

04;12

Перспективы увеличения мощности дуговых цезий-кислородных термоэмиссионных преобразователей с вольфрамовыми электродами при повышенных эмиттерных температурах

© В.П. Кобяков, А.Г. Каландаришвили

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: koba@ism.ac.ru

(Поступило в Редакцию 15 июля 2002 г.)

Исследованы характеристики экспериментальных термоэмиссионных преобразователей с эмиттерами из кислородсодержащего монокристаллического вольфрама, полученного по „хлоридной“ газофазной технологии. Такие эмиттеры, кроме своей основной функции в действующем преобразователе, выполняли роль „внутреннего“ источника кислорода. Сделана попытка расширения области эмиттерных температур в сторону увеличения для достижения максимальной выходной мощности преобразователя с использованием нового эмиттерного материала. Изучена эффективность использования монокристаллического „безкислородного“ вольфрамового коллектора в сравнении с коллекторами из поликристаллического вольфрама и ниобиевого сплава Сб-1.

Введение

В настоящее время перспективность концепции дугового цезиевого термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) с монокристаллическим вольфрамовым эмиттером, по-видимому, не вызывает сомнений [1]. Однако не до конца решенными остаются вопросы, связанные с введением в межэлектродное пространство кислородной добавки для повышения выходной мощности ТЭП и с выбором наиболее эффективного материала коллектора. В [2] предполагалось вводить кислород из внутреннего источника [3–5], каким является монокристаллический кислородсодержащий вольфрам. В данной работе в экспериментальных ТЭП был использован этот новый эмиттерный материал с „высокотемпературной“ работой выхода 5.7 eV.

В качестве материала коллектора наряду с традиционным ниобиевым сплавом, содержащим около 1% циркония (типа Сб-1), в [6–11] рассматривались различные варианты окисленных тугоплавких металлов как резерв повышения выходной мощности ТЭП. Вместе с тем уже в одной из ранних работ [12] указывалось, что в действующем ТЭП поверхность любого коллектора будет неизбежно покрываться продуктами испарения материала эмиттера. В связи с этим в [13] были исследованы варианты ТЭП с поликристаллическим вольфрамовым коллектором. В данной работе в качестве материала коллектора рассмотрен монокристаллический вольфрам в сравнении с поликристаллическим вольфрамом и с ниобиевым сплавом Сб-1. Ранее коллектор из монокристалла вольфрама был использован в экспериментальном ТЭП с цезий-бариевым наполнением для достижения максимальной адсорбции бария [14].

Представляло также интерес исследование выходных характеристик экспериментальных цезий-кислородных ТЭП с вольфрамовыми электродами при повышенных

эмиттерных температурах. Этот путь увеличения выходной мощности ТЭП является „легким“ со всех точек зрения, кроме материаловедческой. Так, в [15] расчетными оценками и экспериментами на безкислородной модели дугового цезиевого ТЭП цилиндрической геометрии (материал эмиттера — карбид циркония, материал коллектора — алюминий) было показано, что при межэлектродном зазоре около 5 mm удельные мощности на уровне $P \geq 40 \text{ W/cm}^2$ могут быть получены при температурах эмиттера $T_e \geq 2500 \text{ K}$. Было продемонстрировано, что в этих условиях величина КПД превышает 16%, достигая при $T_e = 3050 \text{ K}$ и $P = 106 \text{ W/cm}^2$ значения 25%. В данной работе была сделана попытка приблизиться к этим температурам, правда, значительным успехом она не увенчалась.

Исследования, результаты которых представлены в данной работе, направлены на получение дополнительной информации по всем трем, отмеченным выше аспектам.

Методика эксперимента

Исследования были выполнены на экспериментальных цилиндрических мономодульных ТЭП. Эмиттеры этих ТЭП были изготовлены по ранее разработанной газофазной хлоридной технологии [3], обеспечивающей получение трубчатых монокристаллов вольфрама, ограненных снаружи шестью гранями (110) и содержащих повышенное количество кислорода ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ wt} \%$), присутствующего в виде квазитвердого раствора. Такие эмиттеры характеризуются крутой температурной зависимостью работы выхода и при температурах выше 2000 K их работа выхода достигает значений 5.6–5.7 eV [2,5]. Для использования в ТЭП с цилиндрической геометрией такие монокристаллические трубные заготовки обрабатыва-

лись на токарном станке, после чего с помощью электрополировки в щелочном электролите с их поверхности удалялся дефектный слой (около $100\ \mu\text{m}$). После этих операций работа выхода снижалась до $5.2\ \text{eV}$. К эмиттеру с обеих сторон с помощью электронно-лучевой сварки приваривались трубчатые хвостовые детали, одна из которых имела „глухой“ конец. На хвостовых деталях имелись дистанционирующие выступы, которые при сборке модуля упирались в керамические пояски коллекторного узла и задавали размер межэлектродного зазора (МЭЗ). В эмиттерную полость впоследствии вставлялся трубчатый вольфрамовый нагреватель сопротивления. В торце эмиттера заранее высверливалось отверстие для зачеканивания вольфрам-рениевой термопары (ВР 5/20).

Для изготовления коллекторного узла использовалась технология газостатического прессования трехслойного трубчатого пакета [16,17]. После газостатического прессования пакета с помощью токарной обработки удалялся внутренний металлический слой, выполнявший роль „рубашки“, через которую производилось уплотнение керамического слоя и одновременно осуществлялась диффузионная приварка коллектора и керамики к наружному металлическому слою. В результате удаления „рубашки“ оказывались открытыми керамический и коллекторный слои, последний подвергался финишной электрополировке. Таким образом, внутренний слой коллекторного пакета был составным. В центральной части, которая после сборки должна была оказаться напротив эмиттера, располагался сам коллектор. Остальная часть коллекторного узла имела внутреннее керамическое электроизоляционное покрытие. В качестве коллекторного слоя в данной работе использовался трубчатый монокристаллический вольфрам с осевой ориентацией (110), полученный с помощью хлоридной газофазной технологии без введения кислорода. Для сравнения были использованы коллекторные слои из поликристаллического вольфрама и ниобиевого сплава Сб-1 (1 mass % Zn + 0.1 wt % C). В коллекторный узел сборки вваривался патрубок для откачки модуля и для напуска цезиевого пара, а к открытому концу узла приваривался трубчатый вакуумноплотный гермоввод с переходом Nb–Al₂O₃–Nb.

При сборке модуля в коллекторную полость, заглушенную с одного конца, вставлялся также заглушенный с одного конца эмиттерный узел с зачеканенной в эмиттер термопарой ВР 5/20. С открытого конца хвостовая деталь эмиттерного узла имела расширение, диаметр которого был согласован с диаметром гермоввода, приваренного к коллекторному узлу. После полного вставления эмиттерного узла эмиттер оказывался напротив коллектора, расстояние между ними задавалось дистанционирующими выступами (в данном случае величина МЭЗ была $0.25\text{--}0.30\ \text{mm}$), а расширенный конец узла плотно входил в цилиндрическую ниобиевую манжету гермоввода. С помощью электронно-лучевой сварки торцы манжеты гермоввода приваривались кольцевым швом

к расширенному участку хвостовой детали эмиттерного узла. Тем самым сборка модуля завершалась.

Исследуемый модуль устанавливался внутри рабочего участка испытательного стенда, на котором проводились измерения его выходных характеристик. При этом модуль был электрически изолирован от деталей рабочего участка керамическими втулками. Конструктивно рабочий участок состоял из трех коаксиальных полых цилиндров, образующих две независимые цилиндрические полости. К коллектору модуля непосредственно примыкала внутренняя полость рабочего участка, предназначенная для газового охлаждения. Периферийная полость рабочего участка являлась рубашкой водяного охлаждения. Изменение давления в газовой полости, а также расхода воды через рубашку позволяло в достаточно широких пределах влиять на условия теплопередачи от работающего модуля к охлаждающей среде, а тем самым регулировать температуру коллектора. Для достижения требуемых тепловых режимов испытаний на наружной поверхности рабочего участка устанавливались электронагреватели из нихромовой проволоки в изоляции из кварцевых трубок. Установка и поддержание мощности этих нагревателей производились регуляторами температуры ВРТ-3 с контролем тока и напряжения. Контроль температуры осуществлялся термопарами хромель-алюмель (ХА), установленными на внешней поверхности рабочего участка и на модуле. Характерные интервалы параметров рабочего участка: температура $T = 773\text{--}1073\ \text{K}$, давление в газовой полости $P = 0.7\text{--}700\ \text{Pa}$, расход воды в рубашке охлаждения $G = 0.5\ \text{l/s}$.

Вакуумно-цезиевая система (ВЦС) обеспечивала требуемое разрежение в межэлектродном зазоре (МЭЗ) перед напуском в него цезиевого пара, поддержание и регулирование в требуемых пределах давления цезиевого пара, а также конденсацию цезия в определенном месте на завершающем этапе испытаний. Основным элементом ВЦС является цезиевый термостат, который представляет собой двухкамерную емкость, одна часть которой заполняется цезием, а другая предназначена для потока охлаждающей водопроводной воды. Цезиевый объем термостата соединен с МЭЗ модуля и с системой форвакуумной и высоковакуумной откачки. Сообщение термостата с МЭЗ модуля и с вакуумными коммуникациями (поочередно или одновременно) обеспечивается трехходовым вентилем, установленным на Т-образном пересечении трубопроводов. Термостат и коммуникации ВЦС на всем своем протяжении оснащены внешними электронагревателями, которые управляются регуляторами температуры ВРТ-3.

Остаточное давление в МЭЗ модуля измерялось вакуумметром ВИТ-3. Принятая методика подготовки рабочего участка обеспечивала достижение статического остаточного давления в МЭЗ не более $(1\text{--}3) \cdot 10^{-4}\ \text{Pa}$. Давление цезиевого пара в МЭЗ регулировалось путем изменения температуры термостата и поддерживалось в

пределах 300–700 Ра. Температура термостата и трубопроводов контролировалось термопарами ХА.

После обезгаживания всей системы и работы модуля в режиме преобразования в течение примерно 100 h снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) i , $A = f(u, V)$ при различных температурах эмиттера (T_e) и коллектора (T_c). После завершения измерений характеристик модуля производилось отключение нагревателей ВЦС. При снижении температуры термостата до $T = 320\text{--}350\text{ К}$ в холодильник термостата подавалась проточная вода, что обеспечивало конденсацию цезиевого пара в термостате.

Результаты

На рис. 1 в качестве примера даны огибающие ВАХ и соответствующие зависимости максимальной выходной удельной электрической мощности от выходного напряжения $P = f(u)$ для модуля с электродами из монокристаллического вольфрама при $T_e = 2100\text{ К}$ и $T_c = 800\text{--}1300\text{ К}$. По результатам измерений ВАХ

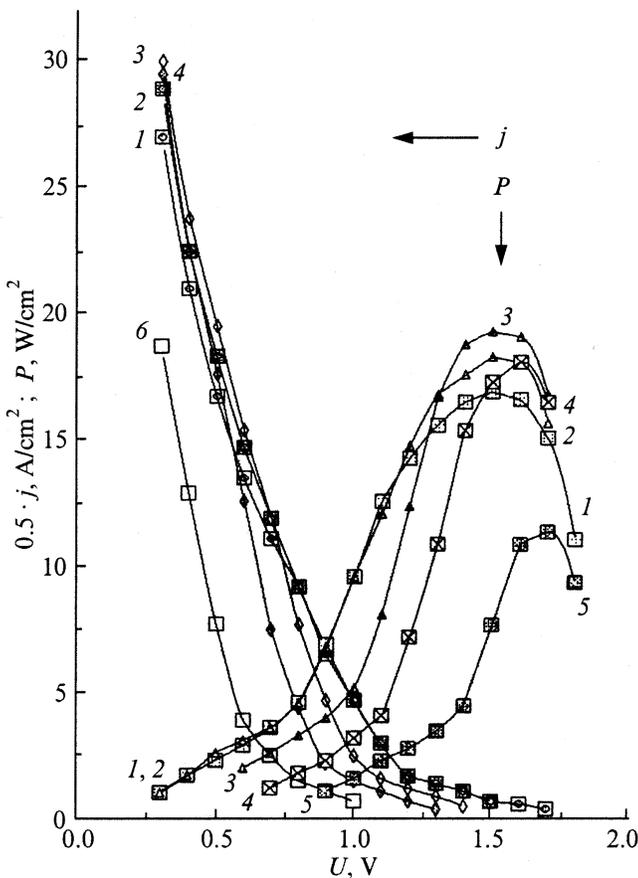


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики экспериментального дугового цезий-кислородного ТЭП с электродами из монокристаллического вольфрама. Температура эмиттера 2100 К. Температуры коллектора: 1 — 800, 2 — 900, 3 — 1000, 4 — 1100, 5 — 1200, 6 — 1300 К.

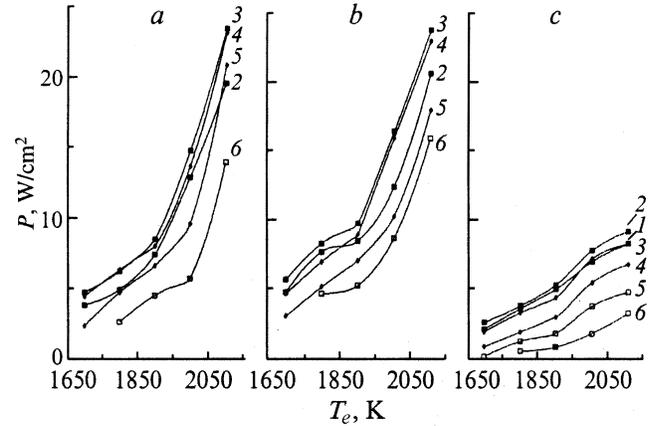


Рис. 2. Зависимости $P = f(T_e)$ для модулей с различными материалами коллектора: *a* — W(111), *b* — W, *c* — ниобиевый сплав Сб-1. Коллекторные температуры: 1 — 800, 2 — 900, 3 — 1000, 4 — 1100, 5 — 1200, 6 — 1300 К.

строились представленные на рис. 2 и 3 зависимости $P = f(T_e)$ и $P = f(T_c)$ для модулей с различными коллекторами.

При рассмотрении данных рис. 2 можно сделать ряд заключений. Во-первых, уровень выходной мощности модулей с вольфрамовыми коллекторами более чем в два раза превышает таковой для модуля с коллектором из ниобиевого сплава (ср. графики *a* и *b* с графиком *c*). Во-вторых, эффективность вольфрамового коллектора в отличие от эмиттера практически не зависит от того, используется ли вольфрам в монокристаллическом или поликристаллическом состоянии (ср. между собой графики *a* и *b*). В-третьих, зависимости выходной мощности от температуры эмиттера во всех случаях состоят из двух участков. Приблизительно до температур 1900–1950 К кривые слабо возрастают либо даже стремятся к выполаживанию. При более высоких температурах наблюдается очень резкое возрастание генерируемой мощности. Если в случае коллектора из ниобиевого сплава возрастание быстро сменяется стремлением к выходу на плато, то для модулей с вольфрамовыми коллекторами во всем исследованном интервале температур эмиттера кривые продолжают стремительно нарастать. К сожалению, возможности стенда не позволили увеличить температуру эмиттера выше 2100 К, однако, судя по ходу кривых на графиках *a* и *b*, можно полагать, что до выхода на плато еще очень далеко.

Зависимости $P = f(T_e)$ на рис. 3 во всех случаях имеют экстремальный характер. Максимумы кривых на графике *c* (коллектор из ниобиевого сплава) соответствуют коллекторной температуре 900 К. Для модулей с вольфрамовыми коллекторами (графики *a* и *b*) максимумы кривых приходятся на коллекторную температуру не ниже 1000 К.

Обсуждение результатов

Как было указано во Введении, одна из основных целей работы состояла в оценке эффективности использования в качестве эмиттерного материала цезий-кислородных ТЭП кислородсодержащего монокристаллического вольфрама „газофазного“ происхождения [3]. Этот новый эмиттерный материал обладает высокими адсорбционно-эмиссионными свойствами и к тому же может служить в действующем ТЭП источником кислорода, поступающего при нагреве эмиттера из его объема непосредственно на эмиттирующую поверхность [4]. Рассмотренные в предыдущем разделе результаты испытаний экспериментальных модулей (рис. 1–3) непосредственно демонстрируют различные стороны кислородного эффекта. Большое впечатление производят резко возрастающие температурные зависимости генерируемой мощности (рис. 2) при эмиттерных температурах выше 1900–1950 К для модулей с вольфрамовыми коллекторами. Как показано в [4,5], при температурах выше 1900 К резко усиливается выход кислорода из объема на поверхность вольфрамового эмиттера и происходит соответствующее увеличение работы выхода этой поверхности. При наличии цезиевого пара над поверхностью эмиттера последний более эффективно адсорбируется такой поверхностью со всеми вытекающими последствиями. В [4] при анализе температурной зависимости выходной мощности экспериментальных ТЭП с эмиттерами из кислородсодержащего монокристаллического вольфрама было показано, что представление этой зависимости в арениусовых координатах приводит с хорошим приближением к прямой линии. Полученное из наклона этой прямой значение кажущейся энергии активации оказалось близким к величинам, характеризующим энергию активации диффузии газовых примесей в вольфраме.

На рис. 4 температурная зависимость выходной мощности в арениусовых координатах построена по усред-

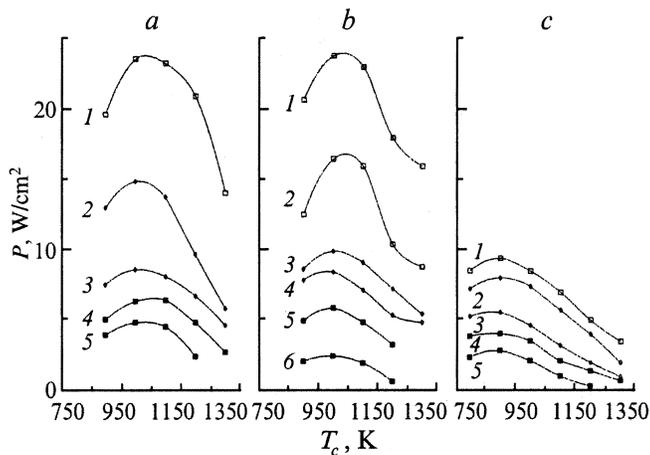


Рис. 3. Зависимости $P = f(T_c)$ для модулей с различными материалами коллектора: *a* — $W\langle 111 \rangle$, *b* — W , *c* — ниобиевый сплав Сб-1. Эмиттерные температуры: 1 — 2100, 2 — 2000, 3 — 1900, 4 — 1800, 5 — 1700, 6 — 1600 К.

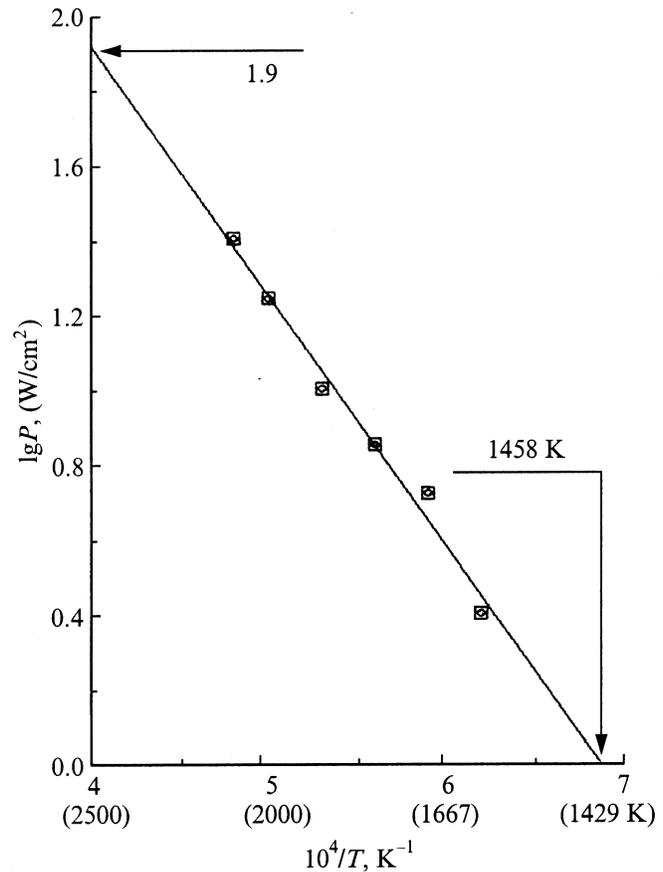


Рис. 4. Политерма (в арениусовых координатах) выходной мощности „кислородсодержащих“ модулей (среднее по результатам данной работы). Стрелками отмечены экстраполированные значения.

ненным результатам для модулей с кислородсодержащими вольфрамовыми эмиттерами. Можно видеть, что экспериментальные точки неплохо ложатся на прямую линию (коэффициент корреляции $r = 0.984$), что позволило сделать небольшую экстраполяцию. Оказалось, что нулевой выходной мощности соответствует температура эмиттера 1458 К. Это значение лежит как раз в середине интервала температур (1400–1500 К), обычно указываемых для начала заметной электронной эмиссии с поверхности вольфрама. Поскольку в данной работе экспериментальные возможности испытательного стенда ограничивали температуру эмиттера величиной 2100 К, представляла также интерес экстраполяция в сторону более высоких температур. Как видно из данных рис. 4, для $T_e = 2500$ К экстраполированное значение выходной мощности достигает 80 W/cm^2 .

Интересно сравнить результаты данной работы с ранее выполненными исследованиями экспериментальных цезий-кислородных ТЭП, а также высокотемпературных ТЭП (рис. 5). Наиболее полные данные были представлены в работах 30-летней давности. В [18] исследовались цилиндрические модули с эмиттером из „газофазного хлоридного“ вольфрама с текстурой $\langle 110 \rangle$. В отличие от материала эмиттера, использованного в

данной работе, такой вольфрам не является монокристаллическим, кроме того, он не содержит кислорода (по крайней мере, содержание кислорода в нем не выше 10^{-5} wt %). На коллектор было нанесено сублимацией в вакууме молибденовое кислородсодержащее покрытие. Максимальное значение выходной мощности, среднее по пяти модулям, составляло 9 W/cm^2 . В [7] приведены результаты одного из наиболее тщательно выполненных исследований цезий-кислородных модулей. К сожалению, геометрия электродов здесь была плоскопараллельной. Материал эмиттера — „газофазный хлоридный“ вольфрам с текстурой $\langle 110 \rangle$ имел работу выхода 4.85 eV . Материал коллектора — нетекстурованный поликристаллический вольфрам. Эмиттер предварительно электрополировался и обезуглероживался путем прогрева в „кислородном“ вакууме при $T_e = 1900 \text{ K}$. Производился напуск цезиевого пара и снимались ВАХ, после чего цезий удалялся. Производилось оксидирование внутренних поверхностей модуля при $T_e = 1073 \text{ K}$ и измерялась работа выхода в зависимости от T_c . С ростом T_c наблюдалось увеличение тока насыщения эмиттера, что непосредственно свидетельствовало о поступлении кислорода с коллектора на поверхность эмиттера. Сравнение ВАХ, снятых на одном и том же модуле до и после оксидирования, показало значительное увеличение выходной мощности. Например, при одинаковой плотности тока 10 A/cm^2 выходное напряжение увеличивалось почти вдвое, с 0.2 до 0.46 V . Приводятся также соответствующие зависимости выходной мощности от T_e до и после оксидирования (кривые 3, 4 на рис. 5). Важно отметить, что в [7] были проведены длительные испытания цезий-кислородного модуля, которые показали, что в пределах нескольких процентов мощность модуля была стабильной в течение 1400 h работы.

Цитируемые результаты и наши данные (кривая 1) показывают, что все цезий-кислородные ТЭП в интервале температур $1500\text{--}1900 \text{ K}$ генерируют приблизительно одинаковую выходную мощность, вдвое выше, чем ТЭП, в которых количество присутствующего кислорода недостаточно для проявления „кислородного эффекта“ (ср. на рис. 2 графики *a* и *b* с графиком *c*, а также на рис. 5 кривую 3 с кривой 4). К сожалению, в доступной литературе высокотемпературные данные для цезий-кислородных ТЭП отсутствуют. Наши же результаты (кривая 1 на рис. 5) показали, что при температурах выше $1900\text{--}1950 \text{ K}$ выходная мощность резко возрастает. По имеющимся в литературе сведениям для высокотемпературных безкислородных модулей [15,19] (рис. 5, кривые 5 и 6) можно говорить о менее крутом возрастании мощности с температурой. Можно видеть, что при температуре 2500 K характеристики этих модулей в среднем почти втрое ниже, чем в нашем случае. Судя по ходу кривых, при дальнейшем повышении температуры разница будет, по-видимому, увеличиваться.

Таким образом, рассмотренные данные свидетельствуют о том, что кислородсодержащий монокристаллический вольфрам является эффективным эмиттерным

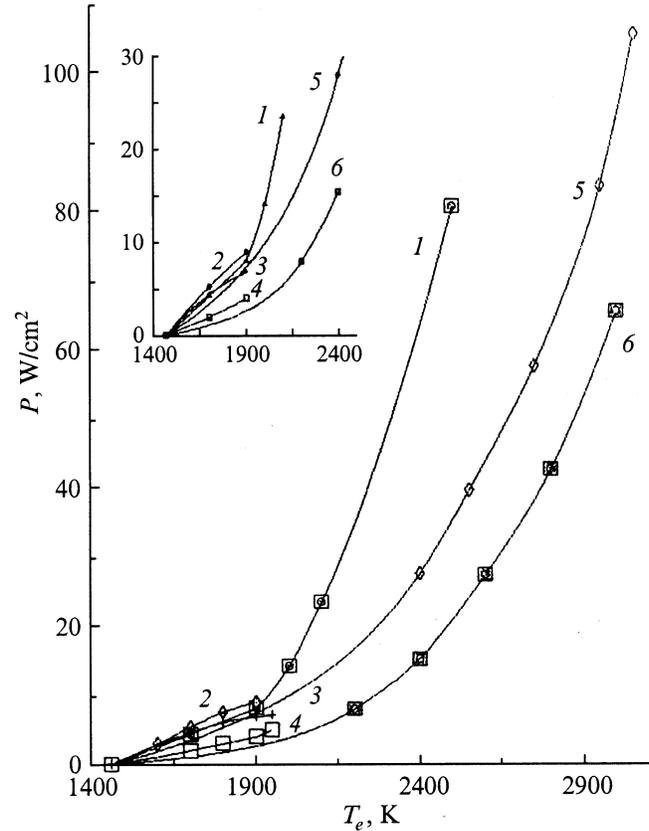


Рис. 5. Политерма выходной мощности „кислородсодержащих“ модулей: 1 — результаты данной работы для модуля с монокристаллическим вольфрамовым коллектором (верхняя точка экстраполирована), 2 — [6], 3, 4 — [7], 5 — [15], 6 — [21]. Все кривые экстраполированы на нулевую мощность.

материалом для цезий-кислородных дуговых ТЭП. При этом его потенциал используется тем полнее, чем выше уровень эмиттерных температур.

Проблему, касающуюся выбора коллекторного материала ТЭП, в свете полученных результатов необходимо дифференцировать. Высказанные в начале работы общие соображения на этот счет, касающиеся стационарного состояния поверхности работающего ТЭП, не полностью отражают существо дела. При рассмотрении данных рис. 2 отмечалось, что в случае ниобиевого коллектора в отличие от вольфрамовых кривые $P = f(T_e)$ идут не только на низком уровне мощности, они обнаруживают тенденцию к выходу на плато при температурах выше 2000 K . Здесь уместно сделать акцент на том, что для всех рассматриваемых в данной работе вариантов экспериментальных модулей использовался один и тот же эмиттерный материал — кислородсодержащий монокристаллический вольфрам. И различие результатов определяется только различием материалов коллектора. Из сказанного следует, что использование в „кислородсодержащих“ ТЭП вольфрамовых коллекторов, по-видимому, особо эффективно в том смысле, что они не поглощают кислород, поступающий из эмиттера в МЭЭ.

В этом смысле действительно безразлично, будет этот вольфрам в монокристаллическом или поликристаллическом состоянии. Тот же эмиттер в составе модуля с коллектором из легированного цирконием ниобиевого сплава в два раза менее эффективен, так как кислород из газовой фазы поглощается ниобием и, как показано в [20], необратимо связывается присутствующим в сплаве цирконием в оксид циркония. В результате устанавливается некое стационарное состояние, характеризуемое выходом на плато зависимостей $P = f(T_c)$ (рис. 2).

Таким образом, для цезий-кислородных ТЭП предпочтительны коллекторы, материал которых не поглощает кислород, в частности вольфрамовые коллекторы.

Значительный интерес вызывают зависимости $P = f(T_c)$ на рис. 3. Как было отмечено в предыдущем разделе, весьма важной особенностью цезий-кислородных модулей с вольфрамовыми электродами является значительное повышение оптимальной температуры коллектора. Для „бескислородного“ модуля с коллектором из ниобиевого сплава оптимальная коллекторная температура лежит в районе 900 К (график *c* на рис. 3), а при повышении температуры до 1100 К выходная мощность падает до 7 W/cm^2 . Существование оптимума в общем случае отвечает установлению в ТЭП некоего, весьма сложного стационарного состояния, на которое оказывает влияние множество различных факторов. Для „кислородсодержащих“ модулей с вольфрамовыми электродами оптимум сдвигается в район 1000–1100 К (графики *a* и *b*), а при повышении температуры коллектора на те же 200 К выходная мощность остается на уровне около $18\text{--}20 \text{ W/cm}^2$. В этом еще более сложном случае на установление стационарного состояния оказывают влияние дополнительные факторы, связанные с присутствием кислорода в МЭЗ. Для более детального анализа наблюдаемого эффекта требуется привлечение дополнительного экспериментального материала, который в данной работе не рассматривается.

Поскольку реальные ядерные энергетические установки с термоэмиссионным преобразователем [1] предназначены для работы в космосе, сброс отработанного тепла с коллектора преобразователя осуществляется только излучением, т.е. обязательным элементом всей конструкции является радиатор-излучатель. Повышение температуры радиатора на 200–300 К позволит заметно снизить массогабаритные характеристики теплоизлучающего устройства и всей установки в целом.

Выводы

1. Кислородсодержащий монокристаллический вольфрам является высокоэффективным материалом для эмиттеров цезий-кислородных ТЭП.

2. Максимальная эффективность этого эмиттерного материала может быть достигнута при температурах эмиттера выше 1900 К.

3. Максимальная эффективность цезий-кислородных ТЭП может быть достигнута при использовании коллекторных материалов, не поглощающих кислород.

4. При использовании вольфрама в качестве не поглощающего кислород коллекторного материала оптимальная температура коллектора цезий-кислородных ТЭП повышается до 1000–1100 К, что служит резервом для значительного выигрыша в массогабаритных характеристиках соответствующих энергетических установок.

Авторы выражают благодарность Ю.Л. Элошвили, Б.И. Ермилову, В.Г. Кашия, принимавшим непосредственное участие в изготовлении и испытаниях экспериментальных модулей ТЭП.

Список литературы

- [1] Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Зродников А.В. и др. // Атомная энергия. 1989. Т. 66. № 6. С. 374–377.
- [2] Кобяков В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 169–174.
- [3] Кобяков В.П. // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 3. С. 552–556.
- [4] Кобяков В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 161–168.
- [5] Кобяков В.П., Корюкин В.А., Обрезумов В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 8. С. 169–175.
- [6] Ernst D.M. // IEEE IX Conf. Rec. Thermion. Convers. Specialist. New York, 1970. P. 492–497.
- [7] Lieb D., Ruffeh F. // 3rd Intern. Conf. on Thermion. Electr. Power Generation. FRG, 1972. Vol. 3. P. 1091–1102.
- [8] Lieb D., Goodale D., Briere T. // Proc. 12th Intersociety Energy Conv. Engin. Conf. Washington, 1977. P. 1555–1562.
- [9] Цхакая В.К., Ярыгин В.И. // Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую. Обнинск: Изд-во ФЭИ, 1980. С. 136–159.
- [10] Менабде Н.Е., Цакадзе Л.М. // Тр. 2-й отраслевой конф. „Ядерная энергетика в космосе“. Сухуми: Изд-во СФТИ, 1992. С. 81–90.
- [11] Кобяков В.П., Каландаришвили А.Г. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 8. С. 131–137.
- [12] Большой В.Г., Жаринов А.А. // ЖТФ. 1962. Т. 32. Вып. 2. С. 214–219.
- [13] Morris F. // Proc. 12th Intersociety Energy Conv. Engin. Conf. Washington, 1977. P. 1540–1547.
- [14] Бондаренко В.Д., Крайз М.Б., Лошкарев А.И. и др. // Тез. докл. XIV Всесоюз. конф. по эмиссионной электронике. Секция 1. Ташкент: Фан, 1970. С. 83.
- [15] Крачино Т.В., Мацкевич Т.Л. // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 8. С. 1395–1397.
- [16] Weaver C.V., Ranken W.A. // Thermion. Convers. Specialist Conf. 1969. Carmel. New York, 1969. P. 347–354.
- [17] Fiebelmann P. // Forsh. Ingenieurw. 1972. Bd 38. H. 5. S. 133–138.
- [18] Ernst D.M. // IEEE Conf. Rec. Thermion. Convers. Specialist 9th Annu. Conf. Miami Beach; New York, 1970. P. 492–497.
- [19] Мацкевич Т.Л., Крачино Т.В. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 6. С. 1182–1187.
- [20] Гончиков В.Ч., Кортаев А.Д., Тюменцев и др. // Высококичистые и монокристаллические металлические материалы. М.: Наука, 1987. С. 161–165.