

УДК 629.7.087:538.4:001.2

А.В. ХИТЬКО

Днепропетровский национальный университет, Украина

АКТИВАЦИЯ КАТОДА СОЛЯМИ ЦЕЗИЯ

Проведен анализ механизмов активации поверхности цезиевого полого катода. Экспериментально исследовано активацию при работе двухступенчатого катода на солях цезия.

электроракетный двигатель, полый расходный цезиевый катод, работа выхода, активирование поверхности, электроотрицательные добавки, соли цезия, активатор

Введение

В настоящее время происходит расширение области применения электроракетных двигателей в системах ориентации и стабилизации мало-размерных телекоммуникационных космических аппаратов массой от 100 до 500 кг на геостационарной орбите [1]. При этом мощность и требуемая тяга двигателя существенно уменьшаются, что требует разработки слаботочных катодов на токи 0,1...0,5 А.

Использование традиционных полых катодов с протоком рабочего тела для данного диапазона токов затруднено их неустойчивой работой, высоким уровнем плазменных колебаний, высоким напряжением связи с пучком движителя [2]. Предложенная схема двухступенчатого полого катода с внутренним разрядом позволила расширить диапазон разрядных токов в сторону уменьшения до 10^{-3} А при соответствующем снижении давления в полости с 1 до 10^{-3} мм. рт. ст. [3].

Формулирование проблемы

Для решения задач с плотностью эмиссионного тока порядка единиц-десятков А/см² цезиевые катоды, эффективная работа выхода для которых при оптимальном покрытии составляет 1,3 ... 1,4 эВ [4], выглядят предпочтительнее бариевых катодов, для которых эта величина колеблется в пределах 1,8 ... 2,2 эВ. Требуемый уровень тока эмиссии дос-

тигается при температурах 800 – 1000 К и может быть обеспечено устойчивое цезиевое покрытие при приемлемом уровне расхода активатора. Несмотря на высокие эмиссионные качества, возможности использования чистого цезия в качестве активатора весьма ограничены.

Так для получения плотностей эмиссионного тока порядка десятков и сотен А/см² использование цезия затруднено ввиду низкой энергией адсорбции и легкой испаряемости его пленки. Применение катода с парами цезия возможно либо в замкнутых системах (газоразрядных трубках, термоэмиссионных преобразователях), либо в расходных системах.

Примером такой системы является полый диафрагмированный расходный катод, работающий на парах цезия и являющийся объектом нашего исследования. В данной системе для создания пленки требуются довольно высокие давления в полости катода (1 ... 10 мм. рт. ст.) В нашем случае диапазон рабочих давлений значительно ниже (до 10^{-3} мм. рт. ст.) и вопрос об активировании эмиссионной поверхности становится проблемным.

Важной задачей для данной системы является определение механизма образования пленки, факторов существенно влияющих на ее динамику и разработка мероприятий обеспечивающих наличие пленки в диапазоне температур выше 1000 К.

Общие соотношения. При адсорбции цезия на металлах, хорошо работает следующая модель. При

сближении цезия с металлом, имеющим вакуумную работу выхода χ_0 , большую, чем энергия ионизации $E_{ион}$ (3,89 эВ), на расстоянии, при котором становятся возможны переходы, Cs ионизуется, и его валентный электрон переходит в металл. Образовавшийся ион Cs притягивается к поверхности металла, пока силы притяжения к наводимому им отрицательному заряду не уравновешиваются силами отталкивания при перекрытии электронных оболочек, которые очень быстро растут при уменьшении расстояния. С ростом концентрации адсорбированных ионов увеличивается положительный потенциал адсорбированного слоя, вследствие чего электронам становится энергетически более выгодно частично переходить на адсорбированные ионы – это приводит к уменьшению дипольного момента, происходящего на один атом, а также к уменьшению ионной и увеличению ковалентной составляющих связи поверхностного слоя с подложкой. В эксперименте обычно получается, что работа выхода минимальна при степени покрытия, близкой к монослою [5].

При степени покрытия больше единицы начинается наращивание второго слоя. При этом связь с подложкой становится слабой, и энергия адсорбции приближается к теплоте испарения адсорбента.

Работа выхода также быстро приближается к работе выхода адсорбированного металла (Cs – 1,92 ... 1,94 эВ).

Для поддержания постоянной степени покрытия давление должно экспоненциально расти с температурой. Если давление поддерживается постоянным, то при повышении температуры сначала сохранится монослойное покрытие, а затем степень покрытия уменьшается, пока поверхность полностью не очистится от адсорбента.

Один из способов воздействия на работу выхода электродов в парах цезия является введение в систему электроотрицательных элементов: кислорода, галогенов или их соединений с Cs. Совместная адсорбция электроотрицательных атомов и цезия уве-

личивает теплоту десорбции цезия и одновременно приводит к значительно большему снижению работы выхода катода. Соответственно снижается и давление цезия, необходимое для получения оптимальной работы выхода катода, так что в целом выходные характеристики катода существенно улучшаются.

Роль электроотрицательных атомов в сложных покрытиях заключается в том, что они увеличивают эффективный дипольный момент двойного электрического слоя, и повышают энергию связи цезия с подложкой. Вероятнее всего, на поверхности подложки электроотрицательные атомы и атомы цезия вступают в сложное взаимодействие одновременно и с атомами подложки, и между собой.

Увеличении теплоты десорбции при наличии электроотрицательных атомов наиболее наглядно проявляется в смещении максимума эмиссии в область более высоких температур которое может достигать 200 – 300 К.

Приведенная информация по электроотрицательным добавкам относится к замкнутым системам типа термоэмиссионных преобразователей (ТЭП). В нашем случае система расходная требующая постоянной подпитки компонентами, которые покидают полость катода.

Целью данной статьи является исследование механизма активации при работе катода на солях цезия. Возникает ряд вопросов: как организовать подачу кислорода в полость катода; каким должно быть соотношение между расходами цезия и кислорода; как избежать реакции окисления цезия в объеме; необходимо ли ее предотвращать?

Решение проблемы

Во-первых, как утверждают разработчики ТЭП [6] сравнительно небольшое количество электроотрицательных газов (кислород) неизбежно присутствующих в рабочем объеме и этого достаточно для реализации требуемого эффекта.

Во-вторых, наиболее стабильные и воспроизводимые результаты наблюдаются при использовании не самих электроотрицательных газов, а их соединений с цезием, оксидов.

В-третьих, необходимо учитывать особенность термодиссоциации соединений цезия, в частности то, что температура разложения оксида цезия ниже, чем карбоната.

Все перечисленные аргументы позволяют предположить, что использование в качестве рабочего тела катода карбоната цезия позволяет решить проблему активации эмиссионной поверхности при низких давлениях в полости катода с реализацией эффекта электроотрицательных добавок и обеспечить наличие цезиевой пленки при давлениях ниже 10^{-2} мм. рт. ст. и температурах выше 1000 К.

Катод в этом случае должен быть построен по ампульной схеме, в которой контейнер с карбонатом цезия непосредственно совмещен с разрядным объемом. Его нагрев происходит за счет мощности выделяемой в разряде. В контейнере происходит термодиссоциация карбоната с образованием оксида цезия. Оксид через отверстия поступает в разрядную полость и на эмиссионную поверхность. На ней происходит термодиссоциация оксида с образованием чистого металла и кислорода. Формируется окисная пленка на поверхности катода на которой реализуется активирующая пленка цезия. Описанный механизм является феноменологическим и его достоверность необходимо подтвердить экспериментально.

Целью дальнейших исследований являлась экспериментальная оценка величины эффективной работы выхода для двухступенчатого полого катода, работающего на солях цезия, в диапазоне давлений в полости ($5 \cdot 10^{-2} \dots 1$) мм. рт. ст., эмиссионных температур (1000 ... 1300) К, токов разряда (0,1 ... 1) А.

В случае двухступенчатого катода с внутренним разрядом величина эмиссионной поверхности строго определена геометрией внутренней полости. Для

исследуемого образца она составляла 0,16 см². Плотность эмиссионного тока определялась по току внутреннего разряда. Характерные значения параметров внутреннего разряда для одного фиксированного значения давления цезия в полости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров внутреннего разряда

P_k , мм. рт. ст.	$I_{вн}$, А	$U_{вн}$, В	$j_{вн}$, А/см ²	T_k , К
0,03	2,0	3,9	7,8	943
	2,2	4,0	8,8	1003
	2,4	4,3	10,3	1058
	2,6	4,4	11,4	1073
	2,8	4,5	12,6	1083
	3,0	4,7	14,1	1143

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют оценить величину работы выхода при работе катода на карбонате цезия. Для расчета величины эффективной работы выхода эмиссионной поверхности использовался закон Ричардсона без учета эффекта Шоттки. Аналогичные расчеты были проведены для более трехсот режимов в диапазоне давлений в полости ($5 \cdot 10^{-2} \dots 1$) мм. рт. ст.

Полученная расчетная величина эффективной работы выхода лежит в пределах 1,3 ... 1,5 эВ. Анализ ее зависимости от температуры показывает, что полученный экспериментальный участок кривой соответствует спадающему участку S-образной кривой, для которого характерно уменьшение степени покрытия эмиссионной поверхности с 1 до 0,5.

Заключение

Установлено, что возможности использования чистого цезия в качестве активатора весьма ограничены, так как его пленка оказывается очень нестойкой и быстро испаряется с поверхности катода при

сравнительно низких температурах (выше 690 К). Применение катода с парами цезия возможно либо в замкнутых системах (газоразрядных трубках, термоэмиссионных преобразователях), либо в расходных системах плотность паров в которых такова, что испарение с поверхности компенсируется конденсацией его на ней и устанавливается динамическая пленка активатора. Для поддержания постоянной степени покрытия давление должно экспоненциально расти с температурой.

Один из способов воздействия на работу выхода электродов в парах цезия является введение в систему электроотрицательных элементов: кислорода, галогенов или их соединений с Cs. Совместная адсорбция электроотрицательных атомов и цезия увеличивает теплоту десорбции цезия и одновременно приводит к значительно большему снижению работы выхода катода, что проявляется в смещении максимума эмиссии в область более высоких температур которое может достигать 200 – 300К. Соответственно снижается и давление цезия, необходимое для получения оптимальной работы выхода катода

Показано, что наиболее перспективным является использование в качестве рабочего тела катода солей (карбоната, алюмината) цезия, которое позволит решить проблему активации эмиссионной поверхности при низких давлениях в полости с реализацией эффекта электроотрицательных добавок. На его поверхности могут, образовываться сложные комплексы, состоящие из окиси цезия, окислов металла подложки и свободных металлов.

Достоверность разработанного механизма подтверждена экспериментально снижением работы

выхода до 1,3 – 1,5 эВ. Работа на солях цезия позволяет обеспечить наличие пленки при давлениях в полости катода до 10^{-2} мм. рт. ст. и температурах до 1000 К.

Литература

1. Университетские проекты микроспутников: тенденции, технологии, реализация: Материалы международного семинара-практикума. – Днепропетровск: ДНУ, 2002. – 90 с.
2. Некоторые особенности рабочих процессов в прикатодной области электроракетных двигателей / Н.В. Белан, А.И. Оранский, Г.К. Бахмет // Сб. тр. VII-х научных чтений по космонавтике. – М., 1993. – С. 35-38.
3. Хитько А.В. Двухступенчатый полый катод // Современные проблемы ДЛА: Тр. 3 Всесоюз. науч.-техн. конф. – М.: МАИ, 1986. – 620 с.
4. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. – М.: Наука, 1973. – 480 с.
5. Дюжев Г.А., Бакшт Ф.Г., Юрьев В.Г. Теория сильноточного дугового полого катода // ЖТФ, – 1981. – Т. 51. – С. 1846-1857.
6. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. – М.: Атомиздат, 1978. – 328 с.

Поступила в редакцию 17.05.2007

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