

04;10
©1995

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ В АКСИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ПРИАНОДНОМ ЕН СЛОЕ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.В.Дудин, А.В.Зыков, А.В.Ушаков

Структура и динамика прианодного электронного слоя газового разряда в скрещенных электрическом E и магнитном H полях в вакуумном режиме ($n_e \gg n_i$, где n_e — плотность электронов, n_i — плотность ионов) подробно изучена в аксиально-симметричных системах с однородным магнитным полем типа ячейки Пеннинга и ионного магнетрона (см. работы [1,2] и цитируемую там литературу), для которых теоретические модели EH слоя в рамках магнитной гидродинамики (МГД) в предположении бесконечной длины разрядной области вдоль H и столкновительной подвижности электронов дают хорошее согласие с экспериментом.

Для аксиально-неоднородных систем с радиальным магнитным и аксиальным электрическим полями типа ускорителей с азимутальным дрейфом электронов (УАД) детально изучен плазменный режим разряда ($n_e \approx n_i$) [1]. Как было установлено, в устройствах с диэлектрическим каналом важную роль для движения электронов и соответственно структуры EH слоя играют приповерхностные процессы (в частности, пристеночная проводимость), а МГД приближение некорректно.

В настоящей работе, в продолжение исследований [3], показано, что в вакуумном режиме прианодного EH слоя в аксиально-неоднородном разряде с холодными катодами также наблюдаются аномальные явления в динамике электронов, которые нельзя объяснить в рамках МГД.

Эксперименты проводились в устройстве, геометрия электродов которого (рис. 1, а) близка к конструкции разрядного промежутка серийного технологического источника ионов ИИ4-015 "Радикал" [4]. Устройство монтировалось на рабочей камере высоковакуумной системы с эффективной скоростью откачки 300 л/с. Напуск рабочего газа (аргон, воздух) осуществлялся в разрядный промежуток, при этом давление P , измерялось в рабочей камере. Раздельно измерялись ток электронов на анод I_a , токи на внешний I_{k1} и внутренний I_{k2} катоды, ток ионов на мишень I_m .

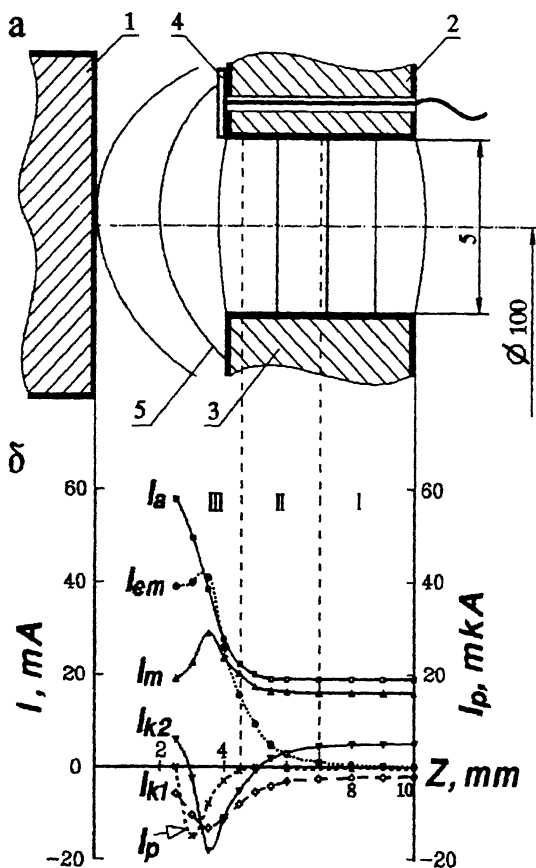


Рис. 1. а — схематическое изображение разрядного промежутка ионного источника: 1 — анод, 2 — внешний катод, 3 — внутренний катод, 4 — плоский зонд, 5 — силовая линия магнитного поля.

б — распределение токов на элементы системы в зависимости от расстояния до анода (Z) при внешней инжекции электронов ($V_a = 1.5$ кВ, $H = 1.7$ кЭ и $P = 4 \cdot 10^{-4}$ Тор): I_{em} — ток эмиссии, I_a — ток на анод, I_m — ток на мишень, I_{k1} — ток на внешний катод, I_{k2} — ток на внутренний катод, I_p — ток на плоский зонд.

На наш взгляд, принципиальными особенностями данного устройства по сравнению с ячейкой Пеннинга и ионным магнетроном являются арочная конфигурация магнитных силовых линий 5 (рис. 1, а) в прианодной области и то, что размер разрядной области вдоль H близок к расстоянию между анодом и катодами 2, 3. В условиях, когда до 90% ионов уходит на мишень, представляет интерес также вопрос об источнике и величине тока затравочных электро-

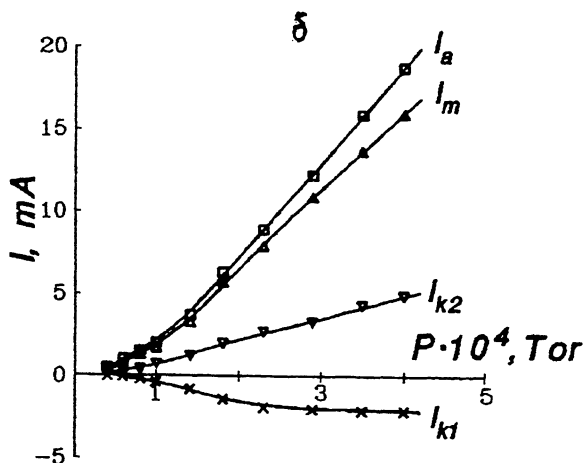
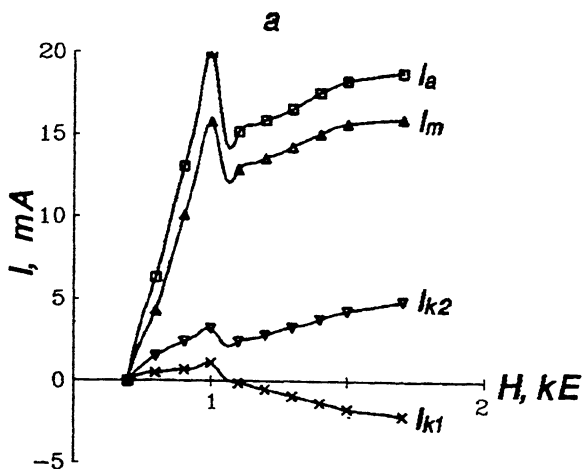


Рис. 2. Зависимости токов на электроды ионного источника от магнитного поля (а) при $p = 4 \cdot 10^{-4}$ Тор и от давления (б) при $H = 1.7$ кЭ (для обоих случаев $V_a = 1.5$ кВ): I_{em} — ток эмиссии, I_a — ток на анод, I_m — ток на мишень, I_{k1} — ток на внешний катод, I_{k2} — ток на внутренний катод, I_p — ток на плоский зонд.

нов, необходимых для развития электронных лавин в анодном слое, так как катодами разряда наряду с электродами 2, 3 являются мишень и стенки рабочей камеры [5].

Детальное изучение зависимостей токов на электроды разряда от анодного напряжения V_a , H , P позволило установить, что в данном устройстве при $H > 0.7$ кЭ, $V_a = 0.6 - 2$ кВ, $P = 10^{-5} - 10^{-3}$ Тор имеет место значительная асимметрия токов на электроды 2, 3. На внутреннюю

часть катода-магнитопровода 3 преобладает ионный ток $I_{k2} \approx (0.1 - 0.2)I_m$, на внешнюю — электронный (рис. 2, а, б).

Явление ухода электронов на катоды разряда в скрещенных EH полях известно. Однако согласно приведенным данным (см., например, [2]) сброс электронов на катоды носит периодический характер и определяется развитием неустойчивостей различных типов. В наших условиях, как показало осциллографирование токов на катоды, поток электронов имеет стационарный характер и, хотя в некоторых режимах наблюдаются ВЧ и НЧ колебания потенциала в слое, ни их амплитуда (~ 0.1 В), ни пороги возбуждения не коррелируют с величиной тока электронов.

Для исследования локальных характеристик EH слоя использовалась система электрических зондов: стационарный направленный зонд 4 (рис. 1, а), расположенный на поверхности внешнего катода, одиночный зонд под плавающим потенциалом для регистрации колебаний и возмущений потенциала слоя и миниатюрный термозонд (ТЗ) прямого накала, работающий в свободном режиме, который можно было перемещать по азимуту и вдоль оси. Измерения ТЗ проводились в двух точках его вольт-амперной характеристики: в режиме плавающего потенциала — для измерений распределения потенциала φ_{pl} в слое и в режиме изменения тока эмиссии I_{em} при потенциале зонда $\varphi_p = +5$ В относительно катодов (чтобы предотвратить непосредственный уход термоэлектронов на катоды).

Типичные результаты измерений распределения I_{em} на электроды разрядного устройства при различных расстояниях Z между ТЗ и поверхностью анода представлены на рис. 1, б. Анализируя полученные графики для различных V_a и H , можно выделить три характерные области в прианодном слое.

1) *Квазинейтральная область* — потенциал в середине катодной щели $\varphi_{pl} = 20-40$ В, электрическое поле $E_Z \leq 10$ В/см, $I_{em} < 0.1$ мА.

2) *Предслой* — φ_{pl} возрастает до 200–400 В; $E_Z = 100-200$ В/см; $I_{em} = 10-30$ мА, но почти все термоэлектроны уходят на катоды 2, 3. При этом I_{em} растет с уменьшением P и суммарный электронный ток на катоды может превышать I_a .

3) *Соответственно прианодный слой*. В этой области сосредоточено основное падение потенциала, электрическое поле сильно неоднородно и, по оценкам, достигает 3 кВ/см. I_{em} возрастает до предельной величины ≈ 100 мА и происходит перераспределение I_{em} в сторону преимущественного ухода термоэлектронов на анод. В этой области дополнительная инжекция электронов с ТЗ приводит к усилению

ионизации рабочего газа, о чем свидетельствует почти двукратный рост тока ионов на мишень I_m (рис. 1, б). Отметим, что при уменьшении $Z < 2.5$ мм (для $V_a = 1.5$ кВ, $H = 1.5$ кЭ) ТЗ сильно возмущает разряд и измерения становятся некорректными.

Для выяснения причины возникновения значительных электронных токов на катод (несмотря на потенциальный барьер для термоэлектронов) были проведены локальные измерения плоским зондом ϕ . Как следует из рис. 1, б, термоэлектроны достигают зонда только когда ТЗ расположен на той же магнитной поверхности, т. е. термоэлектроны уходят на катод прежде, чем успевают сместиться к аноду. Энергоанализ методом задерживающего потенциала попадающих на зонд электронов в различных режимах разряда показал, что их энергетический спектр близок к максвелловскому с температурой $T_e = 30-40$ эВ, а напряжение запираения электронного тока на зонд составляет — (30–100) В.

Основываясь на приведенных экспериментальных результатах, можно выделить следующие особенности динамики электронов в данном разряде.

Основную роль в поддержании разряда и развитии электронных лавин играют электроны, инжектируемые (вследствие ион-электронной либо термоэлектронной эмиссии) в область прианодного EH слоя с $E_Z > 200$ В/см. Косвенным свидетельством этого является также то, что при $Z > 4$ мм перекрытие азимутального дрейфа электронов держателем ТЗ существенно не возмущает разряд.

В области предслоя наблюдается интенсивный уход электронов на катод устройства в результате формирования высокоэнергетичного “хвоста” функции распределения электронов по энергиям ($\Phi R \dot{E}$). Полученные данные и проведенные оценки дают основание предположить, что причиной возникновения быстрых электронов являются электрон-электронные ($e-e$) столкновения. В пользу предположения об определяющей роли $e-e$ столкновений свидетельствует также увеличение электронного тока на катод с ростом H (n_e , как правило, увеличивается с ростом H [1]). На указанный эффект слабо влияют электрон-атомные соударения, так как изменение давления рабочего газа существенно не изменяет распределения тока эмиссии. Примечателен также факт, что электронный ток с ТЗ на катод не исчезает даже при потенциале ТЗ+(50–100) В. В рамках предложенной гипотезы вынос электронов с ТЗ на катод аналогичен описанному в [6] механизму ухода электронов из ионно-пучковой плазмы: термоэлектроны, поступая в слой, локально повышают n_e , а значит, и частоту $e-e$ столкновений. В результате этого увеличивается скорость ухода

электронов на катод через "хвост" ФРЭЭ до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между эмиссией электронов и их уходом.

Следует отметить, что в слое при $E_Z > 200$ В/см в отсутствие интенсивных колебаний наблюдается аномально большая подвижность инжектируемых термоэлектронов поперек магнитного поля. Возможно, в данном устройстве, как и в ускорительном канале, определяющую роль в токопереносе термоэлектронов на анод играют прикатодные процессы.

Для окончательных выводов о механизме обнаруженных особенностей динамики электронов необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Список литературы

- [1] *Ионные инжекторы и плазменные ускорители. Сб. научных статей / Под ред. А.И. Морозова, Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990.*
- [2] *Redhead P.A. // Vacuum. 1988. V. 38. N 8-10. P. 901-906.*
- [3] *Dudin S.V., Zykov A.V., Ushakov A.V. // IEEE International Conference on Plasma Science ICOPS'94. Conference Record. Abstracts. Santa Fe, USA. 6-8 June 1994. P. 175.*
- [4] *Маишев Ю.П. // Электронная промышленность. 1990. В. 5. С. 15-18.*
- [5] *Зыков А.В., Маишев Ю.П., Фареник В.И. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по физике газового разряда. 1986. Ч. II. С. 221-223.*
- [6] *Дудин С.В., Зыков А.В., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 6. С. 22-26.*

Харьковский государственный
университет;
Научный физико-технологический
центр Украины
Харьков

Поступило в Редакцию
23 августа 1994 г.