

УДК 629.7.036.7

Н.Н. КОШЕЛЕВ, А.П. КИСЛИЦЫН, В.А. ПОДГОРНЫЙ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИИ ЭМИТТЕРА В ПЛАЗМЕ СЛАБОТОЧНОГО ПОЛОГО КАТОДА**

В статье приводится теоретическое обоснование соотношения, предлагаемого для оценок скорости эрозии элементов конструкции полого катода, и экспериментальные данные, полученные при исследовании влияния давления плазмообразующего газа на скорость эрозии эмиттера на основе скандата бария.

стационарный плазменный двигатель, безнакальный полый катод, эмиттер, эрозия**Введение**

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Достаточно интенсивные опытно-конструкторские работы и лабораторные исследования микро СПД (стационарных плазменных движителей), проведенные в последнее время [1], показали возможность создания летных моделей таких движителей. Надежность работы движителей, требуемая от летных моделей, предполагает надежность работы всех его элементов, и в том числе катода. Высокотемпературные оксидные эмиттеры электронов, рассматриваемые в качестве эффективных эмиттеров полых катодов (ПК) СПД, в вакуумных условиях имеют низкую скорость уноса эмиссионно-активной компоненты (бария) [2], но именно этот унос будет определять срок службы катода СПД. Катод СПД не является вакуумным и скорости уноса активной компоненты могут существенно отличаться от значений, полученных при вакуумных испытаниях, что требует проведения специальных исследований в условиях наиболее приближенных к рабочим.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Для контроля скорости эрозии активной компоненты эмиттера полого катода уже использовался метод оптической спектроскопии [3]. Но скорость эрозии оценивалась по наличию контролируемой компоненты в плазме внешнего столба (за диафрагмой ка-

тода). Такие оценки могут оказаться заниженными из-за того, что активная компонента будет не только уноситься вместе с рабочим плазмообразующим газом, но и осаждаться на относительно холодных элементах конструкции катода. В полых катодах, предназначенных для работы на малых токах ($\sim 0,5$ А), скорости эрозии достаточно малы и во внешнем столбе (за диафрагмой) концентрация эродировавшего вещества может оказаться настолько низкой, что в спектре внешнего столба будет невозможно надежно идентифицировать следы контролируемого вещества. По этой причине, контроль содержания активной компоненты желательно вести в пространстве между эмиттером и диафрагмой катода.

Цель исследований состояла в разработке методики контроля скорости эрозии эмиссионно-активного компонента эмиттера полого катода и выяснении влияния давления основного плазмообразующего газа (ксенона) на скорость эрозии эмиттера на основе скандата бария.

Результаты исследований

Соотношение для оценки скорости эрозии конструктивных элементов ПК.

В разрядном пространстве безнакального полого катода и в пространстве между эмиттером и

диафрагмой длина свободного пробега частиц, формирующих плазму, оказывается заметно меньшей характерных размеров системы. Это означает, что для анализа процессов, протекающих в отмеченных областях, вполне приемлемой оказывается модель локального термодинамического равновесия (модель ЛТР). В рамках такой модели, с учетом весьма малой скорости упорядоченного движения плазмообразующего газа, вынос эродировавшего вещества можно рассматривать как диффузионный процесс. При этом скорость уноса или масса уносимого эродировавшего вещества за единицу времени dm/dt , при неизменной геометрии системы будет пропорциональна концентрации этого вещества в любой точке пространства n_{er} за исключением сорбирующих поверхностей

$$\frac{dm}{dt} \propto n_{er}. \quad (1)$$

Наличие эродировавшего вещества и его относительную концентрацию в контролируемой части плазмы достаточно просто определить спектроскопическими методами. При этом измеряемой величиной является интенсивность спектральной линии, (какой-либо из характерных для данного вещества) которая пропорциональна числу излучающих атомов N_u или средней концентрации атомов n_u , находящихся в соответствующем возбужденном состоянии.

$$I_{u,l} \propto A_{u,l} \cdot N_u \propto A_{u,l} \cdot n_u, \quad (2)$$

где $I_{u,l}$ – интенсивность спектральной линии, получающейся при переходе атома из состояния « u » в состояние « b »; $A_{u,l}$ – постоянная Эйнштейна для соответствующего спонтанного радиационного перехода; N_u – число излучающих частиц, находящихся в возбужденном состоянии « u ».

Плазма полого катода является низкотемпературной, а, следовательно, в ней основная часть частиц находится в основном (невозбужденном) состоянии. В возбужденном состоянии (обеспечивающем излучение) находится малая доля частиц, которая в соответствии с распределением Больцмана равна

$$\frac{n_u}{n_0} = \frac{g_u}{g_0} \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right), \quad (3)$$

где g_u и g_0 – статистические веса возбужденного и основного состояний атома.

Поскольку в плазме основная часть частиц находится в невозбужденном состоянии, постольку скорость уноса эродировавшего вещества (см. (1)) будет определяться концентрацией частиц в основном состоянии n_{er0} , которая может быть выражена через концентрацию возбужденных атомов. Из (3) следует

$$n_0 = n_u \frac{g_0}{g_u} \left(\exp\left(\frac{1}{kT}\right)\right)^{E_u}. \quad (4)$$

В соотношении (4) неопределенной оказывается температура плазмы.

Для ее определения можно воспользоваться интенсивностями основного плазмообразующего газа – ксенона, отношение интенсивностей двух произвольных спектральных линий которого в состоянии термодинамического равновесия равно

$$\frac{I_{Xe-\alpha}}{I_{Xe-\beta}} = \frac{A_{\alpha}}{A_{\Sigma\alpha}} \frac{A_{\Sigma\beta}}{A_{\beta}} \frac{g_{\alpha}}{g_{\beta}} \left(\exp\left(\frac{1}{kT}\right)\right)^{-(E_{\alpha}-E_{\beta})}, \quad (5)$$

где α и β – возбужденные состояния ксенона, являющиеся исходными в соответствующих излучательных переходах; A_{α} и A_{β} – постоянные Эйнштейна для переходов, обеспечивающих соответствующие спектральные линии; $A_{\Sigma\alpha}$ и $A_{\Sigma\beta}$ – суммы постоянных Эйнштейна для всех возможных радиационных переходов с соответствующего возбужденного уровня.

С учетом всего сказанного выше, из соотношений (1), (4) и (5) получим выражение

$$\frac{dm_{er}}{dt} \propto I_{u(er)} \left(\frac{I_{Xe-\alpha}}{I_{Xe-\beta}}\right)^{\frac{E_u}{E_{\beta}-E_{\alpha}}}, \quad (6)$$

которое позволяет на основании данных радиационной спектроскопии осуществлять оценки скорости эрозии.

Результаты экспериментальных исследований. Измерения интенсивности эрозии материала эмиттера полого катода проводились в специально изготовленном макете, внешней оболочкой которого являлась кварцевая полированная трубка. Фотография макета в рабочем состоянии (при наличии разряда) представлена на рис. 1.

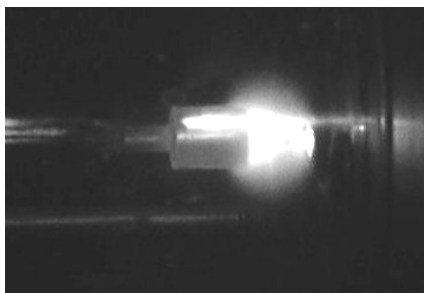


Рис. 1. Фотография макета в рабочем состоянии

Спектр излучения внутренней части разряда между эмиттером и диафрагмой регистрировался оптическим эмиссионным спектрометром HR2000, у которого диапазон контролируемых длин волн лежит в пределах от 387 до 829 нм. Для определения величины параметра эрозии, численно характеризующего интенсивность процесса, были выбраны следующие спектральные линии:

резонансная линия бария $\lambda_{\alpha,0} = 553,55$ нм;
 $E_u = 2,24$ эВ; линии ксенона $\lambda_{\alpha} = 823,16$ нм;
 $E_{\alpha} = 9,82$ эВ; $\lambda_{\beta} = 556,615$ нм; $E_{\beta} = 11,81$ эВ.

При этом расчетное выражение для параметра эрозии (6) принимает вид

$$\mu_{Ba} = I_{Ba-553} \left(\frac{I_{Xe-823}}{I_{Xe-556}} \right)^{1,126}.$$

Результаты зависимости уноса бария скандатного эмиттера от давления ксенона в катоде приводятся на рис. 2. Наличие минимума на кривой указывает на возможность поиска компромисса между эффективностью работы и его ресурсом при проектировании катода.

Выводы

Режим работы с минимальной эрозией эмиттера может быть наиболее приемлемым для долгосрочной

работы слаботочного катода в составе микро СПД. Тем более, что увеличение размеров и веса эмиттера за счет дополнительного запаса активатора, приводит к ухудшению тепловой схемы слаботочного катода и, как следствие, снижению его эффективности. Результаты спектральных исследований внутренней плазмы слаботочного скандатного катода показали, что существует режим, при котором испарение эмиссионной добавки (Ba) минимально.

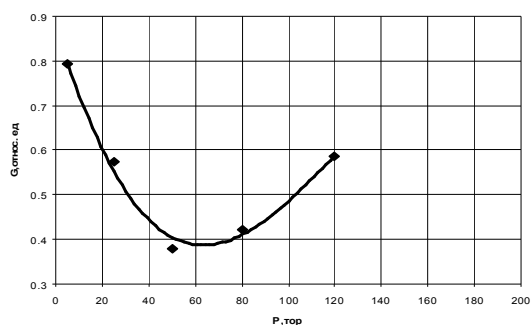


Рис. 2. Зависимость уноса бария скандатного эмиттера от давления ксенона в катоде

Данная работа проводилась в рамках проекта УНТЦ №1936.

Литература

1. Максименко Т.А., Лоян А.В., Кошелев Н.Н. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини и микро спутников // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9. – С.111-115.
2. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: МФТИ, 2001. – 240 с.
3. Исаев Е.А., Оранский А.И., Титов А.А. Исследование эрозии полых катодов методом оптической спектроскопии // *Ракетно-космическая техника / Ракетные двигатели и энергетические установки*. – 1991. – Вып. 3 (131). – С. 170-175.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков