

- [6] Shaw R., Hill D., Sandfort R., Moody J. J. Appl. Phys., 1973, v. 44, N 5, p. 2346—2349.
 [7] Thiele A. Bell. Syst. Tech. J., 1969, v. 48, N 10, p. 3287—3385.
 [8] Иевенко Л. А., Кожухарь А. Ю., Моцалков А. В. Тез. докл. VI Всес. научно-техн. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры». Л., 1983, с. 197.

Научно-производственное объединение
 «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
 Ленинград

Поступило в Редакцию
 7 января 1987 г.

УДК 533.525

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

СИЛЬНОТОЧНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД В ПЛАЗМЕННОМ ЭМИТТЕРЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Е. М. Окс, А. А. Чагин

В настоящее время релятивистские электронные пучки для СВЧ электроники генерируются в системах с термоэмиссионными [1] и взрывоэмиссионными [2] катодами. Переход в микросекундный диапазон длительностей импульса электронного тока делает целесообразным использование для этих целей эмиттеров электронов, основанных на отборе частиц из плазмы газового разряда с холодным катодом [3]. Для генерации трубчатого пучка в плазменном эмиттере электронов предпочтительнее применение разряда, возбуждаемого в кольцевом зазоре. Поскольку в СВЧ приборах электронный пучок транспортируется в продольном магнитном поле, по-видимому, целесообразно использование этого поля и в разрядном промежутке. Этим двум условиям в полной мере соответствует тлеющий разряд в скрещенных $E \times H$ полях магнетронного типа в коаксиальной цилиндрической геометрии [4]. Для получения сильноточного пучка в плазменном эмиттере электронов необходимо зажигание разряда по крайней мере при тех же значениях тока. Однако в рабочей области давлений плазменного эмиттера сильноточный магнетронный разряд зажигался только в системе плоских электродов [5].

Целью настоящей работы является реализация сильноточного магнетрона цилиндрической геометрии в плазменном эмиттере электронов и исследование его эмиссионных свойств.

В устройстве (рис. 1) импульсный разряд зажигался между коаксиальными цилиндрическими электродами. В эмиссионном электроде 4 выполнена соосная с разрядным промежутком кольцевая щель. В ряде случаев щель перекрывалась металлической сеткой 5 с размерами ячейки 0.5×0.5 мм и геометрической прозрачностью 0.6. Электрод 4 соединялся с катодом или с анодом. Отбор электронов осуществлялся на коллектор 6. Вследствие малой проводимости кольцевой щели при используемых расходах рабочего газа (аргона) его давление в разрядной камере достигало 0.1 Па, тогда как в ускоряющем промежутке оно не превышало 0.02 Па. Магнитное поле в разрядной камере и ускоряющем промежутке создавалось разрядом емкости через катушки 7 и 8 соответственно. Длительность тока в катушках (3 мс) намного превышала время горения разряда τ_n , причем разряд инициировался с задержкой, превышающей фронт импульса $V(t)$. Как видно из рис. 1, разряд возбуждался в электродной системе типа «обращенный магнетрон» (анод внутри катода). В этом случае значительно повышается эффективность взаимодействия эмиттированных катодом электронов с магнит-

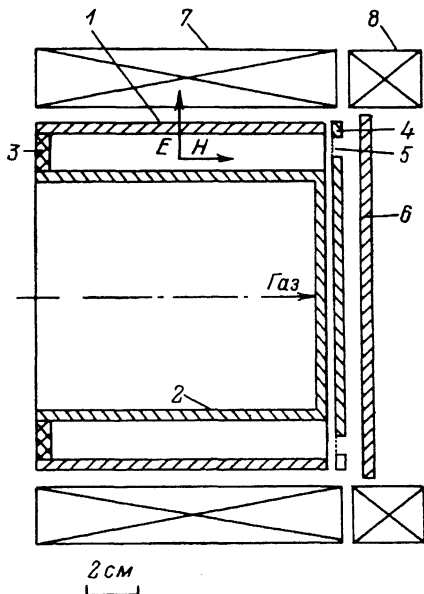


Рис. 1. Плазменный эмиттер электронов.

1 — катод; 2 — анод; 3 — диэлектрический торец; 4 — торцевой эмиссионный электрод; 5 — сетка; 6 — коллектор; 7, 8 — катушки.

ним полом [6]. Действительно, в рабочей области плазменного эмиттера электронов для инициирования разряда в «обращенном магнетроне» было достаточно напряжения зажигания $U_3 = 1.5 \div 2.0$ кВ и магнитного поля $B \sim 0.01$ Т, тогда как в прямой системе разряд не возникал и при напряжениях на промежутке $U = 10 \div 15$ кВ.

В условиях эксперимента был реализован магнетронный разряд с током $I_p = 1$ кА при $\tau_a = 10$ мкс. Во всех случаях напряжение горения разряда U_r превышало 400 В и линейно зависело от его тока (рис. 2). Уменьшение давления газа приводило как к повышению значения U_r , так и к росту крутизны характеристики $U_r(I_p)$. Осциллограммы импульсов разрядного тока и напряжения горения представлены на рис. 3, а, б. При понижении давления до $p = 6 \cdot 10^{-2}$ Па наблюдается скачкообразный переход разряда в высоковольтный режим горения с током в несколько ампер и напряжением $U_r = 1.5 \div 2.0$ кВ.

Величина наибольшего тока магнетронного разряда I_{pm} ограничена возникновением катодного пятна и переходом разряда в дуговой режим. При этом напряжение горения уменьшается до $U_r \sim 100$ В, ток разряда увеличивается и наблюдается ярко светящееся пятно

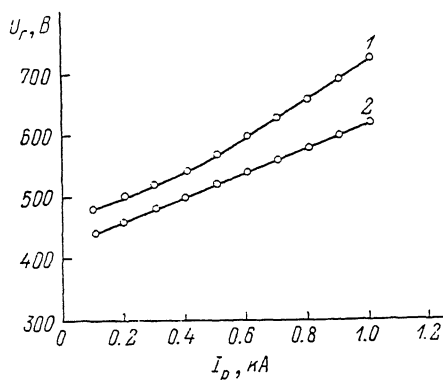


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда при $B = 0.06$ Т. $p = 0.033$ (1) и 0.053 Па (2).

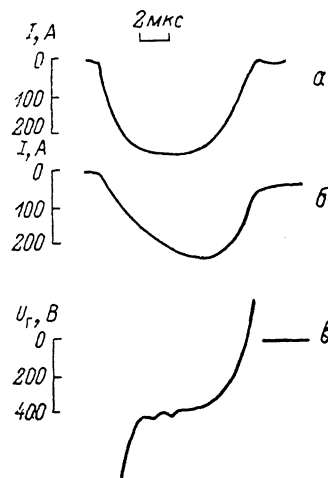


Рис. 3. Осциллограммы импульсов: ток разряда (а), ток эмиссии (б), напряжение горения разряда (в).

на поверхности катода. Значения I_{pm} во многом определяются состоянием поверхности катода, его площадью, а также длительностью импульса разрядного тока. Так, после вскрытия и переборки системы переход в дугу происходил уже при токах $I_{pm} = 200$ А ($\tau_a = 10$ мкс). Тренировка разряда на частоте 10 с $^{-1}$ в течение 20 мин позволила повысить ток диффузного разряда до 1 кА. Увеличение площади катода с 175 до 500 см 2 приводило к пропорциональному росту I_{pm} . При увеличении длительности импульса разрядного тока до 60 мкс значения I_{pm} уменьшались с 1 кА до 200 А. Следует отметить, что результаты этих экспериментов не противоречат известной модели перехода тлеющего разряда в дугу, предполагающей зарядку и последующий пробой диэлектрических пленок и включений на поверхности катода при их бомбардировке ионами из плазмы [7]. Повышение предельного тока используемого разряда может быть достигнуто увеличением площади поверхности катода, принудительным распределением тока по его поверхности, а также использованием особо чистых и тугоплавких материалов.

Реализация сильноточного магнетронного разряда в электродной системе плазменного эмиттера электронов является необходимым, но не достаточным условием его функционирования. Для этого следует модифицировать разряд с целью создания условий выхода электронов из плазмы через эмиссионный электрод. В общем случае значение эффективности извлечения электронов из плазмы (отношение эмиссионного тока к разрядному) может быть оценено из следующего соотношения:

$$\alpha = (I_e/I_p) = (j_{ex}/j_a) (S_e/S_a) \exp(-e\varphi_0/kT_e), \quad (1)$$

где I_e — ток эмиссии; j_a — плотность анодного тока; j_{ex} — плотность хаотического тока электронов в плазме; $e\varphi_0$ — потенциальный барьер для выходящих в ускоряющий промежуток электронов; T_e — температура электронов; S_e , S_a — площади эмиссионной поверхности

и анода разрядной камеры: e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана. Из (1) следует, что для создания условий эффективной эмиссии необходимо стремиться к увеличению отношений j_{ex}/j_a , S_b/S_a и к снижению $e\varphi_0$ (в предельном случае $e\varphi_0 \rightarrow 0$ и электроны эмиттируются с открытой плазменной поверхности).

В том случае, когда торцевой электрод 4 находится под потенциалом катода, эмиссия электронов препятствует катодное падение потенциала в слое пространственного заряда, отделяющего плазму от ускоряющего промежутка. Поэтому при использовании щели шириной $r=8$ мм, перекрытой сеткой, увеличение ускоряющего поля до 30 кВ/см не приводило к заметной эмиссии электронов. Применение торцевого электрода без перекрытия щели сеткой ($r=2$ мм) позволило в результате снижения потенциального барьера из-за провисания ускоряющего поля достигнуть значения $\alpha=0.3$. Дальнейшее повышение α возможно либо при увеличении S_b , либо в результате повышения давления в разрядной камере, приводящего к возрастанию j_{ex} . Однако и в том и другом случаях это приводило к увеличению давления в ускоряющем промежутке, что обуславливало снижение его электрической прочности.

При соединении электрода 4 с анодом величина потенциального барьера для электронов значительно снижается. Однако в этом случае не удается обеспечить устойчивого зажигания и горения разряда. По-видимому, это обусловлено снижением эффективности осцилляции электронов в разрядном промежутке, поскольку создается возможность их беспрепятственного ухода вдоль магнитного поля на торцевой электрод 4. Как показали эксперименты, создание слабой неоднородности магнитного поля в области этого электрода позволяет, с одной стороны, относительно легко зажигать сильнотоочный разряд в рабочей области давлений плазменного эмиттера электронов практически с такими же характеристиками, что и в случае соединения электрода с катодом, а с другой стороны, получать ток эмиссии электронов с $\alpha \sim 1$.

Для измерения азимутального распределения плотности тока по сечению пучка коллектор 6 был выполнен из восьми изолированных секторов. Полученная в эксперименте высокая однородность эмиссионного тока (не хуже $\pm 5\%$) обусловлена соответствующей азимутальной однородностью параметров плазмы магнетронного разряда.

В случае эмиссии электронов через соединенный с анодом торцевой электрод ($r=8$ мм), перекрытый сеткой, при $\tau_n=10$ мкс и $S_b=20$ см² получен ток электронов на коллектор 1 кА. Для формирования сильнотоочного релятивистского трубчатого пучка в системе с таким эмиттером электронов необходимо создание соответствующих условий для ускорения и транспортировки пучка. Однако даже в случае использования плоского коллектора, расположенного на расстоянии 1 см от торцевого электрода, удавалось при ускоряющем напряжении 10 кВ и $\tau_n=10$ мкс получать ток электронов 250 А.

Смена полярности потенциала коллектора позволяет из плазмы магнетронного разряда эффективно извлекать и ионы. При $I_p=400$ А, $\tau_n=10$ мкс величина ионного тока при отборе через соединенный с катодом торцевой электрод ($r=2$ мм, сетки нет) составляла 10 А.

Таким образом, применение магнетронного разряда в плазменном эмиттере электронов позволяет формировать трубчатые пучки с высокой плотностью тока. Достоинствами эмиттера такого типа являются простота конструкции, высокая однородность параметров и, что наиболее важно, возможность получения трубчатого пучка практически любого диаметра.

Литература

- [1] Балкин В. Е., Кузнецов Г. И., Хавин Н. Г. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Материалы III Всес. семинара. Горький, 1983, в. 3, с. 204—218.
- [2] Бугаев С. П., Канаев В. И., Климов А. И. и др. ДАН СССР, 1984, т. 276, № 5, с. 1102—1104.
- [3] Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [4] Кервалишвили Н. А., Жаринов А. В. ЖТФ, 1965, т. 35, № 12, с. 2194—2201.
- [5] Тюрюканов П. М., Фетисов И. К., Никольский А. Д. ЖТФ, 1981, т. 51, № 10, с. 2028—2031.
- [6] Крестов В. А., Крижановский В. И., Кузьмичев А. И. и др. Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, 1979, в. 2 (623), с. 90.
- [7] Lutz M. A. IEE Trans. Plasma Sci., 1974, v. 2, N 1, p. 1—24.

Институт сильнотоочной электроники СО АН СССР
Томск

Поступило в Редакцию
29 января 1987 г.
В окончательной редакции
14 апреля 1987 г.