

УДК 621.362

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ (ТЭМ)

Тушенцова Екатерина Николаевна

Студентка 4 курса,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Панфилов Ю.В.,

доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Объектом работы является термоэлектрический модуль (ТЭМ).

Термоэлектрический модуль является уникальным устройством по преобразованию электрической и тепловой энергии. Он позволяет осуществлять как прямое преобразование энергии (из электрической в тепловую) – режимы охлаждения или нагрева, так и обратное преобразование – режим генерации электрической энергии. Термоэлектрический модуль может также использоваться как устройство для измерения температуры или потока тепловой энергии.

Целью данной работы является изучение ТЭМ, его свойств, выявление целесообразности применения ТЭМ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- изучить конструкцию ТЭМ
- виды ТЭМ
- технологию производства ТЭМ
- проблемы и пути их решения

При всем многообразии возможностей по использованию термоэлектричества можно выделить следующие основные области применения модулей:

- Изделия широкого потребления
- Радиоэлектроника
- Медицина
- Точное машиностроение
- Научное и лабораторное оборудование
- Устройства климатизации
- Энергетика
- Автомобилестроение

Охлаждающие устройства на основе термоэлектрических модулей выполняют те же функции, что и традиционные компрессионные или абсорбционные холодильные агрегаты, работающие на основе хладагентов. В отличие от традиционных холодильных агрегатов, в термоэлектрических модулях роль хладагента выполняет электронный газ и, по сути дела, модули представляют собой твердотельные тепловые насосы. Термоэлектрические охладители обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами охлаждающих устройств:

1. Абсолютная бесшумность работы;
2. Отсутствие подвижных частей и рабочих жидкостей;
3. Возможность работы в любом пространственном положении;
4. Малый размер и вес охлаждающей системы и, как следствие, возможность построения миниатюрных охладителей;

5. Возможность реализации охлаждения и подогрева в одном блоке (путем простой смены полярности напряжения питания модуля);
6. Возможность охлаждения до сверхнизких температур;
7. Простота управления и возможность прецизионной регулировки температуры.

Принцип работы термоэлектрических модулей

В основе работы термоэлектрического охлаждающего модуля лежит эффект, открытый французским часовщиком Жаном Пельтье, который в 1834 г. обнаружил, что при протекании электрического тока в цепи, состоящей из разнородных проводников, в местах контактов проводников поглощается или выделяется, в зависимости от направления тока, теплота. При этом количество поглощаемого тепла пропорционально току, проходящему через контакт проводников [1]. Наиболее сильно эффект Пельтье проявляется на контактах полупроводников с различным типом проводимости (р- или n-) или, другими словами, в р-n переходе. На языке классической физики объяснение эффекта Пельтье заключается во взаимодействии электронов проводимости, замедлившихся или ускорившихся в контактном потенциале р-n перехода, с тепловыми колебаниями атомов в массиве полупроводника. В результате, в зависимости от направления движения электронов (и, соответственно, тока) происходит нагрев или охлаждение участка полупроводника, непосредственно примыкающего к р-n переходу (рис. 1).

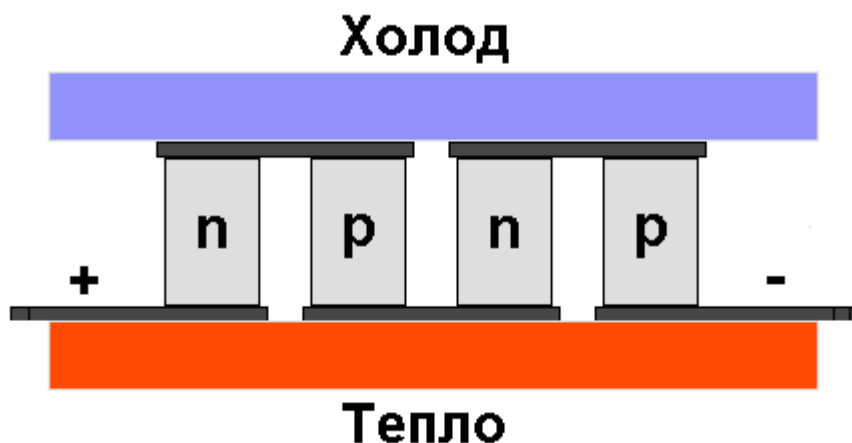


Рис. 1. Действие эффекта Пельтье при протекании тока через полупроводники р- и n-типов проводимости.

Эффект Пельтье лежит в основе работы термоэлектрического модуля (ТЭМ). Единицей элементом ТЭМ является термопара, состоящая из одного проводника р-типа и одного проводника n-типа. При последовательном электрическом соединении нескольких таких термопар теплота, поглощаемая на контакте типа n-p выделяется на контакте типа p-n. Термоэлектрический модуль представляет собой совокупность таких термопар, обычно соединяемых между собой последовательно по току и параллельно по потоку теплоты. Термопары помещаются между двух плоских керамических пластин (Рис.2). Количество термопар может изменяться в широких пределах - от нескольких единиц до тысяч пар, что позволяет создавать ТЭМ с холодильной мощностью от десятых долей ватт до сотен ватт. Наибольшей термоэлектрической эффективностью среди промышленно используемых для изготовления ТЭМ материалов обладает теллурид висмута, в который для получения необходимого типа и параметров проводимости добавляют специальные примеси, например, селен и сурьму.

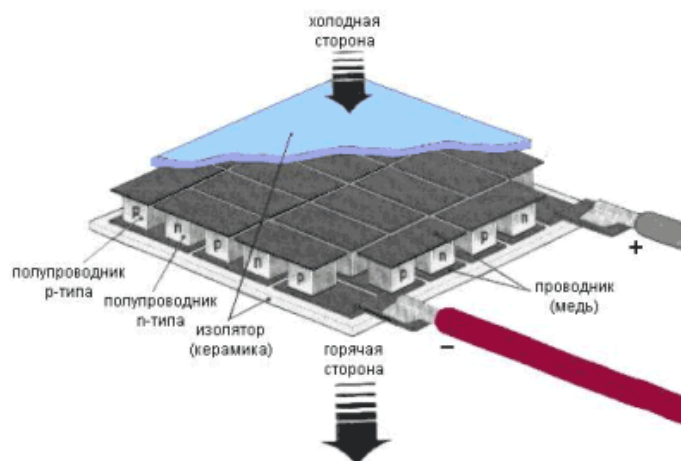


Рис. 2. Структура полупроводникового термоэлектрического модуля.

При прохождении через ТЭМ постоянного электрического тока образуется перепад температур между его сторонами: одна пластина (холодная) охлаждается, а другая (горячая) нагревается. При использовании ТЭМ необходимо обеспечить эффективный отвод тепла с его горячей стороны, например, с помощью воздушного радиатора или водяного теплообменника. Если поддерживать температуру горячей стороны модуля на уровне температуры окружающей среды, то на холодной стороне можно получить температуру, которая будет на десятки градусов ниже. Степень охлаждения будет пропорциональна величине тока, проходящего через ТЭМ. Внешний вид типового ТЭМ представлен на Рис.3.

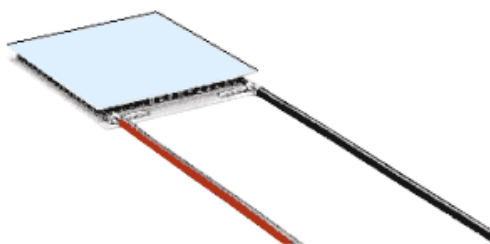


Рис. 3. Внешний вид термоэлектрического модуля.

Указанные преимущества обуславливают постоянный рост спроса на термоэлектрические модули во всем мире и возникновение новых областей для их применения. При мощностях охлаждения до нескольких десятков ватт термоэлектрические охладители обладают наивысшей среди всех остальных устройств эффективностью, имея при этом низкую стоимость и высокую надежность работы. Для специальных приложений с особыми требованиями по надежности применение термоэлектрических модулей оправдано даже для мощностей, измеряемых десятками киловатт.

Виды ТЭМ

На сегодняшний день выпускается более 150 типов термоэлектрических модулей для самых различных применений. Выпускаемые модули различаются как по своим основным потребительским характеристикам – холодильной мощности и максимальной разности температур, так и по размерам. Это позволяет найти эффективные и недорогие решения практически для всего спектра возможных применений.

- Однокаскадные микромодули
- Стандартные однокаскадные модули
- Высокоэффективные однокаскадные модули
- Модули с центральным отверстием

- Многокаскадные модули
- Генераторные термоэлектрические модули

Технология изготовления ТЭМ

Технология изготовления ТЭМ включает в себя:

- подготовку подложек со слоем проводника и припоя
- подготовку ветвей р- и n-типов проводимости с барьерным слоем на них
- пайка
- нанесение фоторезиста
- экспозиция (формирование запланированной топологии)
- травление
- конструкция первой части ТЭМ определённого типа проводимости завершена
- удаление остатков фоторезиста
- повторение данного процесса, формирование второй части другого типа проводимости
- Переворачивание второй части на 180° и соединение обеих частей.

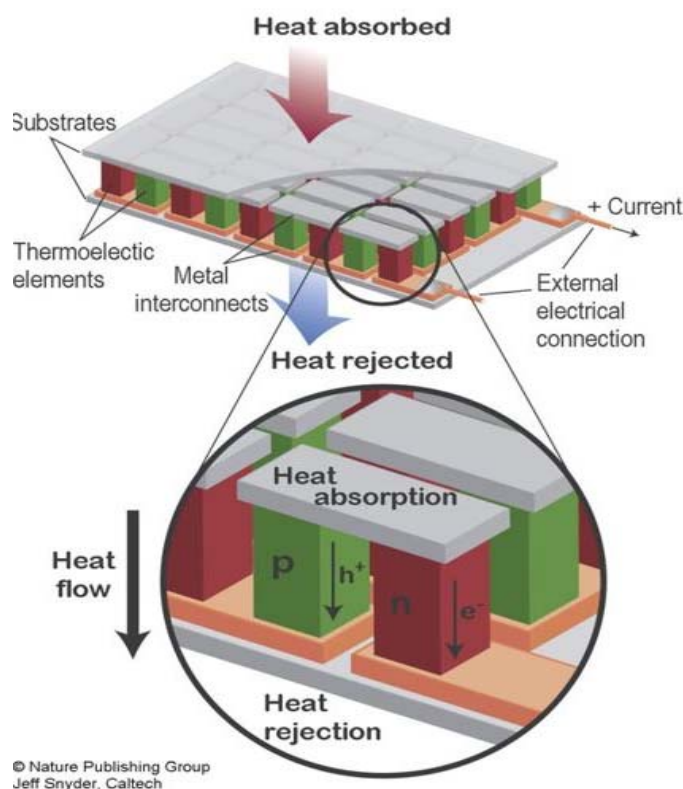
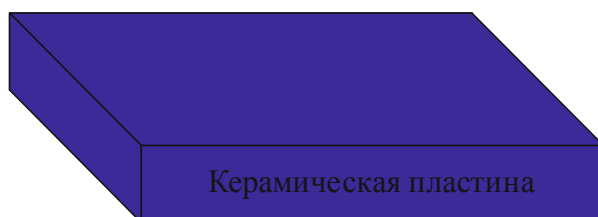
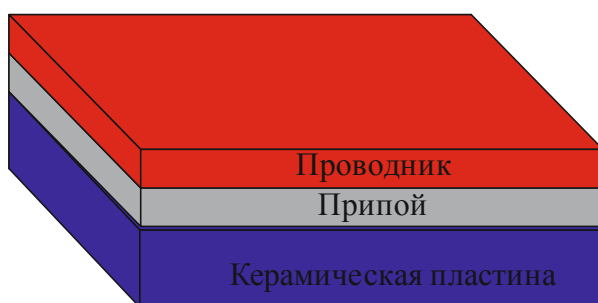


Рис. 4. Структура ТЭМ

Рис. 5. Технологический маршрут изготовления ТЭМ

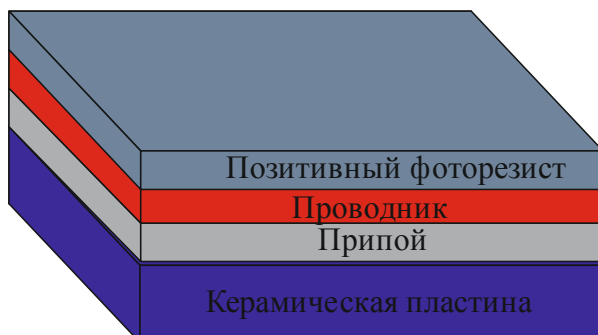


Этап 1. Подготовка керамических пластин.

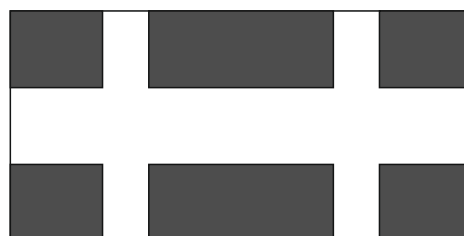


Этап 2. Нанесение на керамическую пластину слоя припоя и проводника.

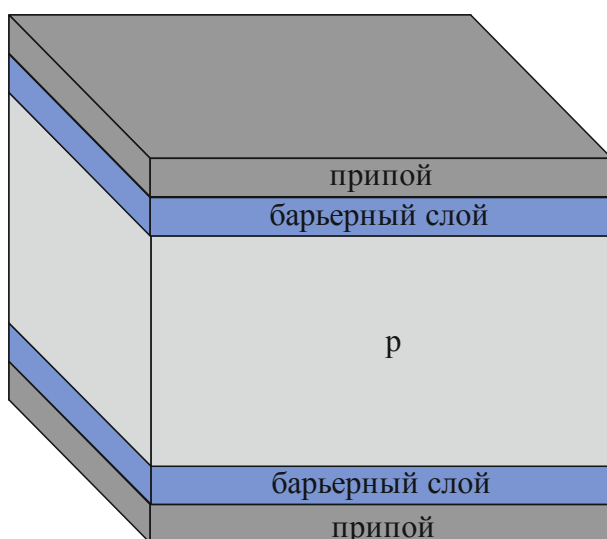
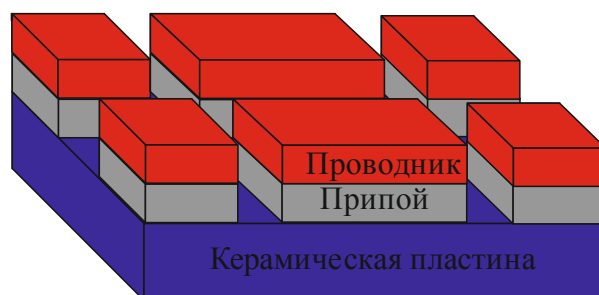
Этап 3. Нанесение слоя позитивного фоторезиста.
Применение шаблона нужной топологии.
Экспонирование.
Травление слоя проводника и припоя.



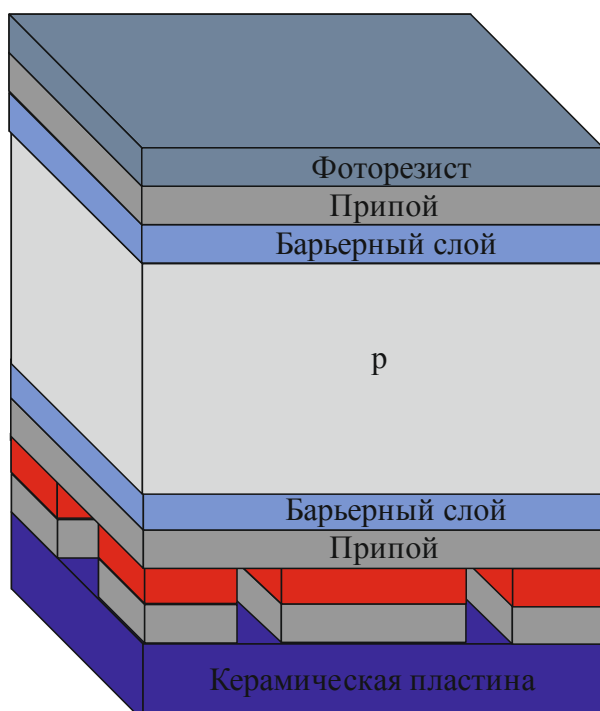
Фотошаблон



Структура, полученная в результате травления.

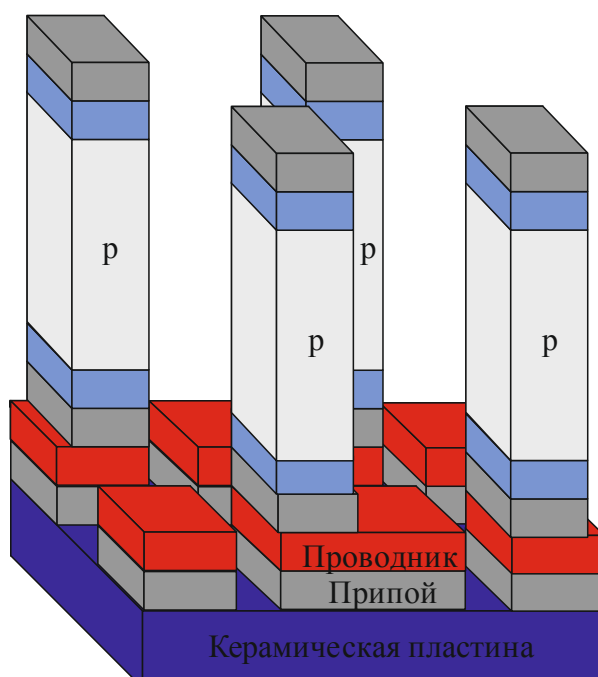
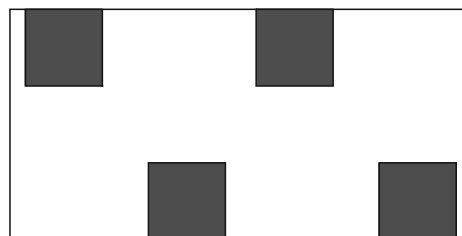


Этап 4. Подготовка ветвей р-типа проводимости. Нанесение барьерного слоя и припоя на ветви.

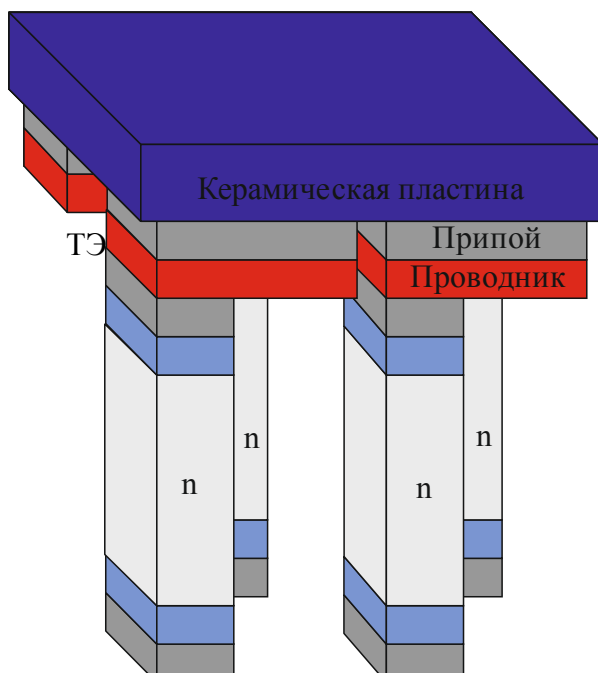


Этап 5. Пайка структур, полученных на двух предыдущих этапах.
Нанесение позитивного фоторезиста.
Экспонирование.
Травление припоя, барьерного слоя, полупроводникового материала, второго барьерного слоя и припоя.

Фотошаблон для создания р-ветвей

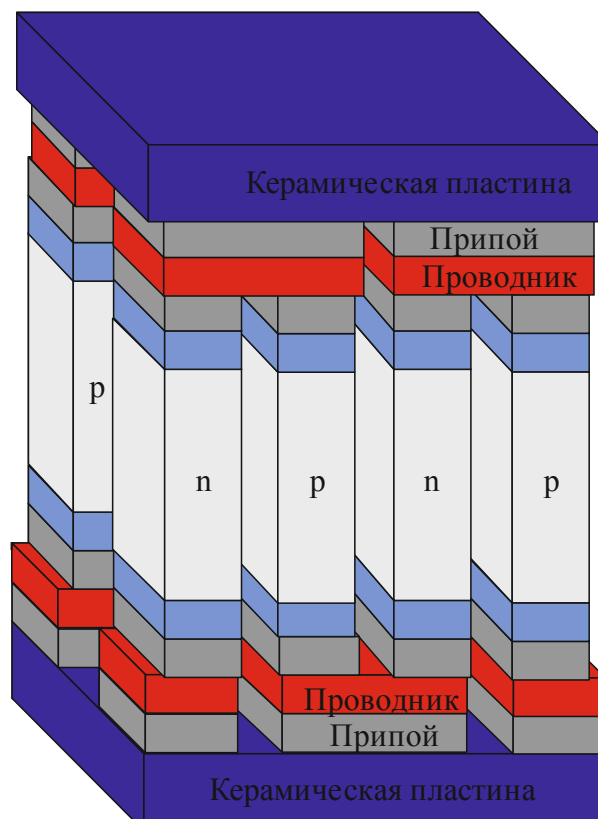


Структура, полученная после травления.



Этап 6. Повторение всего процесса.
Формирование второй половины

Этап 7. Пайка двух частей вместе.



Требования к технологии

Реальные размеры модуля следующие: слой проводника составляет 10-1000мкм, барьерный слой 1-100 мкм, припой 10-100мкм. Размер полупроводников, используемых в модуле (ветвей) находится в диапазоне от 50х50х50 до 500х500х500мкм. Размеры подложек (керамических пластин) находятся в диапазоне от 1х1 до 20х20мм [2].

В качестве метода нанесения слоя проводника, барьерного слоя и припоя могут быть применены химическое осаждение из газовой фазы, ионное распыление, осаждение дуговым разрядом, ионное осаждение и комбинация этих методов.

В качестве припоя могут использоваться сплавы Sn-Sb, Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Ag-Bi-Cu. Материалы группы Bi-Te, приведённые в таблице 1-16 могут использоваться для формирования полупроводниковых ветвей модуля. Материалы проводника: Cu, Cr, Ni, Ti, Ag, Au и их сплавы. Подложки обычно изготавливаются из диэлектриков, таких как Al_2O_3 , AlN, BN, SiC, Si, алмаза или их сплавов. Материалы барьерного слоя: Cu, Ti, Cr, Ni, Sr, W, Pt, Mo.

Скорость травления составляет 50мкм/мин.

Проблемы и направления исследований ТЭМ **Новые способы получения термоэлектрических материалов и** **их преимущества**

В конце 90-х годов прошлого столетия начались интенсивные исследования по повышению термоэлектрической добротности (основной характеристики ТЭ материалов) за счет перехода от однородных объемных материалов к наноразмерным полупроводниковым структурам. Теоретические расчеты показывают, что по отношению к объемному материалу ТЭ добротность может быть увеличена в гетерозипитаксиальных структурах в 2.5-5.0 раз, а в квантовых проволочках в 5-10 раз. Лучшие

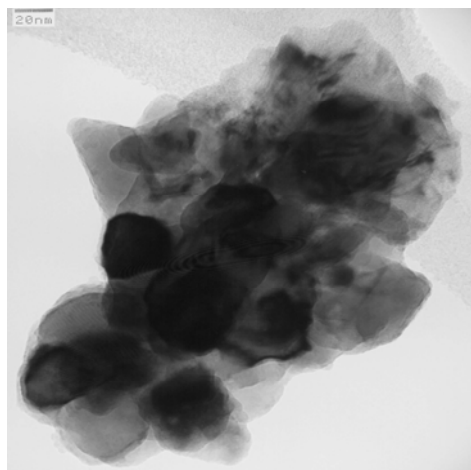
экспериментальные результаты свидетельствуют о возрастании $Z \cdot T$ в гетерозипитаксиальных структурах (Bi_2Te_3/Sb_2Te_3) в 2.3 раза и в 90 раз в кремниевых нанопроволочках [3].

Одним из перспективных методов создания наноструктур является технология, основанная на применении нанопорошков полупроводниковых материалов.

Практический интерес представляют пористые ТЭ материалы и ТЭ материалы, изготовленные из порошков, имеющих микроскопические зазоры между зёрнами.

В 2008-2009 годах большая группа отечественных ученых выполнили эксперименты для сплава теллурида висмута р-типа проводимости. Технологический маршрут состоял из следующих операций: измельчения кусочков $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ р-типа проводимости в шаровой мельнице до получения нанопорошков с размером частиц в диапазоне 2-40 нм, спекания наночастиц при высоких температурах и прессования материала при высоком давлении и низкой температуре. ТЭ добротность этих структур в 1.08-1.10 раза превышала ТЭ добротность исходных материалов.

Необходимо отметить, что исследования по созданию ТЭ материалов методами горячего прессования или экструзии проводились на порошках сплавов теллурида висмута с размером частиц в диапазонах 10-70 нм и больше 5-100 мкм, то есть практически не использовался субмикронный и микронный диапазоны 0.1-5.0 мкм.



Кроме того, эти материалы имели повышенные значения ТЭ добротности и механической прочности по сравнению с монокристаллическими материалами.

Рис. 6. Фотография наночастиц сплава теллурида висмута р-типа проводимости

Эффективность слоистых, пористых или порошковых невырожденных или слабо вырожденных ТЭ материалов может быть значительно выше, чем у тех же самых монолитных ТЭ материалов.

Барьерное покрытие

Важными характеристиками любого прибора является его надежность и долговечность. На данном этапе разработок надежность и долговечность ТЭМ находится на низком уровне. Поэтому в настоящее время ведутся исследования в области усовершенствования конструкции ТЭМ с целью увеличения их срока службы. Наиболее результативным и перспективным направлением разработок признано направление изучения свойств барьерного покрытия и способа его нанесения [4].

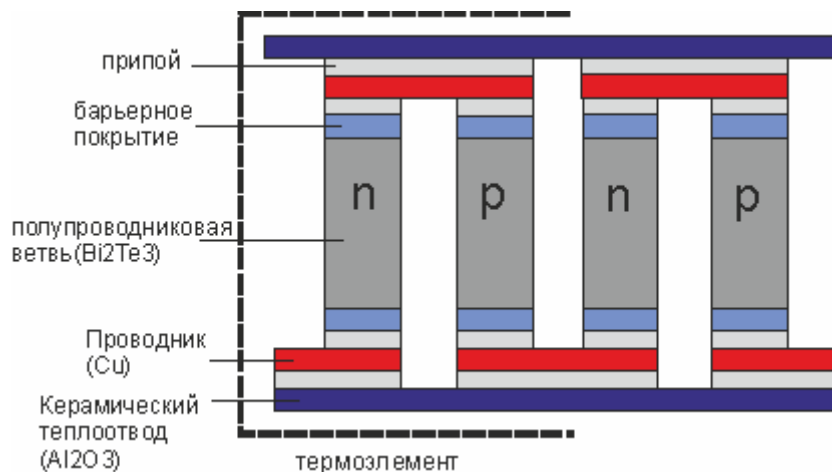


Рис. 7. Поперечное сечение ТЭМ

Если более детально рассмотреть стык проводник-барьерный слой-полупроводник, то оказывается, что недолговечность и ненадежность работы ТЭМ вызвана диффузией проводника (Cu) через барьерный слой в полупроводник (Bi_2Te_3). Это становится возможным из-за наличия стандартном барьерном слое (Ni, Mo, Sn) дефектов: поры, капли, щели.

Теоретические исследования показали, что если в качестве барьерного покрытия взять Ti, то при прочих равных условиях в сравнении с Ni диффузия Cu в Ti барьерном покрытии значительно меньше.

Кроме того был проведен ряд экспериментальных исследований. Сравнивались два образца. Первый был получен магнетронным способом (Ni барьерное покрытие), второй- электро-дуговым источником с системой разделения плазмы (Ti барьерное покрытие).

Результат: технология нанесения барьерного покрытия из Ti дуговым методом (электро-дуговой источник с системой разделения плазмы) позволяет увеличить срок службы ТЭМ на основе теллурида висмута, работающих при температурах до 250°C, минимум в 2 раза.

Заключение

ТЭМ по всем параметрам, включая технические, эксплуатационные и экологические характеристики, а также удельную стоимость преобразования энергии, превосходят существующие генераторы электроэнергии и охлаждающие приборы компрессорного типа, за исключением одного параметра – эффективности преобразования энергии. Поэтому ТЭМ нашли свою нишу только в тех областях техники, в которых максимальные значения мощности ТЭМ не превышают 500-1000 Вт или когда предъявляются высокие требования к долговечности, надежности и высокой стойкости приборов к внешним воздействиям [5].

Исследования, которые проводятся в области усовершенствования характеристик ТЭ материалов, открывают совершенно новую нишу применения ТЭМ для экологически чистого производства электроэнергии из бросового тепла от ДВС,

тепловых электростанций, металлургических заводов, химических производств в неиспользуемом в настоящее время диапазоне температур (150-750 °С). В перспективе также просматривается возможность замены существующего холодильного оборудования, бытовых, промышленных и транспортных кондиционеров компрессорного типа на более дешёвые, надёжные и экологически чистые термоэлектрические охлаждающие системы.

Литература

1. <http://www.symmetron.ru/suppliers/kryotherm/append3.shtml>
2. <http://www.google.com/patents/>Thermoelectric module and a method of manufacturing the same
3. Абрютин В., Нестеров С., Романько В., Холопкин А. Создание термоэлектрических материалов из нанопорошков сплавов теллурида висмута // XXIII Международный симпозиум «Тонкие плёнки в электронике» – 2010.
4. Bashkov V., Panfilov Y., and Belyaeva A. High-dense nanostructured barrier layer for branches (n-Bi₂Te₃) of TGM // «X International Conference on Nanostructured Materials», Roma, Italy – 2010 – p.172.
5. Абрютин В., Нестеров С., Романько В., Холопкин А. Применение нанотехнологий для создания высокоэффективных термоэлектрических материалов // «Наноиндустрия» – №1 – 2010.