

04;11  
©1993 г.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЭП С КОЛЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НИОБИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭЛЕКТРОДОВ

*А.Г.Каландаршвили, В.Г.Кашня*

Представлены результаты экспериментального исследования ВАХ цилиндрических ТЭП с эмиттером из  $W$  (110) и коллекторами из поликристаллического ниобия и “кислородосодержащего” ниобия при высоких температурах эмиттера ( $T_E = 2000 - 2100$  К) и коллектора ( $T_c = 1000 - 1300$  К). Показано, что оптимальная рабочая температура для коллектора из поликристаллического ниобия составляет 1100 К, а для “кислородосодержащего” ниобия — 1200 К. Максимально генерируемая мощность при  $T_E = 2100$  составляет 8.5 и 17.0 Вт/см<sup>2</sup> соответственно для коллекторов из ниобия и “кислородосодержащего” ниобия. Приведенное в работе семейство ВАХ преобразователей представляют интерес для теплоэнергетического расчета и оптимизации выходных параметров термоэмиссионных электрогенерирующих каналов.

В последнее время в области прямого преобразования тепловой энергии в электричество термоэмиссионным способом большое внимание уделяется разработке высокотемпературных термоэмиссионных преобразователей энергии (ТЭП), которые позволяют создать компактные высокоэффективные энергетические установки. Коэффициент полезного действия высокотемпературных установок будет приближаться к предельно допустимой величине [1]. В качестве эмиттеров таких преобразователей используются электроды из вольфрама с преимущественной ориентацией (110), которые отличаются высокой термостабильностью [2]. Коллекторным материалом часто служит поликристаллический ниобий, который хорошо поглощает активные газы межэлектродной атмосферы преобразователя и значительно уменьшает массоперенос на коллектор [3]. В случае применения в качестве коллектора “кислородосодержащего” ниобия существенно повышается выходная электрическая мощность преобразователя [4,5].

Экспериментальное исследование выходных параметров плоскопараллельного прибора с электродной парой  $W$  (110)–“кислородосодержащий” ниобий [5] показало почти двукратное повышение электрической мощности преобразователя по сравнению с прибором с ниобиевым коллектором.

Однако эти исследования были проведены только на плоскопараллельном преобразователе при сравнительно невысоких температурах эмиттера ( $T_E \leq 1800$  К) и коллектора ( $T_C \leq 1000$  К), а для расчетно-экспериментального обоснования высокотемпературных термоэмиссионных энергетических установок необходимо наличие широкого спектра вольт-амперных характеристик (ВАХ) модельных цилиндрических приборов, снятых при высоких температурах эмиттера и коллектора.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования ВАХ двух модельных цилиндрических цезиевых преобразователей при высоких температурах эмиттера ( $T_E = 1800 - 2100$  К) и коллектора ( $T_C = 1000 - 1300$  К).

В обоих преобразователях эмиттером служил слой из вольфрама с ориентацией (110), нанесенный на монокристалл молибдена [111] методом химической транспортной реакции в хлоридной среде. Толщина покрытия составляла 200 мкм. Коллектором в первом приборе служил ниобий, а во втором — газофазный “кислородосодержащий” ниобий, полученный из дуплексной заготовки ниобий–“кислородосодержащий” ниобий. Межэлектродный зазор здесь при комнатной температуре составлял 0.25 мм.

Вакуумная система экспериментальной установки позволяла проводить безмаслянную откачку рабочего объема и после обезгаживания обеспечивала давление остаточных газов  $1 \cdot 10^{-5}$  Па.

Температурно-временная обработка металлических узлов вакуумно-цезиевой системы производилась после достижения давления остаточных газов  $1 \cdot 10^{-4}$  Па при температурах  $800 \pm 20$  К в течение  $\sim 100$  ч. Обезгаживание электродов осуществлялось поэтапно. Сначала обезгаживался коллектор при температуре  $T_C = 1350$  К в течение 48 ч, а затем эмиттер при температуре  $T_E = 2150$  К в течение 8 ч. После обезгаживания электродов в межэлектродное пространство при  $T_E = 2100$  К и  $T_C = 1300$  К под давлением 2 кПа напускался пар цезия, предварительно очищенный методом вакуумной дистилляции [6]. Такой режим выдерживался в течение 3 ч, после чего пары цезия конденсировались в термостат.

Вольт-амперная характеристика термоэмиссионного преобразователя снималась динамическим способом при рабочих температурах эмиттера  $T_E = 1800 - 2100$  К и коллектора  $T_C = 1000 - 1300$  К. Давление паров цезия регулировалось термическим способом из резервуара термостата, температура которого на заданном уровне поддерживалась с точностью  $\pm 0.5$  К. Типичное семейство вольт-амперных характеристик преобразователя с коллектором из ниобия для  $T_E = 2100$  К и  $T_C = 1100$  К представлено на рис. 1. Видно, что при оптимальном давлении паров цезия  $P_{Cs}^{opt} = 3.1$  кПа максимальная выходная электрическая мощность составляет  $8.5 \text{ Вт/см}^2$ .

На основе ВАХ строились зависимости максимальной электрической мощности прибора от температуры коллектора при постоянной температуре эмиттера, которые представлены на рис. 2. Кривые 1' и 2' соответствуют коллектору из ниобия, 1'' и 2'' — коллектору из “кислородосодержащего” ниобия. Видно, что оптимальная рабочая температура для коллектора из ниобия составляет  $1000 - 1100$  К, а для коллектора из “кислородосодержащего” ниобия —  $1200$  К. Кроме того, при  $T_E = 2100$  К отклонение рабочей температуры коллектора из “кислородосодержащего” ниобия от оптимального значения на  $\pm 100$  К снижает выходную мощность преобразователя всего на 8–10%. При  $T_E = 2100$  К и  $T_C = 1300$  К

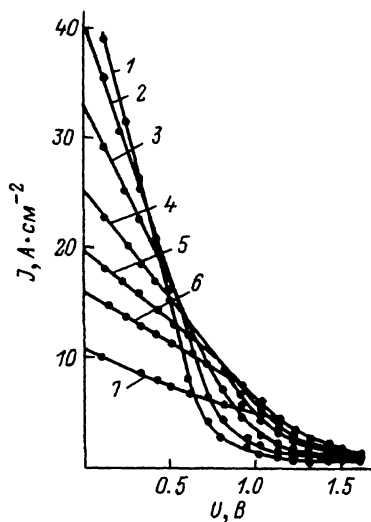


Рис. 1. Семейство ВАХ цезиевого ТЭП с электродами вольфрам (110) — ниобий при  $T_E = 2100$  К и  $T_C = 1100$  К.  $P_C \cdot 10^2$ , Па: 1 — 36.65, 2 — 30.99, 3 — 25.60, 4 — 17.51, 5 — 14.52, 6 — 11.70, 7 — 7.63.

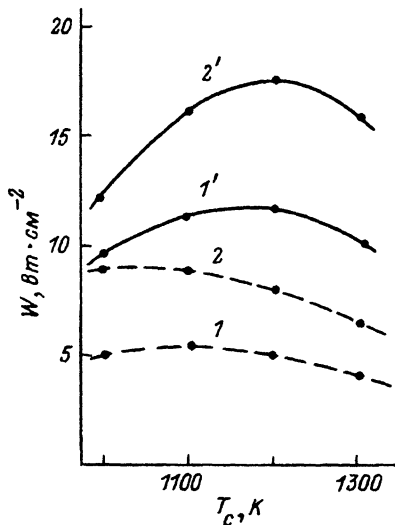


Рис. 2. Зависимость максимальной выходной электрической мощности ТЭП от температуры коллектора.

1, 1' —  $T_E = 2000$ ; 2, 2' — 2100 К.

генерируется выходная мощность  $15.2 \text{ Вт/см}^2$ , что в 2.5 раза больше, чем для ниобиевого коллектора при тех же температурах электродов.

Для коллектора из “кислородосодержащего” ниобия наблюдается почти двукратное увеличение выходной электрической мощности преобразователя по сравнению с ниобиевым коллектором (рис. 3). Абсолютная величина роста мощности преобразователя увеличивается с ростом рабочей температуры эмиттера. Это связано с тем, что коллектор из “кислородосодержащего” ниобия представляет собой источник кислорода, который, попадая в межэлектродное пространство преобразователя, взаимодействует с рабочей поверхностью эмиттера и улучшает его эмиссионно-адсорбционные свойства [4,5].

Однако в отличие от окисленного коллектора [2,4,5] или источника рабочего тела на основе оксидов цезия [6] повышение выходной электрической мощности происходит не только за счет токовой составляющей ВАХ [4], но и за счет уменьшения работы выхода коллектора. Косвенным подтверждением данного эффекта служит почти параллельное смещение огибающей ВАХ для коллектора из “кислородосодержащего” ниобия в сторону более высоких выходных напряжений на электродах (рис. 4) по сравнению с ниобиевым коллектором [7]. Работу коллектора из “кислородосодержащего” ниобия определяют оксидные соединения кислорода с ниобием, с цезием, а также наличие свободного кислорода и цезия в пленке, которая образуется на рабочей поверхности коллектора. Согласно [8], эмиссионная способность коллектора из “кислородосодержащего” ниобия определяется соотношением концентрации компонент в реально функционирующей на рабочей поверхности пленке, видом их химической связи и структурой поверхности.

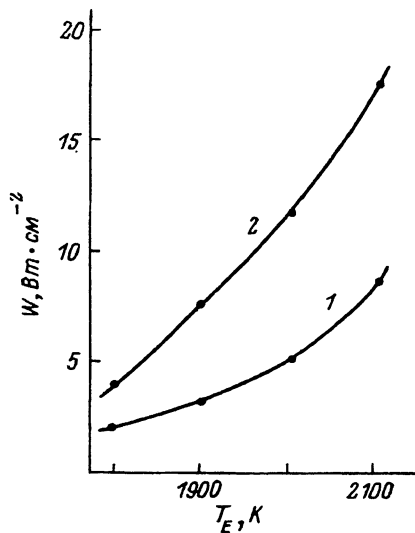


Рис. 3. Зависимость максимальной выходной электрической мощности ТЭП от температуры эмиттера при  $T_C = 1200$  К.

1 — коллектор ниобий, 2 — коллектор "кислородосодержащий" ниобий.

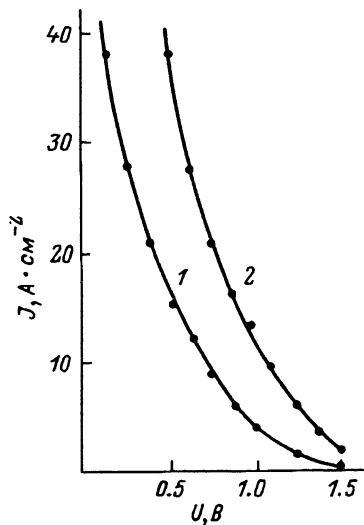


Рис. 4. Огибающие ВАХ ТЭП при  $T_E = 2100$  К и  $T_C = 1200$  К.

1, 2 — то же, что и на рис. 3.

В процессе исследования вольт-амперных характеристик ТЭП с коллектором из "кислородосодержащего" ниобия, как и в [5], в отличие от ниобиевого коллектора наблюдалось существенное уменьшение величины оптимального давления цезия с ростом рабочей температуры коллектора (рис. 5).

Согласно [5], это происходит из-за выделения коллектором свободного кислорода, который взаимодействует с рабочей поверхностью эмиттера и увеличивает его вакуумную работу выхода, что соответственно приводит к снижению оптимальной величины давления паров цезия.

Надо отметить, что преобразователь с коллектором из "кислородосодержащего" ниобия проработал в различных режимах преобразования более 1000 ч и выходные параметры были стабильными с точностью  $\pm 10\%$  в течение эксперимента.

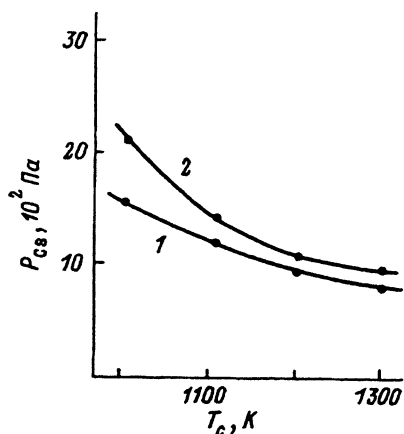


Рис. 5. Зависимость оптимального давления цезия в МЭЗ ТЭП с коллектором из "кислородосодержащего" ниобия от температуры коллектора.

$T_E, K$ : 1 — 2000, 2 — 2100.

На основе анализа полученных экспериментальных результатов можно сделать заключение, что “кислородосодержащий” ниобий в качестве коллекторного материала при высоких температурах ( $T_C = 1100 - 1300$  К) обеспечивает выходные параметры термоэмиссионного преобразователя энергии с эмиттером из вольфрама (110) на уровне  $17.5 + 1.5$  Вт/см<sup>2</sup> для  $T_E = 2100$  К. Это как минимум в два раза больше, чем для ниобиевого коллектора при тех же температурах электродов.

### Список литературы

- [1] *Бабанин В.А., Колышкин И.И., Кузнецов В.И. и др.* // Тез. докл. II конф. “Ядерная энергетика в космосе. Физика ТЭП”. Сухуми, 1991. Ч. 1. С. 9-11.
- [2] *Сергеев Д.И., Титков А.С.* Адсорбирующие электроды. М.: Энергоиздат, 1982. 128 с.
- [3] *Саввов Р.В., Скребова З.Б., Храмушин Н.И. и др.* // Тез. докл. I конф. “Ядерная энергетика в космосе”. Обнинск, 1990. Ч. 1. С. 75-76.
- [4] *Rufeh F.* // Rep. on 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. Therm. Electr. Row. Gen. Jülich (FRG), 1972. Vol. 3. P. 1061-1080.
- [5] *Гвердцители И.Г., Цакая В.К., Цакадзе Л.М. и др.* // Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую. Обнинск, 1980. С. 160-170.
- [6] *Каландаришвили А.Г.* Источники рабочего тела для термоэмиссионных преобразователей энергии. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с.
- [7] *Гвердцители И.Г., Каландаришвили А.Г., Кашия В.Г.* // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 22. С. 1199-1202.
- [8] *Кобяков В.П., Тарановская В.Н.* // Тез. докл. II конф. “Ядерная энергетика в космосе. Физика ТЭП”. Сухуми, 1991. Ч. 1. С. 62-63.

Сухумский технический институт

Поступило в Редакцию  
30 июня 1992 г.