

2. Евтихин В.А., Чуманов А.Н. Космическая ядерная энергетическая установка. Патент РФ № 2129740 с приоритетом от 28.07.98 г., зарегистрирован 27.04.99 г. 528 с.
3. Чуманов А.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Конструктивные и технологические особенности энергетического модуля КЯЭУ на молибден-литиевых тепловых трубах. Тезисы докл. 2-го Межд. семинара по космической ядерной энергетике XXI века. Обнинск, 19—21 апреля 2000 г., с. 54.

УДК 621.362:537.58

ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЫСОКИМИ ВЫХОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛ-КИСЛОРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА КОЛЛЕКТОРЕ

*Ярыгин Д.В., Миронов В.С., Соловьев Н.П., Тулин С.М., Ярыгин В.И.**(ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Разработка космических ЯЭУ нового поколения с термоэмиссионными преобразователями тепловой энергии в электрическую, отличительной чертой которых является повышение ресурса работы до 10 лет и более, вызвала необходимость значительного снижения температуры эмиттера (T_3) при сохранении и даже увеличении к.п.д. по сравнению со средне- и высокотемпературными преобразователями ($T_3 = 1750—2000$ К). Достигнутый к настоящему времени уровень выходных электрических характеристик и к.п.д. средне- и высокотемпературных преобразователей может быть представлен с помощью барьерного индекса ($V_6 = 2—2,25$ эВ) — обобщенного показателя эффективности термоэмиссионного преобразователя, включающего основные виды потерь напряжения на коллекторе и при прохождении тока через среду межэлектродного зазора [1—3]. Необходимость снижения температуры эмиттера до ≤ 1600 К связана с понижением барьерного индекса меньше 2 эВ. Чем он ниже, тем более низкой может быть выбрана температура эмиттера и соответственно могут быть использованы новые схемы подвода тепла к эмиттерам преобразователей, такие, как тепловые трубы, жидкометаллический контур охлаждения реактора, для наземных термоэмиссионных энергоустановок — продукты сгорания органического топлива и солнечный нагрев. Таким образом, появляется возможность использования низкотемпературных высокоэффективных термоэмиссионных преобразователей с $V_6 < 2$ эВ в составе электрогенерирующих каналов с вынесенными из активной зоны реактора преобразователями [4]. В них принципиально разделены межэлектродное пространство преобразователя и оболочка твэла, содержащая ядерное топливо с газообразными продуктами деления, и соответственно более убедительно, чем для ЭГК, встроенных в активную зону, может быть обоснована стабильность или допустимое изменение эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов и выходных электрических характеристик ЭГК/ЯЭУ в течение назначенного срока службы 10 лет и более. Для отработки конструкции и технологии изготовления таких низкотемпературных ЭГК для космических ЯЭУ или электрогенерирующих систем наземного применения в полной мере может быть использован опыт традиционной электровакуумной технологии классической эмиссионной электроники, обеспечившей в свое время создание радио, генераторных и выпрямительных ламп и систем с ресурсом работы 10 лет и более [5, 6].

Одним из реальных и одновременно перспективных путей увеличения выходных электрических характеристик и к.п.д. (т.е. уменьшения V_6) низкотемпературных термоэмиссионных преобразователей в разрядных режимах работы является использование металл-кислородных систем на коллекторе [7—11].

Анализ результатов исследования металл-кислородных систем на коллекторах термоэмиссионных преобразователей в виде объемных оксидов показывает, что такие системы, несмотря на значительное улучшение эмиссионно-адсорбционных характеристик

тик по сравнению с обычными металл-цезиевыми системами, не дали существенного уменьшения барьерного индекса. Улучшить выходные характеристики ниже значения $V_6 \approx 2,1$ эВ в экспериментах [7] и $V_6 \approx 2,05$ эВ в экспериментах [10] не удалось. Мы полагаем, что есть несколько основных причин, объясняющих такие характеристики: значительное объемное электрическое сопротивление оксидов переходных металлов, в несколько десятков раз превышающее сопротивление «чистых» металлов (по данным [10] от одного до 10^4 раз в зависимости от содержания кислорода);

химическая неустойчивость оксидов по объему, которая является источником кислорода, вызывающего массоперенос материала эмиттера, имеющего большую по сравнению с двумерными пленками оксидов минимальную работу выхода адсорбированного кислород-цезиевого слоя на коллектор [7];

наличие на поверхности коллектора преобразователя эмиссионно-активных фоновых и привнесенных извне примесей (C, S, P, Ca), а также продуктов массопереноса материала эмиттера, которые способствуют созданию и постепенному росту эмиссионной неоднородности его рабочей поверхности и увеличивают V_6 .

Могут быть и другие причины, недостаточно изученные к настоящему моменту, например, такие, как эмиссия отрицательных ионов кислорода, ухудшающая в общем случае V_6 и эффективность преобразования энергии [8].

Особенностью нашего подхода к выбору коллекторного материала является формирование металл-кислородного слоя на этапе обезгаживания электродов в среде остаточных газов межэлектродной среды. Парциальное давление кислорода в ней достигает в зависимости от условий обезгаживания 10^{-9} — 10^{-10} Па. Вместе с фоновым кислородом, растворенным в активных переходных металлах, этого достаточно для образования оптимальной металл-кислородной системы.

К сожалению, пока нерешенной остается проблема очистки металл-кислородных систем от эмиссионно-активных фоновых и привнесенных примесей (C, S, P, Ca). Ее решение позволит дополнительно уменьшить барьерный индекс по нашей оценке на 0,1—0,15 эВ по сравнению с лучшим результатом 1,9 эВ, воспроизводимым в ГНЦ РФ—ФЭИ.

Методы исследования, техника измерения характеристик и испытаний термоэмиссионных преобразователей. Комплекс методических и аппаратурных средств исследований включал анализ поверхности и приповерхностной области эмиттеров и коллекторов для определения элементного состава, химического состояния, вакуумной работы выхода, кристаллографической ориентации в аналитических камерах при моделировании термовакуумной подготовки электродов в составе термоэмиссионных преобразователей и изучении электродов после испытаний в составе термоэмиссионных преобразователей, а также измерение эмиссионных характеристик электродов и вольт-амперных характеристик в ходе многопараметрической оптимизации выходных электрических характеристик на стенде с электронагревом в интервале изменения температуры эмиттера по температуре цезиевого резервуара/давлению паров цезия, температуре коллектора, межэлектродному зазору.

При анализе характеристик поверхности и приповерхностной области электродов использовали как общеизвестные, так и специально разработанные технику и методы [7, 12]. Температурную эволюцию вакуумной работы и элементного состава поверхности образцов электродов исследовали в условиях сверхвысокого вакуума (давление остаточных газов не превышало $5 \cdot 10^{-12}$ Па) на установке УСУ-3 методами спектроскопии полного тока высокого разрешения и электронной оже-спектроскопии (спектрометр 09 ИОС-3 с «цилиндрическим» зеркалом). Спектры элементного состава поверхности и приповерхностной области анализируемых образцов электродов измеряли также методом лазерной масс-спектроскопии с помощью времяпролетной масс-спектроскопии в установке LAMMA1000 фирмы «Leybold-Heraeus» (Германия) [13]. Хи-

мическое состояние компонентов и примесей в приповерхностной области электродов определяли методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в сверхвысоковакуумной установке XSAM 800 фирмы «Kratos» (Великобритания). Для измерения эмиссионных характеристик электродов в рабочих условиях и многопараметрической оптимизации вольт-амперных характеристик использовали лабораторный термоэмиссионный преобразователь с плоской геометрией электродов (площадь эмиссионной поверхности эмиттера S_z и коллектора S_k составляла $1,5 \text{ см}^2$).

Термоэмиссионные измерения проводили с помощью лабораторного комплекса регистрации и обработки вольт-амперных характеристик [14], который позволял по характерным точкам как проводить текущие измерения в ходе эксперимента в режиме on-line с определением V_6 , плотности максимальной выходной электрической мощности и др., так и систематизировать результаты исследований электродов и испытаний преобразователя в форме атласа вольт-амперных характеристик, хранящихся в компьютерной базе данных [15].

Подготовка лабораторного термоэмиссионного преобразователя и вакуумно-цезиевых коммуникаций к экспериментам включала термовакuumную подготовку с контролем массового состава остаточного газа с помощью масс-спектрометра типа MX7304, дистилляцию и перегонку цезия в термостат (рабочий резервуар) и другие общепринятые процедуры [16].

Температуру эмиттеров измеряли с помощью четырех-шести вольфрам-рениевых термопар ВР 5/20. Кроме того, температуру эмиттера периодически контролировали методом оптической пирометрии с использованием отверстия в эмиттере, моделирующего излучения черного тела. В измерениях применяли эталонный оптический пирометр ЭОП-51 с погрешностью измерения $0,1\text{--}0,2\%$ для диапазона температуры $1200\text{--}1700 \text{ К}$. Методика учитывала поглощение в сапфировых окнах лабораторного преобразователя. Воздействие окна, находящегося между пирометром и источником излучения, на измерение температуры учитывали с помощью коэффициента поглощения, определяемого экспериментально в калибровочных измерениях [17].

Температуру коллекторов, цезиевых термостатов и вакуумно-цезиевых коммуникаций измеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар. Число измерительных каналов обычно составляло несколько десятков. Важное место в экспериментах занимают установление и поддержание T_z , T_k , T_{Cs} и межэлектродного зазора d на заданном уровне с помощью стандартных стабилизаторов и регуляторов температуры (типа ВРТ-3), для которых отклонение температуры от заданного уровня составляет $\pm 0,5 \text{ К}$. Абсолютная погрешность измерений в эксперименте не превышала $\pm 1,5\%$ уровня измеряемой температуры.

Межэлектродный зазор в лабораторном преобразователе с плоскими электродами определяли оптическим методом с помощью катетометра типа КМ-6, погрешность измерения которого составляет $\pm 10 \text{ мкм}$, через сапфировые смотровые окна. Непараллельность электродов и отклонение зазора в измеряемой точке не превышала $\pm 0,05 \text{ мм}$.

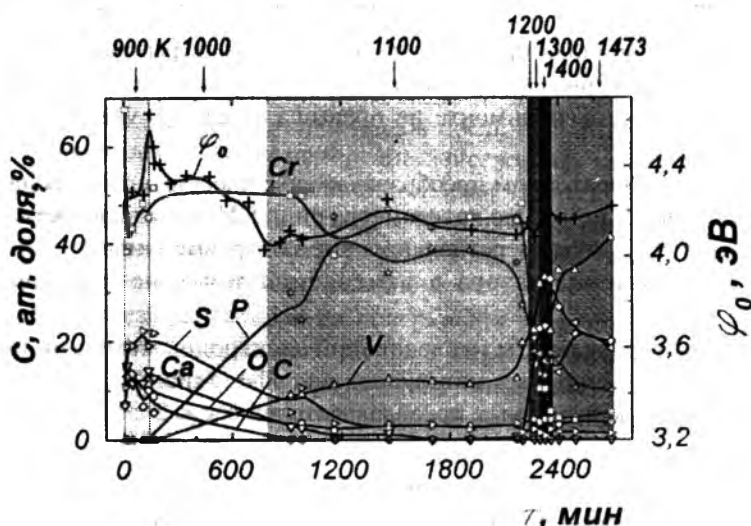
Электродные материалы и результаты исследований электродов методами анализа поверхности. В качестве электродных материалов для эффективных лабораторных низкотемпературных термоэмиссионных преобразователей с $V_6 < 2 \text{ эВ}$ в экспериментах на стенде с электронагревом использовали:

эмиттеры трех видов — из монокристалла вольфрама, ориентированного по грани (110) (отклонение грани от плоскости, параллельной $\langle 110 \rangle$, не превышало 2°), поликристаллического сплава марки МРФ вакуумного переплава молибдена с рением и добавками железа, с платиновым покрытием толщиной $2\text{--}3 \text{ мкм}$, наносимым магнетронным методом на поликристаллическую молибденовую подложку марки МЧВП;

коллекторы двух видов — с никелевым покрытием толщиной ~ 20 мкм, наносимым магнетронным методом на молибденовый подслои толщиной ~ 5 мкм, который покрывает медную подложку коллекторного узла; из малолегированного хром-ванадиевого сплава марки ВХ2У (с содержанием V $\sim 2\%$ по массе, Y $\sim 0,2\text{—}1\%$ по массе, В $\sim 0,02\text{—}0,08\%$ по массе), поверхность которого после механической обработки электрода очищали путем химического травления в смеси соляной, азотной и серной кислот с последующей ультразвуковой отмывкой в дистиллированной воде.

Полученные методом лазерной масс-спектрометрии данные о составе приповерхностной области эмиттеров из монокристалла вольфрама, сплава МРФ, с платиновым покрытием на молибдене показали сходный состав фоновых примесей до испытаний (наличие углерода и кислорода) и образование в процессе испытаний длительностью не более 300 ч приповерхностного сплава, загрязненного (образцы после испытаний не отмывали), в основном, цезием, кислородом. Несмотря на обнаруженные примеси, эмиссионные характеристики эмиттеров были стабильны и соответствовали $\varphi_0 = 5\text{—}5,1$ эВ. По-видимому, основная их часть вносилась после разделки электродов на образцы.

Лазерная масс-спектрометрия приповерхностной области никелевого и хром-ванадиевого коллекторов до и после испытаний (соответственно с платиновым покрытием на молибдене и из монокристалла вольфрама) показала, что если до испытаний оба коллектора содержали малое количество фоновых примесей углерода и кислорода, то после испытаний их поверхность и приповерхностная область обогатились значительным количеством таких эмиссионно-активных примесей, как фосфор, сера, кальций и др. Поскольку лучшие результаты были получены в лабораторном преобразователе с электродной парой материалов платиновое покрытие на эмиттере — хром-ванадиевый сплав марки ВХ2У на коллекторе ($V_6 = 1,9$ эВ) благодаря в значительной степени хорошим эмиссионно-адсорбционным характеристикам сплава, то анализу его свойств уделили особое внимание. Для образца-свидетеля из сплава ВХ2У на рис. 1 приведены данные о температуре и вакуумной работе выхода, полученные методом электронной спектроскопии и контактной разности потенциалов/спектроскопии полного тока высокого разрешения в процессе модельного вакуумного отжига. Отжиг показал, что состав поверхности по основным компонентам (хрому, ванадию) и фоновым примесям (фосфору, сере, кислороду), а также работе выхода $\varphi_0 \sim 4,2 \pm 0,1$ эВ стабилизируется на этапе термовакuumной подготовки при $T_k \sim 1100$ К.



Р и с. 1. Зависимость состава поверхности и вакуумной работы выхода образца-свидетеля коллектора из сплава ВХ2У от времени и температуры при модельном вакуумном отжиге

Результаты изучения изменений элементного состава на поверхности коллектора из сплава ВХ2У, прошедшего испытания в течение ~ 70 ч в составе термоэмиссионного преобразователя с эмиттером из монокристаллов вольфрама, показали сложную картину процессов формирования приповерхностного слоя глубиной $\sim 0,5$ мкм. Одной из особенностей коллектора из сплава является значительное (~ 20 ат. долей, %) содержание кислорода в его приповерхностном слое.

Было обнаружено накопление иттрия в приповерхностном слое коллектора. В исходном состоянии сплав ВХ2У содержит оксид иттрия, диспергированный по объему. Сегрегация свидетельствует о наличии процессов распада оксида иттрия во время испытаний и диффузии иттрия и кислорода к поверхности коллектора. По данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии по химическому сдвигу фотоэлектронных спектров установлено, что накопившийся в приповерхностной области иттрий находится в сильноокисленном состоянии Y_2O_3 , хром и ванадий — в неокисленном состоянии. Коллектор и образцы-свидетели после извлечения из вакуумной камеры вначале визуально имели однородную поверхность с характерным металлическим блеском, что и до прогрева, затем начинали приобретать все более насыщенный бурый цвет и через $\sim 0,5$ ч становились черными. Это изменение цвета мы связываем с окислением на воздухе активных к кислороду недоокисленных металлических пленок на поверхности образцов.

Значительное снижение содержания углерода в глубине приповерхностного слоя коллектора из сплава ВХ2У за время испытания (с 3 ат. долей, % до нуля) свидетельствует о наличии эффективных процессов самоочистки от углерода по механизму окисления и термодесорбции. Способность этого сплава к самоочистке от углерода подтверждается исследованиями образца-свидетеля в условиях сверхвысокого вакуума. Установлено, что при прогреве образца до 1000 К углерод полностью удаляется с поверхности.

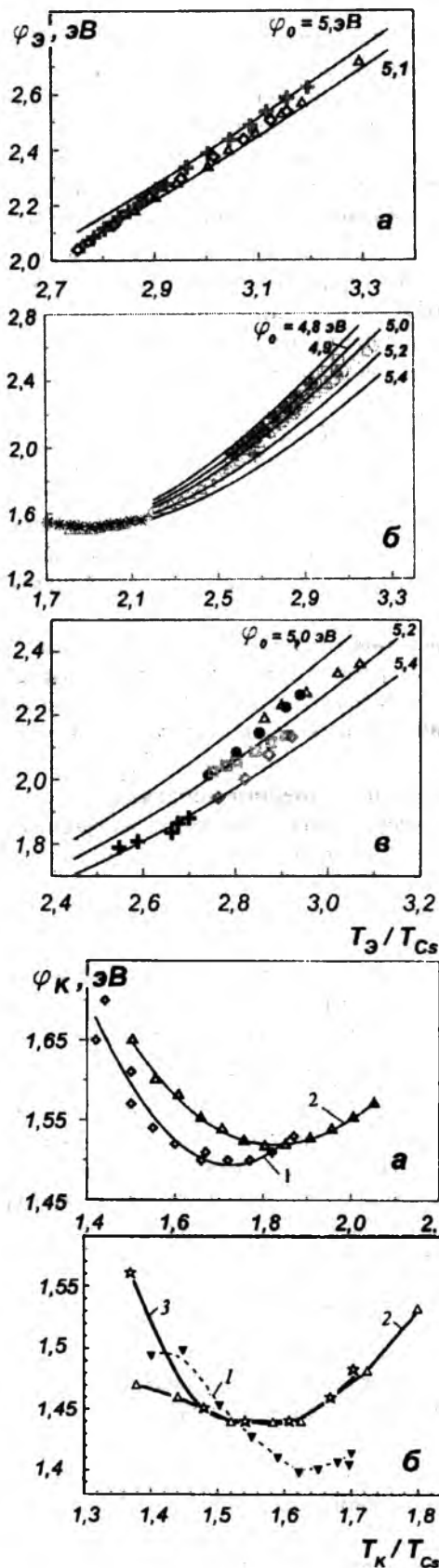
Следует отметить фоновое загрязнение поверхности коллектора из сплава ВХ2У такими элементами, как фосфор и сера, которые присутствуют в исходном сырье и от которых не удалось полностью очиститься, а также небольшое количество натрия, кальция, алюминия, кремния и марганца, привнесенных извне в процессе эксперимента.

Эмиссионные характеристики электродов и вольт-амперные характеристики лабораторного термоэмиссионного преобразователя с эффективными электродными материалами. Были изучены характеристики следующих электродных пар материалов (эмиттер — коллектор), представляющих практический интерес для текущих и перспективных разработок низкотемпературных термоэмиссионных электрогенерирующих систем различного назначения: платина—никель, сплавы МРФ—ВХ2У, платина — ВХ2У и монокристалл вольфрама W(110)—ВХ2У. В ходе измерений была проведена многопараметрическая оптимизация выходных электрических характеристик по T_{Cs}/P_{Cs} , T_k , d , измерены эмиссионные характеристики электродов и определен минимальный V_6 , получены вольт-амперные характеристики в форме атласа.

На рис. 2, 3 приведены данные об эмиссионных характеристиках эффективных электродных материалов, рассматриваемых в связи с их возможным применением в составе эффективных низкотемпературных преобразователей. Эмиссионные характеристики электродов измеряли при рабочих параметрах в дуговых режимах по методу характерных точек и методом обратной эмиссии в квазивакуумных режимах, в которых температура эмиттера и коллектора поддерживалась одинаковой. Эмиссионные характеристики электродов оказались достаточными для эффективной работы преобразователей в низкотемпературных режимах при $T_j \leq 1600$ К с барьерным индексом 1,9—2 эВ. В качестве примера на рис. 4 показаны вольт-амперные характеристики лабораторного термоэмиссионного преобразователя с электродной парой материалов платина—сплав ВХ2У при наиболее представительном межэлектродном зазоре и оптимальной температуре коллектора.

Представленные в атласах вольт-амперные и изученные эффективные электродные материалы характеризуются следующей вакуумной работой выхода, эВ:

эмиттерные материалы — из сплава МРФ — $5,05 \pm 0,05$, с платиновым покрытием на молибдене — $5,15 \pm 0,05$, из монокристалла вольфрама W(110) — $5,25 \pm 0,15$;



Р и с. 2. Зависимость от параметра Рейзора работы выхода эффективных эмиттеров из сплава МРФ (а) при $T_s = 1571$ К, $T_k = 880$ К, $T_{Cs} = 500-570$ К, $d = 0,8$ мм ($\diamond$), 1528 К, 773 К, 487—544 К, 0,8 мм ($+$), 1572 К, 900 К, 480—570 К, 0,8 мм (Δ), с платиновым покрытием на молибдене (б) при 1397 К, 812—868 К, 523 К, 0,5 мм (дуговой режим) ($+$), 1503 К, 874 К, 486—579 К, 0,5 мм (дуговой режим) ($\diamond$), 1601 К, 888 К, 496—581 К, 0,3 мм (дуговой режим) ($\bigcirc$), 1389—1600 К, 882 К, 549 К, 0,5 мм (квазивакуумный режим) ($\star$), 875—1601 К, 876 К, 524 К, 0,5 мм (Δ), 800 К, 800 К, 339—532 К, 0,1 мм (квазивакуумный режим) ($\times$) и из монокристалла вольфрама W(111) (в) при 1300 К, 773 К, 468—511 К, 0,8 мм ($\oplus$), 1325—1402 К, 817 К, 480 К, 0,6 мм ($\diamond$), 1402 К, 824 К, 481—510 К, 0,6 мм ($\square$), 1402—1500 К, 509 К, 511 К, 0,5 мм ($\bullet$), 1501 К, 801 К, 489—546 К, 0,5 мм (Δ)

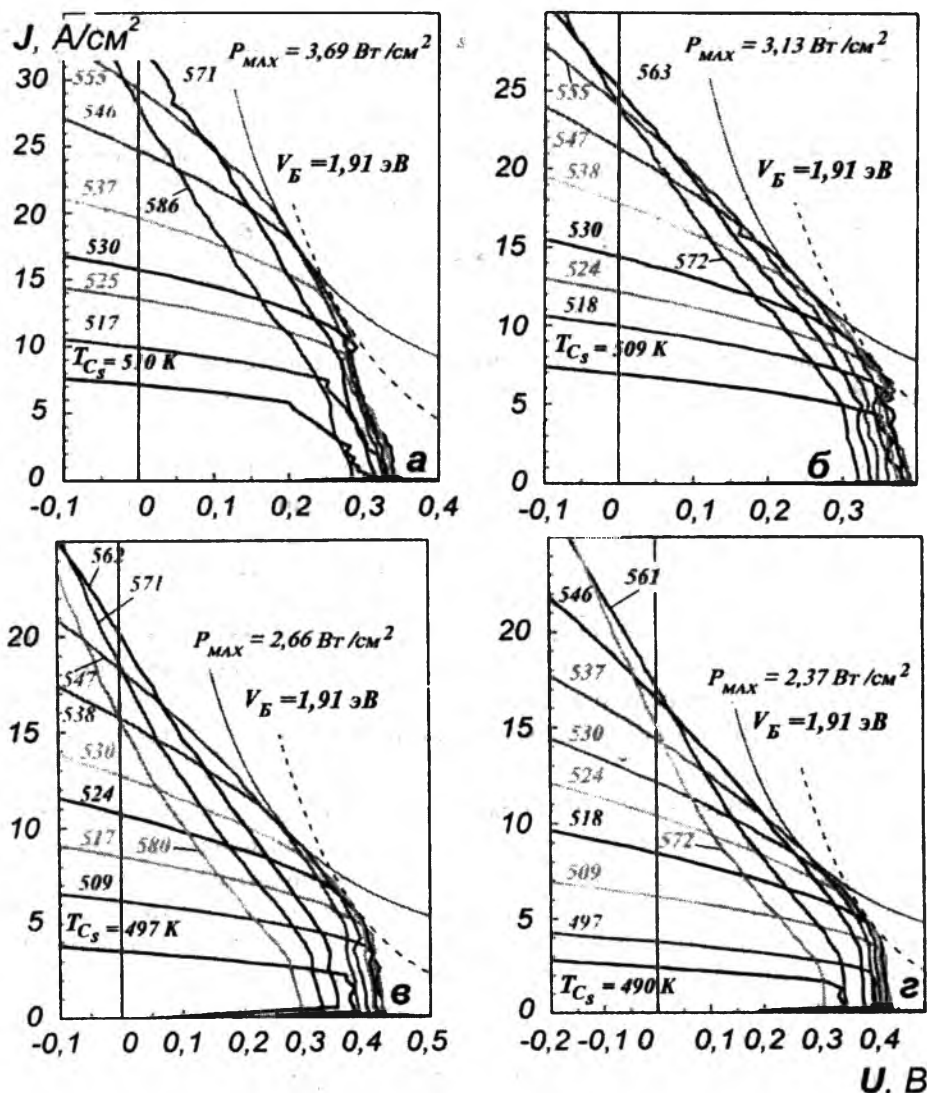
коллекторные материалы с никелевым покрытием — минимальная работа выхода в рабочих условиях преобразователя 1,5 эВ, эффективная — 1,52 эВ, из сплава ВХ2У — 1,3 и 1,4 эВ соответственно.

Наблюдаемое в измерениях с эмиттером из монокристалла вольфрама W(110) наибольшее по сравнению с эмиттерами из сплава МРФ и с платиновым покрытием на молибдене изменение вакуумной работы выхода $\pm 0,15$ эВ связано с повышенной чувствительностью плавленого монокристалла к влияющим эмиссионно-активных примесей, поступающих на электроды из межэлектродной среды в различных режимах при температурной эволюции рабочих параметров.

Многopараметрическая оптимизация вольт-амперных по температуре коллектора и межэлектродному зазору для изученных показала, что оптимальный зазор составляет 0,4—1 мм. Чем ниже температура эмиттера, тем ближе к правой границе диапазона.

Время проведения собственно многopараметрической оптимизации и регистрации характеристик соответствующих электродных пар обычно не превышало 100 ч, полное время работы с цезиевой межэлектродной средой —

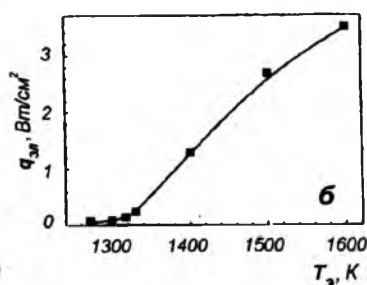
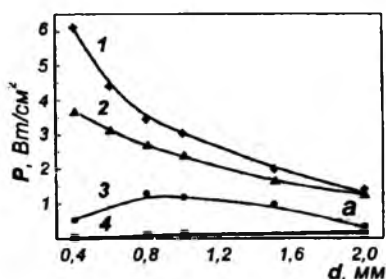
Р и с. 3. Зависимость от параметра Рейзора работы выхода эффективных коллекторов из никеля (а), полученная методом обратной эмиссии при $T_s = 1397$ К, $T_k = 745-978$ К, $T_{Cs} = 523$ К, $d = 0,5$ мм (1), в квазивакуумном режиме при $T_s = T_k = 800$ К, $T_{Cs} = 339-532$ К, $d = 0,1$ мм (2), и сплава ВХ2У (б) в квазивакуумном режиме при $T_s = T_k$, $T_{Cs} = 509$ К, $d = 0,1$ мм (1), методом характерных точек при $T_s = 1400$ К, $T_{Cs} = 523$ К, $d = 1$ мм (2, 3)



Р и с. 4. Вольт-амперные характеристики термоэмиссионного преобразователя с электродной парой платина—сплав ВХ2У (пара К17) в низкотемпературных режимах работы при $T_s = 1499 K$, $T_c = 824 K$, $d = 0,4$ мм (а), $1500 K$, $821 K$, $0,6$ мм (б), $1501 K$, $813 K$, $0,8$ мм (в), $1500 K$, $816 K$, 1 мм (г) ($T_{cs} = var$)

300—400 ч. Эмиссионные характеристики электродов и вольт-амперные характеристики эффективных электродных пар материалов оставались стабильными и хорошо воспроизводились как в ходе текущих измерений, так и после 3—6 мес консервации преобразователя.

Наиболее привлекательной электродной парой, относительно просто внедряемой в новые проекты разработки низкотемпературных термоэмиссионных электрогенерирующих систем различного назначения, на текущем этапе НИОКР, по нашему мнению, является платиновое покрытие на молибдене в качестве эмиттера—сплав ВХ2У в качестве коллектора (рис. 5). Следует отметить, что для этой электродной пары материалов, обеспечившей в лабораторном преобразователе достижение $V_6 = 1,9$ эВ, нижняя граница T_s , при которой еще возможна генерация электрической мощности в рабочем квадранте характеристик, находится на уровне $>1250 K$, что является привлекательным для низкотемпературного приложения термоэмиссии.



Р и с. 5. Зависимость выходных электрических характеристик термоэмиссионного преобразователя с электродной парой платиновое покрытие—сплав ВХ2У от межэлектродного зазора при температуре эмиттера 1600 (1), 1500 (2), 1400 (3), 1300 К (4) (а) и температуры эмиттера при температуре коллектора 830—850 К, $d = 0,8$ мм, $P_{Cs} = \text{opt}$ (б)

Обсуждение результатов исследований. При испытаниях термоэмиссионных преобразователей с коллектором из сплава ВХ2У получены высокие выходные электрические характеристики: максимальная плотность выходной мощности составила $18,5 \text{ Вт/см}^2$ при температуре 2000 К для эмиттера из монокристалла вольфрама W(110) и $6,1 \text{ Вт/см}^2$ при 1600 К для эмиттера с платиновым покрытием на молибдене. На электродной паре платина — сплав ВХ2У к настоящему времени достигнут наиболее низкий барьерный индекс 1,9 эВ. Минимальная эффективная работа выхода коллектора составила 1,4 эВ, что соответствует нижней границе.

Следует отметить, что фоновое загрязнение поверхности коллектора из сплава ВХ2У такими элементами, как фосфор, сера, кальций и др., приводит к эмиссионной неоднородности электрода и соответственно повышает минимальную работу выхода в парах цезия. Выделение кислорода из оксидов типа Y_2O_3 , содержащихся в коллекторных материалах типа ВХ2У, усиливает массоперенос эмиттерного материала на коллектор, что в конечном итоге может приводить к увеличению эмиссионного контраста на коллекторе и ухудшению выходных электрических характеристик (повышению барьерного индекса). Соответственно устранение этих нежелательных процессов позволит снизить барьерный индекс дополнительно на 0,1—0,15 эВ. В общем случае, кроме потенциального рельефа на коллекторе, безусловно влияющего на барьерный индекс, на него может также влиять геометрический рельеф поверхности и соответствующее ему изменение коэффициента отражения электронов, поступающих из плазмы на коллектор [18].

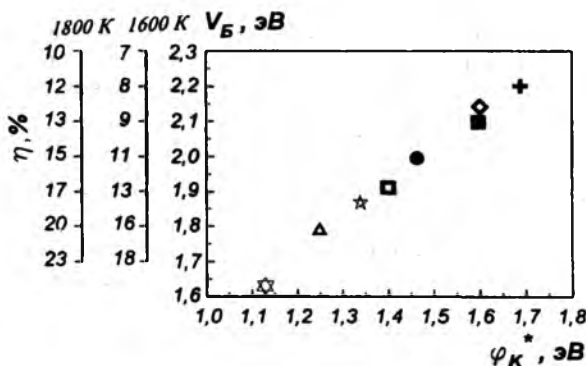
При многопараметрической оптимизации характеристик низкотемпературных термоэмиссионных преобразователей с изученными эффективными электродными материалами установлен больший по сравнению с традиционными средне- и высокотемпературными режимами оптимальный межэлектродный зазор 0,4—1 мм. Разрядные режимы работы преобразователей с эффективными электродными материалами, например, платина — сплав ВХ2У являются конкурентоспособными по отношению к неразрядным, требующим для своей реализации межэлектродный зазор в этой области 5—10 мкм. В частности, по данным работы [19] при $T_э = 1400$ К и $d = 5$ мкм удельная электрическая мощность составит $1,3\text{—}1,5 \text{ Вт/см}^2$. В нашем случае для разрядного режима с электродной парой платина — сплав ВХ2У при $T_э = 1400$ К получена удельная электрическая мощность $1,4 \text{ Вт/см}^2$ при межэлектродном зазоре 0,8 мм, что значительно облегчит изготовление электрогенерирующих систем большой площади и сложной геометрии, а также будет способствовать улучшению проводимости межэлектродного зазора при откачке неконденсирующихся газов из межэлектродной среды ЭГК и соответственно увеличению ресурса.

Важной является разработка более совершенного, чем из сплава ВХ2У, коллектора. Перед разработчиками промышленного коррозионно-стойкого хромованадиевого сплава ВХ2У, созданного в свое время для нетермоэмиссионных условий работы в котельных

и подобных им агрегатам, не ставилась задача по достижению чистоты по примесям и однородности по работе выхода (по потенциальному рельефу), хотя они оказались приемлемыми для текущего этапа НИОКР в термоэмиссии.

Дальнейшие усилия по созданию оптимальной металл-кислородной системы для коллектора будут направлены на разработку эмиссионно-однородной, свободной от эмиссионно-активных отравляющих примесей ванадий-кислородной системы в состоянии субоксид типа V_3O или V_6O , формируемой непосредственно в рабочих условиях преобразователя. Она может оказаться одновременно системой с улучшенными по сравнению со сплавом ВХ2У эмиссионно-адсорбционными свойствами и, кроме того, двумерной, хорошо растворяющей кислород и кислородсодержащие примеси межэлектродной среды геттерной системой на коллекторе [7].

На рис. 6 приведены как достигнутые выходные электрические характеристики и электродный к.п.д., так и ожидаемые, которые мы связываем с обоснованием выбора новых металл-кислородных систем на коллекторах, оптимизацией рабочего процесса в межэлектродной среде с минимально возможными в разрядных режимах потерями напряжения и поддержанием неизменным состава межэлектродной среды в течение назначенного срока работы космических ЯЭУ.



Р и с. 6. Обобщенные результаты исследований и испытаний: + — $W_{\phi_t} <111>$ ВН-2 (в рамках НИР по программе «Топаз»); ◇, ■ — модифицированные фасетированием и имплантацией электродные материалы для энергонапряженных ЭГК [7]; □ — платина—сплав ВХ2У; Δ — ожидаемый уровень ванадий-кислородной системы на коллекторе; ● — монокристаллические МРФ—ВХ2У, платина—никель; ☆ — молибден—никель [20]; ☆ — $W_{x,\lambda}(110)-WO_3$ [21]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Визгалов А.В., Миронов В.С., Саввов Р.В. и др. Свойства поверхности эмиттерных оболочек с монокристаллическим вольфрамовым покрытием и их влияние на характеристики термоэмиссионных преобразователей. — В кн.: Межд. конф. специалистов по термоэмиссионному преобразованию энергии. Эйндховен, Нидерланды, 1989, с. 105—112.
2. Ярыгин В.И., Визгалов А.В., Скребова З.Б. и др. Эмиттерные оболочки для энергонапряженных термоэмиссионных электрогенерирующих каналов. — В кн.: 27-я Межд. конф. по инженерным проблемам преобразования энергии. Сан-Диего, США, 1992, с. 3.519—3.522.
3. Ярыгин В.И. Электродные материалы для энергонапряженных электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя. — В кн.: Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. Часть 3. Космические термоэмиссионные ядерные энергетические установки и электроракетные двигатели большой мощности. М., РКК «Энергия» им. С. П. Королева, 1998, с. 105—115.
4. Ярыгин В.И., Ионкин В.И., Купцов Г.А. и др. Космические термоэмиссионные ядерные энергетические установки нового поколения с вынесенными из активной зоны реактора электрогенерирующими системами. — См. наст. вып., с. 22—34.
5. Иориш А.Е., Кацман Я.А., Птицын С.В. и др. Основы технологии производства электровакуумных приборов. Л.: Энергия, 1971. 312 с.
6. Волкова З.П., Хотин В.М. Технология электровакуумных материалов. Л.: Энергия, 1972. 216 с.
7. Ярыгин В.И. Электродные материалы термоэмиссионных преобразователей энергетических установок различного назначения. Автореф. дис. на соискание ученой степени д.т.н. Обнинск, ФЭИ, 1999. 66 с.
8. Рейзор Н.С. Загадка коллектора. — В кн.: 2-я Межд. конф. специалистов по ТЭП, Гетеборг, Швеция, май 1993, с. 1—22.
9. Дипла Дж. Последние разработки по наислороженным термоэмиссионным преобразователям. — В кн.: Межд. семинар по функционально градиентным материалам, Япония, 1996, с. 639—646.

10. Фукуда Р., Касуга Я., Като К. и др. Разработка наислороженных термоэмиссионных преобразователей энергии, использующих в качестве коллектора напыленные металлические окислы. — В кн.: 16-й Межд. симп. по космическим ядерным энергетическим и двигательным установкам. Альбукерке, США, январь 1999, с. 7.
11. Фукуда Р., Касуга Я., Като К. Разработка оксидов переходных металлов для коллекторов термоэмиссионных преобразователей. — В кн.: Межд. семинар по функционально градиентным материалам, Япония, 1996, с. 650—660.
12. Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов (справочник). Киев: Наукова думка, 1982. 400 с.
13. Быковский Ю.А., Неволин В.Н. Лазерная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1985. 129 с.
14. Андриашин А.В., Мелета Е.А., Миронов В.С. и др. Базовый комплекс аппаратных и программных средств для проведения экспериментальных исследований лабораторных ТЭП. — В кн.: Избранные труды ГНЦ РФ—ФЭИ, 1997, с. 69—76.
15. Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Смольникова Г.И. и др. Банк данных вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя. — См. наст. вып., с. 71—74.
16. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1967. 408 с.
17. Гордов А.Н. Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971. 192 с.
18. Гунько В.М. Влияние квантового коэффициента отражения и пятнистости поверхности на эмиссию геометрически развитого электрода. — Журн. техн. физики, 1980, т. 50, № 2, с. 311—315.
19. Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Еремин С.А. и др. ТЭП с межэлектродным зазором до 5 мкм для преобразователя, вынесенного из активной зоны реактора, и солнечных энергетических установок. Тезисы докл. 5-й Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе», Подольск, март 1999, с. 88.
20. Svenson R., Holmild L., Kennel E. Experiments with different collector hole matrices in a thermionic energy converter. — In: Proc. 2nd Specialist Conf. Thermionic Energy Conversion II, Goeteborg, Sweden, May 5—7, 1993, p. 93—95.
21. Lieb D., Gunther B., Rufe F. Collectors studies with oxygen additive converters. — In: 3rs Intern. Conf. on Thermionic Electric Power Generation. Eindhoven, the Netherlands, 1975, paper 1—1.

УДК 621.362: 537.533

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ОДНОЭЛЕМЕНТНЫХ ЭГК НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАБОТЫ

Корюкин В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Одноэлементный электрогенерирующий канал космической ЯЭУ «Енисей» [1] представляет собой единый протяженный элемент с ядерным топливом внутри. Полость межэлектродного зазора между эмиттером и коллектором с керамическими дистанционными между ними отделена от центрального топливного канала. Поэтому реальные условия работы канала и результаты, полученные в модельных вакуумных условиях, пригодны для трактовки процессов в межэлектродном зазоре.

К основным процессам, протекающим на начальном этапе работы ЭГК, относятся в первую очередь адсорбция атомов остаточных газов на поверхности электродов и перенос вещества эмиттера на коллектор через межэлектродный зазор. Адсорбцию атомов из газовой фазы на поверхность электродов можно только моделировать, так как это связано с трудностями контроля остаточных газов в одноэлементных протяженных каналах. Состав приповерхностных областей электродов, в которых могут накапливаться чужеродные атомы, можно контролировать путем измерения элементного состава поверхностей электродов.

Наиболее интенсивные изменения эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов происходят на этапе термовакuumной подготовки и в начале работы ЭГК [2, 3]. Среди них наиболее значимым является массоперенос атомов материала эмиттера на коллектор.