

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриашин А.В., Мелета Е.А., Миронов В.С., Ярыгин В.И. Базовый комплекс аппаратных, методических и программных средств для проведения экспериментальных исследований лабораторных ТЭП. — В кн.: Избранные труды ФЭИ, 1996. Обнинск, 1997, с. 69—76.
2. Альмамбетов А.К., Зродников А.В., Овчаренко М.К. и др. Формирование концепции и обоснование характеристик ТРП на базе ЭГК с внешним расположением топлива для перспективных долгоресурсных космических ЯЭУ и ЯЭДУ. — Там же, 1997, с. 97—105.
3. Читайкин В.И., Овчаренко М.К., Ионкин В.И. и др. Комбинированная ядерно-энергетическая установка ТЭМБР с реактором-преобразователем на быстрых нейтронах. Тезисы докл. 5-й Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе». Подольск, март 1999, с. 21.
4. Ярыгин Д.В., Ярыгин В.И., Мелета Е.А. и др. Экспериментальное обоснование разработки газопламенной термоэмиссионной системы прямого преобразования с холодным уплотнением. Отчет ФЭИ № 9709, 1998. 63 с.
5. Юферов А.Г., Павлов К.А., Зацерковный С.П. Разработка информационных систем для задач планирования и принятия решений в области космической ядерной энергетике. — В кн.: Избранные труды ФЭИ, 1997. Обнинск, 1999, с. 135—141.
6. Коголовский М.Р. Технология баз данных на персональных ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1992. 224 с.
7. Диго С.М. Проектирование и использование баз данных. М.: Финансы и статистика, 1992. 208 с.
8. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И., Миронов В.С., Смольникова Г.И. Разработка структуры банка данных вольт-амперных характеристик. Отчет ФЭИ № 9490, 1997. 31 с.
9. Миронов В.С., Сидельников В.Н. Предельные выходные характеристики ТЭП. Тезисы докл. конф. «Ядерная энергетика в космосе». Обнинск, 1990, с. 90.
10. Виноградов Е.Г., Волков А.Д., Смольникова Г.И., Щербинин П.П. К анализу экспериментальных вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя. Отчет ФЭИ, № 6509, 1981. 25 с.
11. Сидельников В.Н. Численное исследование вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя. Отчет ФЭИ № 6516, 1981. 20 с.
12. Кайбышев В.З., Смолин А.Л. Методика диагностики внутренних параметров ЭКГ по экспериментальным ВАХ. Отчет ИАЭ (инв. № ФЭИ 2690 ося), 1986. 47 с.
13. Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Смольникова Г.И. и др. Реализация алгоритмов обработки экспериментальных данных ВАХ ТЭП в условиях СУБД. Отчет ФЭИ № 9793, 1998. 48 с.

УДК 621.311.25:621.039

СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДУЛЕЙ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА КОСМИЧЕСКОЙ ЯЭУ

*Марколия А.И., Судак Н.М., Сабо Е.П., Криворучко С.П., Векуа Т.С.,
Гречко Н.М., Дударев Ю.И., Максимов М.З., Суворцева А.У., Чиликиди А.А.,
Шамба В.Е., Швангирадзе Р.Р., Элошвили Ю.Л.
(Сухумский физико-технический ин-т)*

Достижения в области создания и успешной эксплуатации радиоизотопных термоэлектрических генераторов космического базирования позволили вернуться к идее термоэлектрических преобразователей космических ЯЭУ. Высокие параметры радиоизотопных термоэлектрических генераторов (удельная мощность 5,14 Вт/кг и срок службы 15—20 лет) были получены благодаря использованию термоэлектрического материала из сплава кремний—германий и повышения его рабочей температуры до 1273 К [1]. Наиболее действенным способом повышения удельной мощности термоэлектрических преобразователей как главного параметра космических энергетических систем является увеличение удельных тепловых потоков. При получении заданной электрической мощности увеличение удельного теплового потока в 2 раза позволяет снизить массу термоэлектрического материала почти в 4 раза. На примере созданных в СФТИ преобразователей «Вихрь», «Сезон», «Зима» было показано, что реальной для сплава кремний—германий является работа при плотности тепловых потоков 30—

70 Вт/см². Расчетные исследования показали, что приемлемые характеристики термоэлектрических преобразователей в составе ЯЭУ ТЭМБР с комбинированным способом преобразования энергии (термоэмиссия и термоэлектричество) могут быть получены и без существенного повышения рабочей температуры, следовательно, при использовании апробированных материалов, коммутационных переходов и технологии их формирования [2—5]. На международном семинаре SPE-XXI'98 и 5-й Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе» в 1999 г. разработчиками из ГНЦ РФ—ФЭИ и СФТИ предложена новая конструкция термоэлектрического преобразователя и модуля при использовании данного подхода [2—5].

Работа термоэлектрического модуля в больших тепловых потоках связана с ростом потерь перепада температуры на теплопереходах, что исключает использование прижимных контактов. Радиально-кольцевая геометрия модуля позволяет снизить разрушающие термические напряжения, возникающие в жесткой конструкции. Кроме того, в конструкцию модуля введены демпфирующие теплопереходы. Важность наличия этих элементов отмечена в работе [1], где утверждается, что создание термоэлектрического преобразователя известного проекта космической ЯЭУ SP-100 было связано с разработкой податливой теплопроводной «подушки». К настоящему моменту нами разработана технология и изготовлены опытные образцы демпфирующих и электроизоляционных элементов представленной ранее конструкции термоэлектрического модуля космической ЯЭУ, и возможность его создания становится реальной.

Понятно, что приступить к реализации предлагаемого проекта создания термоэлектрического генератора с кремний-германиевыми термоэлектрическими батареями/модулями с радиально-кольцевой геометрией можно лишь тогда, когда будут ясны пути дальнейшего совершенствования всех элементов термоэлектрического модуля и технологии их формирования. Этим ключевым вопросам и посвящена настоящая работа.

Термоэлектрический материал из кремний-германиевого сплава разработан независимо и почти одновременно в США и СФТИ более 40 лет назад. В течение этих лет материал изучался с той или иной степенью интенсивности. Все попытки повысить термоэлектрическую эффективность или разработать альтернативный материал не увенчались успехом, патенты, заявлявшие такую возможность, при экспериментальной проверке не были подтверждены. Удалось лишь разработать несколько вариантов технологии изготовления, которые обеспечивают получение однородных материалов, но фактически не меняют термоэлектрических свойств. Установлено, что быстрее всего гомогенизация проходит в процессе горячего вакуумного прессования [6]. Гомогенность термоэлектрического материала может быть осуществлена повторением технологических операций измельчения и прессования.

Механическая прочность материала из кремний-германиевого сплава достаточно высока, и работы, направленные на повышение термомеханических свойств, не проводились. Вместе с тем в жестких конструкциях более высокая прочность термоэлектрического материала позволяет снизить требования к демпфирующим элементам и согласующим слоям, а также уменьшить потери на них перепада температуры. Пути повышения механической прочности материалов известны. Механические напряжения в нагруженном поликристалле распределены неравномерно и достигают максимальных разрушающих значений на неподвижных стыках кристаллитов. При уменьшении размера зерна поликристаллического материала облегчается зернограницное скольжение, которое обеспечивает релаксацию локальных напряжений. Размещение на стыках кристаллитов включений легкодеформируемых фаз обеспечивает дальнейшую релаксацию пиковых напряжений, и прочность материала возрастает. В прессованном рекристаллизованном материале из кремний-германиевого сплава на стыках зерен всегда имеются включения оксида кремния, которые не влияют на электрофизические свойства материала, но обеспечивают рост с температурой его механической прочности.

Придание необходимой пластичности этим включениям при более низкой температуре путем модификации оксидами свинца, фосфора, мышьяка, бора, галлия реально. Присутствие же этих элементов в материале согласно исследованиям не ухудшит термоэлектрические свойства, может быть, даже улучшит, обеспечивая более глубокое и равномерное легирование.

Некоторое повышение термоэлектрической эффективности можно получить на ветвях с переменным по высоте составом, в которых содержание германия снижается от холодной к горячей стороне. Технология изготовления таких «сэндвичных» ветвей из средне- и низкотемпературных материалов в СФТИ отработана и используется при изготовлении модулей радиоизотопных термоэлектрических генераторов [7]. В таких генераторах из кремний-германиевого сплава, эксплуатируемых ныне в космосе, на холодной стороне ветвей имеются области из богатого германием сплава [1]. Это решает, кроме того, вопрос согласования основного материала ветви с коммутационной шиной из вольфрама по коэффициенту термического расширения. Для создания сэндвичных ветвей термоэлемента малой высоты для модулей космической ЯЭУ радиально-кольцевой геометрии необходимо решить и некоторые технологические проблемы. Предварительные положительные результаты по плазменному напылению слоев термоэлектрических и коммутационных материалов на цилиндрическую поверхность и газостатическому их обжатию обнадеживают.

Коммутационные переходы определяют прежде всего ресурсные характеристики термоэлектрического модуля. В СФТИ разработаны и использовались в различных преобразователях три варианта коммутационных переходов от сплава кремний—германий к вольфраму, графиту и кремнию, модифицированному силицидом молибдена. При уменьшенной электрической мощности преобразователя на 5% срок службы в течение 50 тыс. ч для каждого типа коммутационных переходов был получен при температуре от 860 до 1250 К. Как уже отмечалось, с помощью этих коммутационных переходов можно решить задачу создания термоэлектрического преобразователя для космической ЯЭУ ТЭМБР [2—4].

Анализ результатов ресурсных испытаний экспериментальных термоэлектрических модулей при различной температуре горячих спаев позволил выявить некоторые закономерности и причины деградации электрических характеристик. Установлено, что при рабочей температуре коммутационного перехода около 1200 К ее повышение на 100 К снижает срок службы термоэлектрического модуля в 6 раз. Это соотношение совпадает с оценками зарубежных коллег [1] и позволяет при разработке термоэлектрического преобразователя пользоваться ускоренными методами ресурсных испытаний.

Одной из причин деградации большинства коммутационных переходов является обогащение германием слоя термоэлектрического материала, примыкающего к горячему спаю ветви. Электросопротивление слоя повышается, механическая прочность и температура плавления снижаются, что при высокой температуре и термомеханических нагрузках приводит со временем к разрушению. В недостаточно гомогенном термоэлектрическом материале процесс обогащения горячей стороны германием проходит, в основном, по механизму зонной плавки температурным градиентом [6]. При этом богатые германием микроучастки переносятся в область максимальной температуры. В определенных условиях можно наблюдать почти полное фазовое разделение. Устранить эту причину деградации можно не только повышением гомогенности термоэлектрического материала, используя ту или иную технологию его получения, но и использованием сэндвичных ветвей, в которых содержание германия вблизи горячих коммутационных переходов понижено. Так, более стабильными являются модули радиоизотопных термоэлектрических генераторов с коммутационными шинами из легированного кремния, модифицированного силицидом молибдена. В эти шины может диффундировать германий, не накапливаясь в подкоммутационном слое.

Другой причиной деградации является повышение электрического сопротивления приконтактного слоя за счет снижения концентрации электроактивной легирующей примеси. Это явление более характерно для коммутационных переходов, формируемых пайкой с использованием в качестве припоев переходных металлов и их силицидов, и происходит за счет образования фосфидов и боридов металлов. При формировании коммутационных переходов совместным прессованием или диффузионной сваркой при отсутствии в контактах переходных металлов этот тип деградации можно исключить. Отсутствие слоя припоя и связанных с ним дополнительных переходов в сформированных таким образом контактах позволяет надеяться и на снижение электрических и тепловых коммутационных потерь.

При высокой рабочей температуре появляется деградация, связанная с сублимацией из приконтактной области кремния и легирующей примеси фосфора. Утечка фосфора происходит преимущественно из зоны контакта за счет ускоренной межфазной диффузии. В результате изотермического отжига в течение 1000 ч при 1173 К в откачанных до 0,01 Па кварцевых ампулах электрическое контактное сопротивление в ветвях *n*-типа возросло более чем в 100 раз. Изменения электрофизических свойств термоэлектрического материала при этом замечено не было. Повторный отжиг ветвей в парах фосфора при той же длительности и той же температуре обеспечил возврат контактного сопротивления к его исходному значению 1 нОм·м². При использовании коммутационных слоев из графита возможна утечка сублимирующих компонентов в поры. В этом случае для уменьшения деградации и снижения коммутационных потерь важно подобрать марку более плотного электропроводного графита или уплотнить его поверхностные слои формированием в порах пирографита.

Антисублимационная защита ветвей термоэлемента предотвращает испарение с поверхности материала кремния и легирующей примеси. Если повышение температуры на 100 К при температуре испытания около 1200 К увеличивает возгонку кремния в 10—15 раз, то простое покрытие кремний-германиевого сплава стеклоэмалью ее снижает в 65—70 раз. В термоэлектрических преобразователях из кремний-германиевого сплава, разработанных ранее в СФТИ, антисублимационную защиту не использовали. Согласно литературным данным для лучшей адгезии стеклоэмали материал предварительно покрывается нитридом и диоксидом кремния, чаще всего их термохимическим осаждением. Следует отметить, что для предотвращения деградации электрических характеристик термоэлектрического преобразователя, связанной с сублимацией компонентов, более важна герметизация коммутационных переходов, при их покрытии стеклоэмалью могут возникнуть некоторые сложности.

Все пути совершенствования термоэлектрического преобразователя требуют экспериментальной проверки и отработки. Затраты на работу незначительны по сравнению с разработкой высокотемпературного термоэлектрического преобразователя нового типа (с радиально-кольцевой геометрией), но полученные в ходе этой работы результаты могут предопределить успех разработки космической ЯЭУ типа ТЭМБР и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braun J. Application of silicon germanium thermoelectric devices for electrical power production in space. — In: Proc. of the XIV Intern. Conf. on Thermoelectrics, June 27—30, 1995, St. Petersburg, Russia, p. 394—400.
2. Читайкин В.И., Ярыгин В.И., Мелета Е.А. и др. Термоэлектрический генератор ядерной энергетической установки для космических аппаратов с комбинированной системой преобразования энергии. Доклад на Межд. сем. SPE-XXI'98, 17—20 ноября 1998 г., Обнинск.
3. Марколия А.И., Сабо Е.П., Судак Н.М. и др. Проблемы создания модулей термоэлектрического преобразователя для космических ядерных энергетических установок. Доклад на VI Межгос. семинаре «Термоэлектрики и их применение» (октябрь 1998 г.), Санкт-Петербург.

4. Ярыгин В.И., Мелета Е.А., Ионкин В.И. и др. Высокотемпературные кремний-германиевые термоэлектрические генераторы для космических ядерно-энергетических установок. Тезисы докл. на 5-й Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе», Подольск, март 1999.
5. Марколия А.И., Судак Н.М., Сабо Е.П. и др. Конструкторские и технологические проблемы создания высокотемпературных кремний-германиевых термоэлектрических трубчатых модулей для генераторов в системах космических ЯЭУ. — Там же.
6. Швангирадзе Р.Р., Криворучко С.П., Шамба Н.А. Особенности и последствия неомогенности высокотемпературного термоэлектрического сплава кремний—германий. Доклад на VI Межгос. семинаре «Термоэлектрики и их применение» (октябрь 1998 г.), Санкт-Петербург.
7. Веденеев В.П., Залдастанишвили М.И., Криворучко С.П. и др. Сегментированные ветви для интервала температур 300—750 К. — Там же.

УДК 621.431.37:621.59

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА В КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Онуфриев В.В., Гришин С.Д., Марахтанов М.К. (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Синяевский В.В. (РКК «Энергия» им. С.П. Королева)

В значительной степени энергомассовые и эксплуатационные характеристики ядерных электроракетных двигательных установок на базе термоэмиссионных реакторов-преобразователей зависят от параметров преобразователя электрической энергии в составе энергоустановки и бортовой кабельной сети. Это обусловлено тем, что по физическим условиям работы реактор является низковольтным источником тока постоянного напряжения [1—3], а маршевая электроракетная двигательная установка требует напряжения для работы на уровне 10^3 — 10^4 В в зависимости от параметров баллистической задачи, так как вследствие электростатического способа ускорения массы удельный импульс $J_{уд}$ пропорционален рабочему (ускоряющему) напряжению электроракетного двигателя. В связи с этим рассматривается минимизация удельной массы ядерной электроракетной двигательной установки за счет выбора рабочих параметров преобразователя тока и кабельной сети: температуры, напряжения, частоты напряжения.

Общеизвестно, что стартовая масса космического аппарата M_0 складывается из следующих составляющих: массы полезной нагрузки M_n , массы конструкции $M_{кон}$, массы рабочего тела, расходуемого в процессе выведения $M_{р.т}$, массы собственно энергодвигательной установки $M_{эду}$ [1—3]:

$$M_0 = M_n + M_{кон} + M_{р.т} + M_{эду}. \quad (1)$$

Конечная характеристическая скорость V_x [3] является в соответствии с уравнением Мещерского функцией удельного импульса электроракетной двигательной установки $J_{уд}$, начальной и конечной массы космического аппарата. Уравнение (1) можно представить в безразмерном виде, разделив почленно все слагаемые на M_0 и введя следующие параметры массы космического аппарата: $(M_n/M_0) = \alpha_n$ — параметр загрузки; $(M_{эду}/M_0) = \nu_{эду}$ — энергомассовое совершенство; $(M_{кон}/M_0) = \beta_{кон}$ — конструктивное совершенство; $(M_{р.т}/M_0) = \tau_{кон}$ — параметр заправки космического аппарата.

Используя развитый подход [1—3], уравнение (1) преобразуется к виду

$$\alpha_n = M_n/M_0 = \exp(-V_x/J_{уд}) - [1 - \exp(-V_x/J_{уд})] [\varphi + \gamma_{эду} J_{уд}^2 / (2t_{тр})],$$

где φ — коэффициент конструкции баков; $t_{тр}$ — время перелета; $\gamma_{эду}$ — удельная масса.