

ПРЯМОПРОЛЕТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

А.В. Хитько, канд. техн. наук,

Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина

Постоянное расширение круга задач, решаемых с помощью летательных аппаратов, вызывает необходимость совершенствования существующих и разработки принципиально новых двигательных установок малой тяги. Для данного периода освоения космоса характерными являются интенсивная разработка и использование микро- и наноспутников с массой от 20 до 100 кг. Их эксплуатация требует решения задач по стабилизации и коррекции орбиты КА с помощью электроракетных двигателей, способных более эффективно использовать запас рабочего тела.

Разработка ЭРДУ для микро- и наноспутников во многом определяется успехами в разработке эффективного источника электронов на токи $5 \cdot 10^{-3} \dots 0,5$ А [1].

Анализ работ [2, 3, 6, 7] в области проектирования источников электронов ЭРДУ показал, что они разрабатывались на токи 0,5...50 А и неработоспособны в диапазоне токов микроЭРДУ.

В этой связи существует проблема разработки теоретических основ и методологии проектирования источников электронов для микроЭРДУ различных типов мощностью до 100 Вт.

Как было показано ранее [4], введение в полость классического расходного полого катода вспомогательного внутреннего разряда позволило расширить область рабочих давлений в полости сторону их уменьшения и соответственно снизить уровень тока эмиссии, при котором возможна устойчивая работа. Возникла задача рассмотрения физических процессов, которые протекают в полости плазменного источника электронов, и выполнения расчетов параметров внутрикатодной плазмы. Их знание позволит обеспечить условие самоподдержания разряда и определить ос-

новные характеристики катода, включая эмиссионные.

Задача данной статьи заключается в рассмотрении физических процессов при прямопролетном режиме работы катода, определении граничных величин давления в полости, при которых он реализуется, разработке рекомендаций по организации рабочего режима.

Экспериментально получено, что вспомогательный внутренний разряд устойчиво горит в полости начиная с давлений 10^{-3} Торр [4]. При давлении 1 Торр исчезает влияние внутреннего разряда на эмиссионный ток катода. Поэтому рабочим, для катода со вспомогательным разрядом, следует считать диапазон $10^{-3} \dots 1$ Торр.

Рассмотрим физические процессы, которые происходят в полости катода с внутренним разрядом. Катод со вспомогательной ступенью представляет собой диод, в котором один электрод - эмиттер электронов, второй - коллектор электронов. В межэлектродном промежутке создается электрическое поле, ускоряющее электроны. Отрицательный заряд электронов компенсируется положительно заряженными ионами, образующимися благодаря ионизации рабочего тела. В нашем случае используется цезий, обладающий наименьшим потенциалом ионизации (3,89 эВ).

Полный разрядный ток представляет сумму электронного тока поверхностной эмиссии и тока возвращающихся на поверхность катода ионов, образующихся в объеме. Основным механизмом эмиссии является термоэмиссия. Пренебрежимо малы токи автоэмиссии, фотоэмиссии и вторичной эмиссии с поверхности под действием ионов и возбужденных атомов. Подробно вопрос о механизме эмиссии и о вели-

чине эффективной работы выхода в цезиевой плазме внутреннего разряда рассмотрен ранее в работе [5]. При низких давлениях ($10^{-3} \dots 10^{-2}$ Торр) в полости концентрация плазмы невелика и доля ионного тока в разрядном незначительна (до 10%).

Режим горения разряда является дуговым, т.к. в объеме происходит значительная генерация ионов, обеспечивающая компенсацию пространственного заряда электронов и прохождение токов высокой плотности (~ 10 А/см²). Электроды внутреннего разряда плоские и их поперечные размеры значительно превосходят величину межэлектродного расстояния, которое составляет $(2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ м. Давление в объеме постоянно и определяется давлением насыщения паров цезия в зоне испарения.

При низких давлениях в полости, у порога поджига внутреннего разряда (10^{-3} Торр) длина свободного пробега электронов больше межэлектродного расстояния ($L_{ie} > L_p$). Длина дебаевского экранирования мала по сравнению с межэлектродным расстоянием. В зазоре образуется плазма, которая отделена от электродов потенциальными барьерами. Заряженные частицы в плазме при этих давлениях не испытывают столкновений. Плазма называется кнудсеновской. Поскольку тепловая скорость ионов мала по сравнению с тепловой скоростью электронов, имеется тенденция к накоплению образовавшихся ионов, увеличению концентрации плазмы и потенциала в межэлектродном зазоре.

Теория кнудсеновской дуги разработана не столь хорошо, как теория дуги в плотной плазме, поэтому она основывается на априорных допущениях, базирующихся на анализе экспериментальных данных.

В первую очередь определим граничные величины давления в полости, при которых реализуется кнудсеновский режим разряда. Поступление мощности в зону ионообразования происходит преимущественно вследствие тока первичных электронов с катода. Быстрые первичные электроны могут переходить в медленные плазменные путем ионизации атомов рабочего тела и путем термолизации при кулоновском взаимодействии с медленными плазменными электронами.

Эффективная средняя длина свободного пробега первичных электронов до ионизации атомов рабочего тела может быть определена из выражения

$$L_{ie} = 1 / N_a G_i ; \quad (1)$$

а эффективное время ионизации соответственно

$$T_i = 1 / N_a \langle G_i V_e \rangle \quad (2)$$

где: N_a - концентрация нейтральных атомов;

G_i - эффективное сечение ионизации;

V_e - скорость первичных электронов.

Концентрацию нейтральных частиц оценивали по параметрам насыщенного пара в зоне испарения. Потери полного давления при движении пара от зоны испарения в полость катода пренебрегали из-за их малости. Расчеты показали, что концентрация частиц в разрядном промежутке для диапазона давлений ($10^{-2} \dots 1$) Торр лежит в пределах $(10^{20} \dots 10^{22})$ м⁻³.

Скорость первичных электронов оценивали, исходя из величины прикатодного падения потенциала, которое принимали равным потенциалу ионизации рабочего тела.

$$V_e = (e U_i / 2 M_e)^{1/2}. \quad (3)$$

Сечение ионизации считали не зависящим от энергии электронов. Принимали во внимание только прямую ионизацию и не рассматривали ступенчатую. При этом сечение для цезия брали равным - 10^{-18} м² [5].

Оценка эффективного времени прямой ионизации для диапазона давлений в полости ($10^{-2} \dots 10^{-1}$) Торр показала, что

$$T_i \sim 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ с.}$$

Длина и время максвеллизации электронов на кулоновских столкновениях с плазменными электронами оценивалась, как

$$L_t = E_0 / 2,5 \cdot 10^{-13} N_e; \quad (4)$$

$$T_t = E_0^{3/2} \cdot 10^{10} / N_e. \quad (5)$$

Для диапазона давлений в полости ($10^{-2} \dots 10^{-1}$) Торр, при условии полной ионизации атомов в полости катода время термолизации составило:

$$T_i - 10^{-7} \dots 8 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Полученные времена процессов ионизации и термализации сравнивали с временем прямого (без столкновений) пролета быстрых электронов через разрядный промежуток от катода к аноду. Для $L_p - (2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ м и температур электронов $T_e - (1,4 \dots 4)$ эВ получим

$$T_{пр} - (1 \dots 5) \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Анализ показал, что пролетное время быстрых электронов меньше времени термализации и ионизации. Поэтому в кнудсеновской дуге плазменного катода электроны, эмиттированные катодом вспомогательного разряда, ускоренные на прикатодном падении потенциала, образуют пучок, который может почти без рассеяния проходить межэлектродное расстояние.

При низких концентрациях плазмы ($N_a < 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $P_k < 10^{-2}$ Торр) и соответствующих токах эмиссии ($j_e < 5 \text{ А/см}^2$) максвеллизированные электроны не играют большой роли в общем электронном токе, который переносится пучком быстрых электронов. Однако с ростом концентрации заряженных частиц и плотности тока катодный пучок успевает расплываться. В этом случае в значительной части разрядного промежутка вспомогательного разряда перенос тока осуществляется максвеллизированными электронами. В кнудсеновской дуге передача энергии нейтральным атомам не существенна и основным механизмом релаксации катодного пучка являются парные кулоновские столкновения. Граничным для прямопролетного режима разряда можно считать давление в полости катода 10^{-2} Торр, выше которого длина максвеллизации электронов становится меньше величины межэлектродного зазора.

Рекомендациями по организации работы плазменного катода в прямопролетном режиме, при давлениях ниже 10^{-2} Торр может служить строго определенный выбор полярности электродов вспомогательного разряда. Внутренний электрод должен быть катодом, а внешний электрод, в котором находится экстракционное отверстие, - анодом. При этом эмиттированные

электроны в виде пучка, пройдя межэлектродный зазор через экстракционное отверстие, попадут во внешний объем и обеспечат эмиссионный ток плазменного катода.

Вывод. При давлениях ($10^{-3} \dots 10^{-2}$) Торр в полости плазменного катода со вспомогательным разрядом реализуется прямопролетный (кнудсеновский) режим разряда. Ток переносится пучком быстрых электронов. Необходим строго определенный выбор полярности электродов.

Дальнейшие исследования прямопролетного режима необходимо направить на изучение механизма ионизации в полости катода и характера распределения напряжения вспомогательного разряда.

Литература

1. Small SPT unit development and test / Arkhipov B. et al. // 3-rd International Conference Spacecraft Propulsion. Cannes, France 10-13 Oct. 2000.
2. Extending the range of SPT Operation / Arkhipov B et al. // AIAA 96.- P. 2708.
3. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей.- М.: Атомиздат, 1978.- 328 с.
4. Хитько А.В. Двухступенчатый полый катод // Современные проблемы ДЛА: Тр. 3 Всесоюз. науч.-техн. конф.- М.: МАИ, 1986.- 620 с.
5. Термозмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса.- М.: Наука, 1973.- 480 с.
6. Лоян А.В., Рыбаков А.А. Разработка электродугового двигателя малой мощности для коррекции и ориентации спутника // Авиационно-космическая техника и технология. Тр. ХАИ.- Харьков: ХАИ, 1998.- Вып. 5.- С. 225-228.
7. Штулингер Э. Ионные двигатели для космических полетов.- М.: Мир, 1966.- 190 с.

Поступила в редакцию 14.05.03

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент каф. Двигателестроения Н.В. Масляный, ДНУ, г. Днепропетровск; канд. техн. наук, директор ООО «Экотеп» Ю.К. Гонтарев, ООО «Экотеп», г. Днепропетровск.