргон, давление $\sim 8 \cdot 10^{-2}$ Па, зарядное напряжение накопителя — 30 кВ.

ние использовались в дальнейшем для синхронизации момента подачи ускоряющего напряжения на катод с горением разряда. Статистический разброс времен запаздывания зажигания разряда не превышал $\pm 5\%$ для давлений $> 4 \cdot 10^{-2}$ Па. Полагая степень ионизации газа в разряде $\sim 50\%$ [6], получим, что при давлении $8 \cdot 10^{-2}$ Па концентрация плазмы достигает 10^{13} см^{-3} .

Используя результаты расчетов [7], мы оценили напряженность электрического поля на катоде E_c перед возбуждением взрывной эмиссии на нем. При амплитуде ускоряющего напряжения 10 кВ величина E_c составляет ~ 80 кВ/см. Тем не менее, несмотря на достаточно умеренное значение E_c , эмиссионные свойства катодов из графита и пучка медных проволок оказались удовлетворительными, судя по автографам на фольге из нержавеющей стали.

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы напряжения на диоде, тока в диоде и тока пучка на коллектор. Видно, что ток на коллекторе заметно меньше тока в диоде. Это мы связываем с утечками тока в результате зажигания паразитного объемного разряда в области катододержателя и пробоя по изолятору диода. Указанный недостаток

может быть устранен путем перехода к импульсному методу подачи газа. К настоящему времени при запасаемой энергии ~ 1.3 кДж в пучке получена энергия ~ 200 Дж, что составляет $\sim 15\%$ от запасаемой. При диаметре 8 см след, оставленный пучком на фольге из нержавеющей стали, представлял собой равномерно оплавленную поверхность.

Таким образом, нами предложен и реализован способ получения низкоэнергетичных сильнооточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом на основе отражательного разряда. Использование аргона в качестве рабочего газа позволяет улучшить чистоту поверхностной обработки материалов.

Список литературы

- [1] *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 5. С. 413–416.
- [2] *Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Изв. вузов. Физика. 1994. № 3. С. 100–114.
- [3] *Итин В.И., Кашинская И.С., Лыков С.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 5. С. 89–93.
- [4] *Иванов Ю.Ф., Итин В.И., Лыков С.В.* и др. // ФММ. 1993. Т. 75. № 95. С. 103–112.
- [5] *Vatrakov A.V., Markov A.B., Ozur G.E.* et al. // IEEE Trans. Diel. and Electr. Insul. 1995. N 2. P. 237–242.
- [6] *Абрашитов Ю.И., Койдан В.С., Конохов В.В.* и др. // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. В. 4. С. 1324–1337.
- [7] *Крейндель М.Ю., Литвинов Е.А., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Физика плазмы. 1991. Т. 17. № 12. С. 1425–1432.