

УДК 629.7.087 : 538.4 : 001.2

А.В. ХИТЬКО*Днепропетровский национальный университет, Украина*

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТУПЕНИ ПОЛОГО ПЛАЗМЕННОГО КАТОДА

Приведено обоснование необходимости организации дополнительной ступени полого плазменного катода для ЭРД малой мощности.

электроракетный двигатель, полый расходный цезиевый катод, работа выхода, внутренний вспомогательный разряд, ионизация, эффект полого катода

Введение

Значительно, до 10...15 лет, увеличилось время функционирования спутников связи, и уменьшилась масса полезной нагрузки за счет миниатюризации электронных приборов. В свою очередь, применение электроракетных двигателей (ЭРД) для задач ориентации и коррекции космических аппаратов (КА) [1] позволило существенно снизить запас рабочего тела, в сравнении с химическими реактивными двигателями.

1. Формулирование проблемы

Масса современных спутников лежит в пределах от 100 до 500 кг с потреблением мощности не превышающем нескольких сотен ватт [2]. Основной проблемой создания ЭРД малой мощности является работа с существенно меньшим (50 – 200 Вт) уровнем энергопотребления, чем у существующих образцов (0,5 – 50 кВт) [1, 3] при сохранении высокой эффективности. Очевидно, что эффективность работы двигательного блока существенно зависит от организации работы катода-нейтрализатора. Создание маломощного эффективного катода представляет проблему и требует изменения традиционной схемы построения эмитера.

1.1. Общие соотношения. Диапазон требуемых токов катода-нейтрализатора маломощных ЭРД лежит в пределах от 0,2 до 1 А. Использование тради-

ционных полых катодов с протоком рабочего тела для требуемого диапазона токов затруднено неустойчивой работой, высоким уровнем плазменных колебаний, высоким напряжением связи с ионным пучком [4]. Это вызвано тем, что уменьшение тока катода достигается снижением давления плазмообразующего газа в полости. При этом снижается концентрация плазмы, изменяются параметры, определяющие процесс ионизации, что и приводит к срыву режима работы катода.

Проведем анализ условий при которых реализуется эффект полого катода.

Для эффективной работы полого катода необходимо обеспечить:

- эмиссию электронов с поверхности;
- существование плазмы в полости;
- токоперенос через диафрагму.

Реализацию эффекта полого катода традиционно связывают с условием существования плазмы в полости:

$$P_K \cdot d_K \approx (1...2) \text{ Торр} \cdot \text{см}, \quad (1)$$

где P_K – давление в полости катода;

d_K – диаметр полости катода.

При этом условии длина свободного пробега первичных электронов до ионизации нейтрала будет меньше радиуса катода. Соотношение (1) подтверждено экспериментально как для открытых [6], так и для диафрагмированных катодов [5].

Минимальная величина тока катода при условии (1) для традиционной геометрии катода ($d_K = 3...5$ мм) и давления в полости 1 Торр, диаметре отверстия (0,3...0,5) мм и плотности тока (~ 100 А/см²) составит 0,5 А. Дальнейшее снижение давления в полости катода приводит к погасанию разряда.

Не менее важным для работы катода при малых токах является условие самоподдержания разряда. Ионы, образующиеся в полости катода за счет ионизации рабочего вещества электронным ударом, стремятся попасть на стенки катода. Если плотность газа в полости мала, так что длина свободного пробега иона больше размеров полости, то ионы будут уходить на стенки без столкновений и гибнуть на них. Необходимо обеспечить достаточную плотность газа, при которой уход ионов на стенки будет происходить только за счет диффузии. При этом количество образовавшихся в полости ионов будет больше, чем их уход на стенки катода. Условие самоподдержания работы катода можно представить в виде [5]:

$$\langle \sigma_0 V_e \rangle (n_0 \cdot r_{\text{вн}})^2 \times \frac{m_i \langle \sigma_{i0} V_i \rangle}{e U_0 \chi_i} \geq 1, \quad (2)$$

где σ_0 – сечение ионизации атомов электронами;

σ_{i0} – сечение столкновения ион-нейтрал;

V_e, V_i – скорость электронов, ионов;

n_0 – концентрация нейтральных частиц в полости катода;

$r_{\text{вн}}$ – радиус полости катода;

m_i – масса иона рабочего тела;

U_0 – потенциал электрического поля на оси полости.

Для традиционных полых диафрагмированных катодов на ксеноне для самоподдержания разряда необходимо в полости обеспечить плотность нейтрального газа $n_0 > 10^{16}$ см⁻³. При этом давление в полости должно быть $P_K > 10$ Торр, а соответ-

ствующий расход ксенона составит величину $\dot{m} > 0,08$ мг/с. С уменьшением плотности газа эффективность ионизации снижается. При этом уменьшается поток энергии приносимой ионами на стенку, снижается температура поверхности и нарушается условие самоподдержания разряда. Разряд гаснет, что наблюдается в экспериментах.

Повышение устойчивости и обеспечение работоспособности полого катода при низких давлениях в полости, пытаются достигнуть за счет дополнительного внешнего нагрева [5]. Требуемую температуру эмиссионной поверхности обеспечивают в этом случае не за счет ионной бомбардировки поверхности катода, а за счет подвода дополнительной энергии с помощью нагревателя. Однако это может нарушить условие существования монослоя активатора на поверхности. С уменьшением давления в полости падает поток частиц (ионов) на поверхность. Внешний нагрев увеличивает их десорбцию. Поэтому пленка активатора в этих условиях может не сформироваться.

2. Решение проблемы

Обеспечение устойчивой работы полого катода при низких ($P_K < 1$ Торр) давлениях в полости может быть достигнуто, по мнению автора, за счет организации второй, дополнительной ступени разряда в полости катода с помощью автономного источника электропитания.

Схема двухступенчатого полого плазменного катода представлена на рис. 1.

При предложенной схеме построения катода условия существования плазмы в полости, ее параметры (концентрация и температура частиц), напряженность электрического поля, поток энергии и частиц на эмиссионную поверхность будут определяться параметрами дополнительной ступени. Улучшатся условия эмиссии электронов, поскольку возрастет энергия и поток ионов на поверхность.

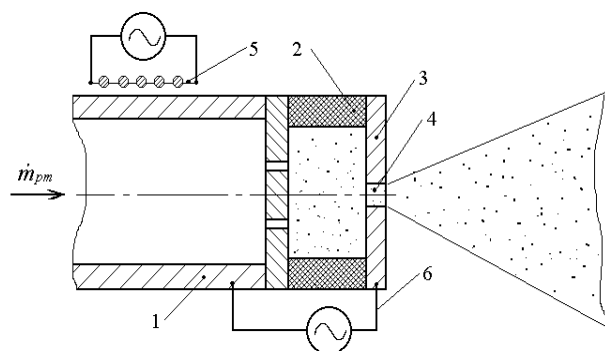


Рис. 1. Схема катода:

- 1 – внутренний электрод; 2 – изолятор;
3 – внешний электрод; 4 – экстракционное
отверстие; 5 – стартовый нагреватель;
6 – источник электропитания
дополнительной ступени

Рост напряженности поля в полости катода за счет дополнительного источника электропитания позволит повысить проводимость плазмы, и обеспечить существование плазменного мостика независимо от источника внешнего электропитания.

Таким образом, организация второй дополнительной ступени разряда в полости катода положительно скажется на его работоспособности и может позволить снизить рабочее давление и обеспечить устойчивую его работу при токах разряда требуемых для ЭРД малой мощности.

Заключение

Для подтверждения работоспособности схемы построения катода необходимо экспериментально определить и подтвердить границы возможного снижения давления в полости, при которых дополнительный разряд второй ступени существует устойчиво и существенно влияет на ток основного разряда.

Также необходимо экспериментально определить диапазон токов катода и подтвердить возможность работы при токах ($0,3 \div 0,4$ А), которые представляют интерес для ЭРД малой мощности (100 – 200 Вт).

Литература

1. Garkusha V. with col. Modern status of Hall Thrusters Development in Russia // AIAA 99-2157.
2. Micci M., Ketsdever A. Micropropulsion for small spacecraft // Progress in astronautics and aeronautics. – 2000. – Vol. 187. – AIAA. – 2000.
3. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. – 140 с.
4. Белан Н.В., Оранский А.И., Бахмет Г.К. Некоторые особенности рабочих процессов в прикатодной области электроракетных двигателей // Сб. тр. 7-х научн. чтений по космонавтике. – М.: Машиностроение, 1993. – С 123-129.
5. Arhipov B. Krochar L. Numerical and Experimental Researches of Thermal Process in Cathodes / Neutralizes for Electric Plasma // AIAA 98-3479.
6. Delcroix S. Minoon H. High pressure operation in hollow cathode are discharge // Proc Int. Conf. Hollow Cathode discharges. – 1971. – Appl. Ins. – P. 18-26.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.