

УДК 621.362

Термоэлектрический модуль (ТЭМ)

05, май 2012

Тушенцова Е.Н.

*Студентка,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.В. Панфилов,
д.т.н., профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

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[1].

Целью данной работы является изучение ТЭМ и усовершенствование технологии производства ТЭМ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

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

При всем многообразии возможностей по использованию термоэлектричества можно выделить следующие основные области применения модулей (рис.1):

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

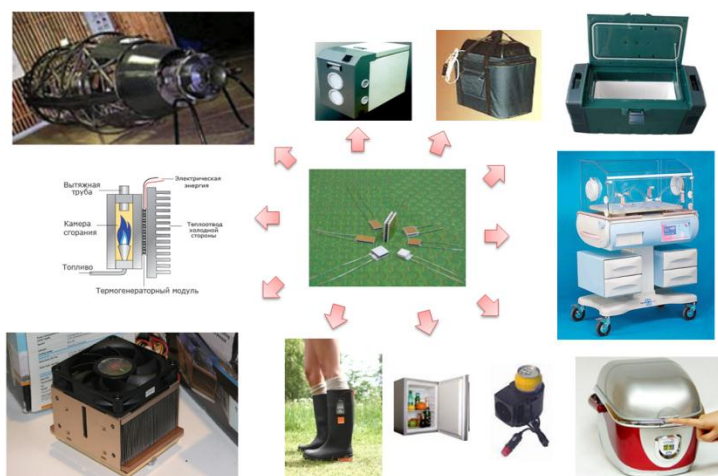


Рисунок 1. Разнообразие областей применения ТЭМ

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.

1. 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. Наиболее сильно эффект Пельтье проявляется на контактах полупроводников с различным типом проводимости (р- или n-) или, другими словами, в р-п переходе. На языке классической физики объяснение эффекта Пельтье заключается во взаимодействии электронов проводимости, замедлившихся или ускорившихся в контактном потенциале р-п 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-п переходу (рис.2).

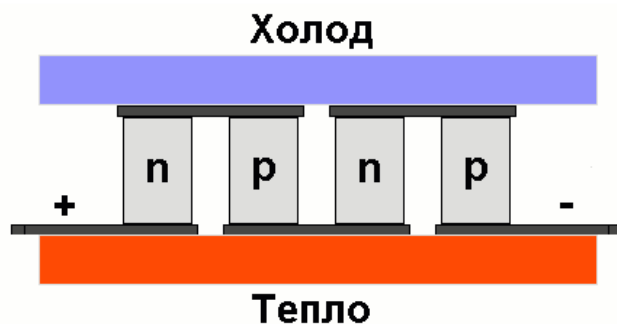


Рис. 2. Действие эффекта Пельтье при протекании тока через полупроводники р- и n-типов проводимости

Эффект Пельтье лежит в основе работы термоэлектрического модуля (ТЭМ). Единичным 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-р выделяется на контакте типа р-п. 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.3). 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.

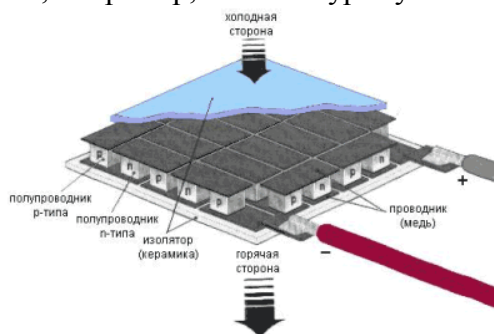


Рис. 3. Структура полупроводникового термоэлектрического модуля

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.

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.

2. Виды ТЭМ

На сегодняшний день выпускается более 150 типов термоэлектрических модулей для самых различных применений. Выпускаемые модули (рис.4) 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

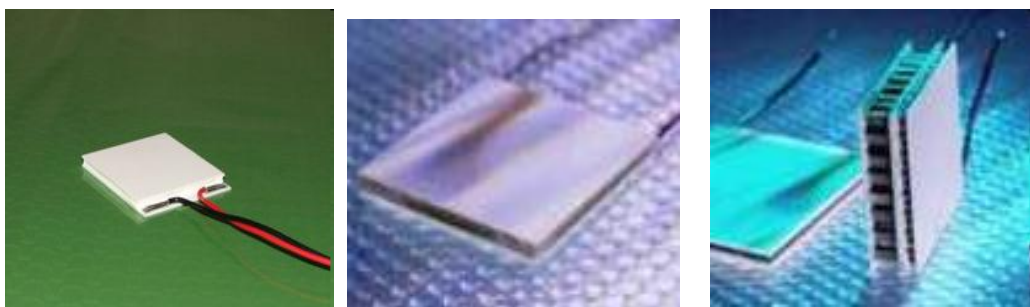


Рис.4. Внешний вид ТЭМ

3. 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.

4. Проблемы и направления исследований ТЭМ

4.1 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 гетероэпитаксиальных 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 гетероэпитаксиальных структурах ($\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$) 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 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 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.

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

4.2 Влияние технологии резания на глубину повреждения слоёв крупногабаритных слитков термоэлектрических материалов

Параметры реальных термоэлектрических материалов зависят не только от эффективности используемых материалов, но также и от физико-химических эффектов на границе между термоэлектрическим материалом и слоем проводника. Электрические и адгезионные свойства в этой контактной области определяются преимущественно предварительной обработкой поверхности пластин, изготовленных из термоэлектрических материалов. Поверхностная деформируемая структура слоя зависит от скорости резания и характеристик способа обработки: в середине может быть слой с идеальной структурой, а по краям материала – со структурой, отличающейся от основной массы (что возникает в результате обработки резанием) (рис.5).

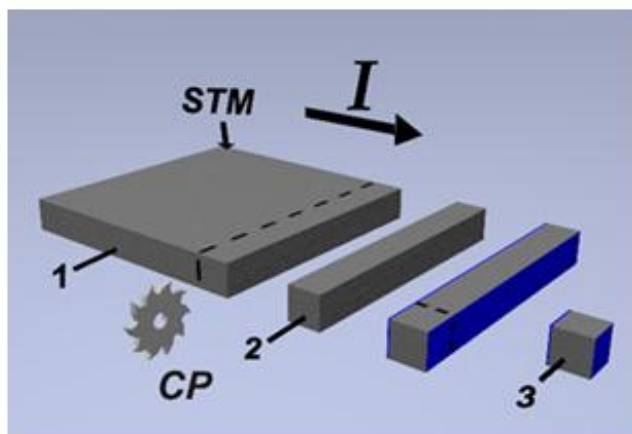


Рис. 5. Процесс резки ТЭ материала на отдельные ТЭ

4.3 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 перспективным направлением разработок признано направление изучения свойств барьерного покрытия и способа его нанесения [4].

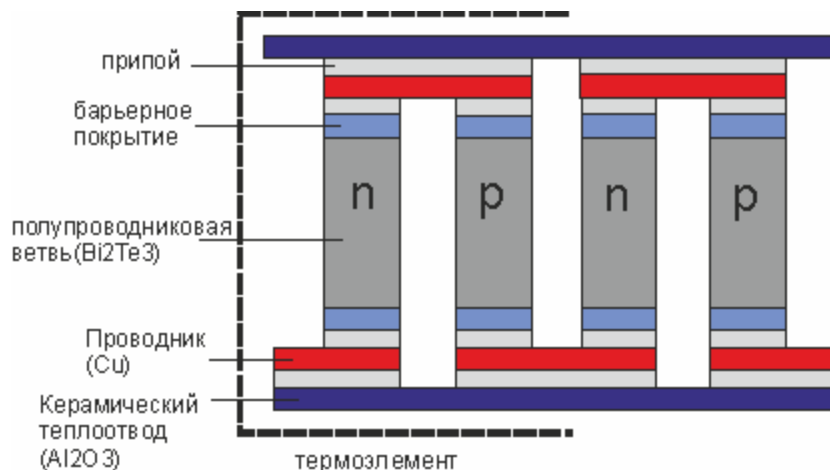


Рис. 5. Поперечное сечение ТЭМ

Теллурид висмута Bi₂Te₃ обладает резко выраженной анизотропией свойств, вследствие чего коэффициенты диффузии и самодиффузии зависят от кристаллографического направления. Коэффициенты диффузии для всех примесей сильно анизотропны, а для Cu, Ag и Au они к тому же необычайно велики. Большая скорость диффузии Cu, Ag и Au в направлении плоскостей скола обусловлена слабой связью и большими промежутками между слоями Te⁽¹⁾ – Te⁽¹⁾. Диффузия примесей перпендикулярно плоскостям скола затрудняется из-за наличия в этом направлении плотной упаковки атомов матрицы и более сложной связи между ними.

Существует иная точка зрения – предполагается, что Cu (или иной материал слоя проводника) быстро диффундирует вдоль дислокаций, плотность которых в направлении разных осей сильно различаются.

Сильная анизотропия скорости роста Bi₂Te₃ и его твердых растворов приводит к тому, что при кристаллизации с плоской границей раздела твердой и жидкой фазы образуется «направленная» структура, в которой плоскости спайности зерен ориентируются параллельно оси слитка (по нормали к фронту кристаллизации). Из-за образования такой структуры становится возможна диффузия атомов слоя проводника в полупроводник.

Для предотвращения встречной диффузии атомов и увеличения срока службы ТЭМ применяют диффузионные барьерные слои, разделяющие проводник и полупроводник в месте их контакта[5]. Эффективность барьерного слоя зависит от его структуры, размера зерна, технологии его нанесения. Барьерные покрытия из Nb, V, Cr, Ti, Rh, Pt, Zr, W, Ta, Mo, Ni и их соединений могут быть получены методами гальванического осаждения и методами вакуумного напыления с использованием термического испарения либо магнетронного распыления. Кроме того известны способы изготовления термоэлектрических модулей, в которых для нанесения барьерного покрытия используются технологии эпитаксиального роста пленок полупроводника на подложке из другого проводника. Достоинством модулей, изготовленных по этой технологии, является высокая надежность и механическая прочность, обеспечиваемые низкой дефектностью материала полупроводника и высоким качеством барьерных покрытий. Недостатком таких модулей является высокая стоимость и длительность технологического процесса изготовления.

Проведём анализ наиболее эффективных методов нанесения барьерных покрытий более подробно, беря во внимание их достоинства и недостатки.

Метод магнетронного распыления

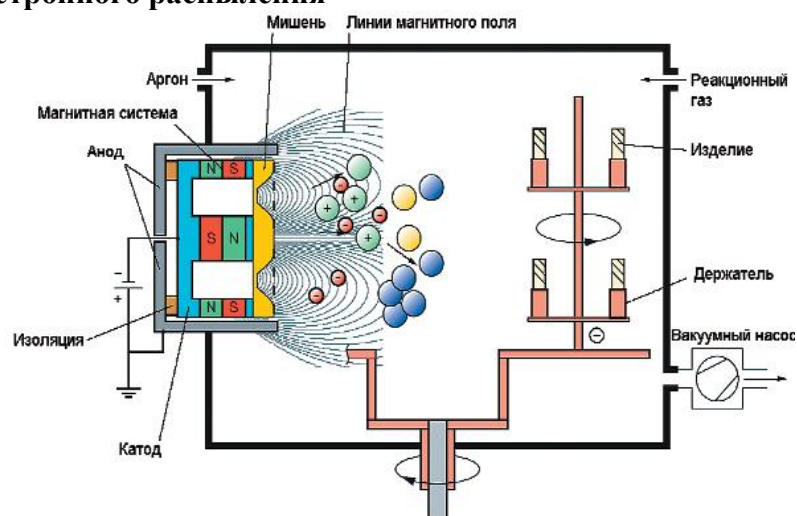


Рис. 6. Метод магнетронного распыления

Достоинства метода нанесения покрытий магнетронным распылением материала:

- крупные зерна структуры покрытий, что уменьшает диффузию по границам зерен;

- бескапельность;
- возможность нанесения любого типа металлического покрытия;

Недостатки метода нанесения покрытий магнетронным распылением материала:

- большая длительность процесса нанесения покрытия;
- высокая дефектность покрытия (поры, структурированность);
- сложность подготовки образцов перед нанесением покрытия.

Электродуговой метод нанесения покрытий

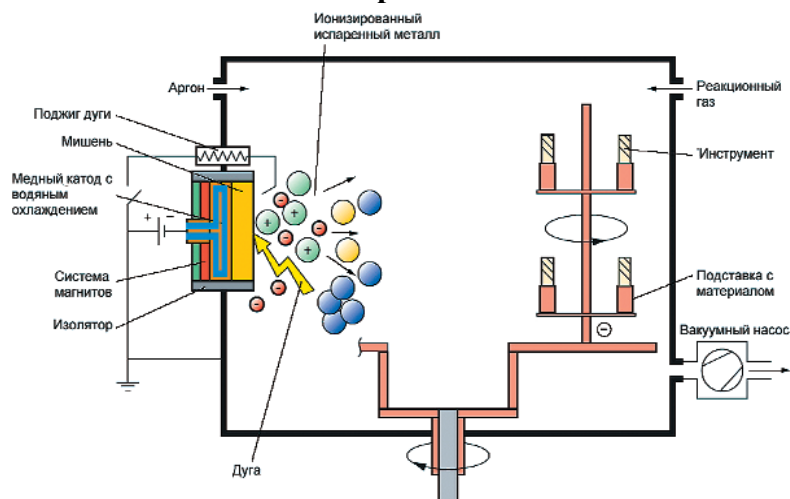


Рис. 7. Электродуговой метод

Достоинства электродугового метода:

- возможность получения потока плазмы на широком спектре материалов;
- высокие плотности потоков плазмы – высокие скорости нанесения покрытий и образования материалов;

- управляемость потоком плазмы – возможность формировать структуру и свойства покрытий и материалов.

Недостатки электродугового метода:

- дуговой разряд, наряду с паровой компонентой, генерирует капли расплавленного материала подложки – макрочастицы. Они могут попадать на покрываемую подложку, образуя нерегулярности в структуре покрытия, дефекты в виде впадин и выступов.

- при ионной бомбардировке наряду с распылением подложки происходит и процесс осаждения покрытия. Процесс осаждения с одной стороны снижает эффективность очистки поверхности мишени от загрязнений, с другой стороны, образуется покрытие, соответствующее материалу катода. Таким образом между поверхностью мишени и рабочим покрытием образуется подслой материала, соответствующего материалу катода. Это приводит, как к снижению адгезии рабочего покрытия к подложке, так и к ухудшению его эксплуатационных свойств.

- низкая степень ионизации реакционного газа ограничивает возможности применения электродугового метода нанесения, создания покрытий с целенаправленными заранее заданными свойствами, снижает возможность контролировать и управлять энергией атомов реакционного газа, уменьшает их реактивность при формировании соединений как с частицами материала катода, так и с материалом подложки.

Метод электродугового напыления материала с помощью электродугового источника с сепарацией потока плазмы

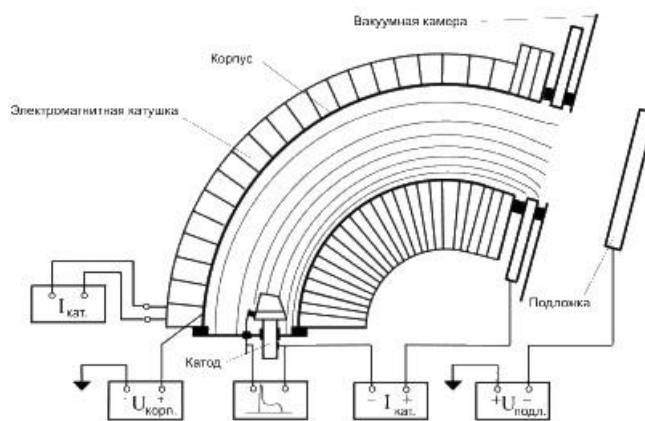


Рис. 8. Криволинейный плазмовод

На рис. 8 приведен криволинейный плазмовод, разработанный Додоновым А.И. и Башковым В.М. Данная технология обеспечивается высокоэффективным источником дуговой газометаллической сепарированной плазмы с производительностью, приемлемой для использования в промышленности, и с расширенными технологическими возможностями.

Преимуществом настоящей технологии является создание высокоэффективного потока сепарированной газометаллической плазмы, в которой сильноионизованной являются как металлическая, так и газовая компоненты со сравнительно высоким коэффициентом использования плазмообразующего материала и большой производительностью. Это приводит к возможности промышленного применения потока сепарированной электродуговой плазмы и реализации новых технологических процессов.

Достоинства технологии нанесения:

- по сравнению с магнетронной и другими плазменными технологиями поток электродуговой плазмы сильно ионизован, что дает возможность управлять потоком плазмы и его характеристиками с помощью магнитных и электрических полей;

- поток плазмы данного источника очищен от микро- и нейтральных частиц и состоит из металлической составляющей – ионов катода, и газовой составляющей – ионов рабочего газа;
- высокая чистота поверхности покрытий, практически соответствующей чистоте поверхности исходных изделий, что обеспечивает высокую плотность контакта при пайке;
- покрытие практически не имеет пор и микровключений, что обуславливает высокую коррозионную стойкость и антидиффузионность, в том числе при высоких температурах;
- высокая адгезия между покрытием и изделием, которая обеспечена ионным травлением поверхности полупроводника;
- устройство обеспечивает травление поверхности подложки катодным распылением и тем самым позволяет проводить более эффективную очистку поверхности перед нанесением покрытий;
- возможность проведения ионной очистки при небольших ускоряющих напряжениях значительно снижает вероятность возникновения микродуг на поверхности подложки и тем самым уменьшает ее повреждение
- возможность создавать требуемый микропрофиль и микрорельеф поверхности методом травления катодным распылением, например, с использованием технологии «масок»
- высокая степень ионизации как металлической, так и газовой компоненты и отсутствие в потоке нейтральной металлической компоненты и макрочастиц позволяют контролировать и управлять энергией частиц, приходящих на подложку, и повышает реакционность при формировании соединений как испаренного материала с реакционным газом, так и непосредственно с материалом подложки.

К недостаткам данной технологии можно отнести:

- мелкозеренная структура покрытия, может привести к снижению антидиффузионных свойств покрытий;
- большой расход материала катода во время процесса нанесения покрытия;
- проблема регулирования температуры подложки при технологическом процессе нанесения покрытия.

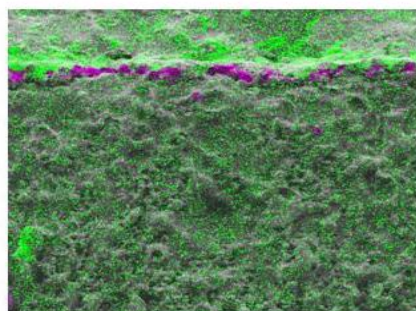
Достоинства и недостатки методов сведены в сравнительную таблицу.

	Зёрна	Тип покрытия	Бескапельность	Быстрота нанесения	Поры	Сложность под-готовки образцов	Управляемость потока
Магнетр	крупные	∇	+	-	+	+	-
Э/д	средние	Кроме легкоплав. Ме	-	+	+	-	+
Э/д с сепар.пл	мелкие	∇	+	+	-	-	+

На рисунках 9,10,11 показаны диффузионные карты меди и теллурида висмута по поперечному срезу (шлифу) элемента термоэлектрического модуля для барьерных слоев, полученных на электродуговой вакуумной установке с помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы, и типовых барьерных слоев, нанесенным магнетронным методом. Диффузионные карты получены после отжига термоэлектрических модулей в течение 5 часов при температуре 250С°. Концентрация белых точек на рисунках соответствует концентрации соответствующего элемента. Диффузионные карты получены

на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II с системой микроанализа INCA Energy 350.

Структура слоёв ТЭМ (поперечный шлиф)



- ← Контактный слой (Cu)
- ← Барьерный слой (Ni)
- ← Полупроводник (Te_2Bi_3)

Рис. 9. Структура слоёв ТЭМ (поперечный шлиф)

Диффузионные карты Cu

Результаты для барьерного слоя, полученного на электродуговой вакуумной установке с помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы



Результаты для барьерного слоя, полученного магнетронным методом

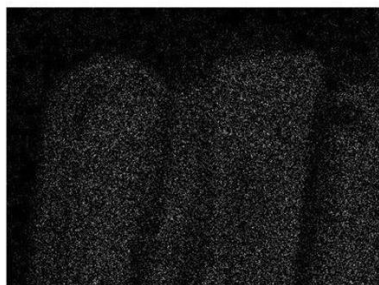


← БАРЬЕРНЫЙ СЛОЙ →

Рис. 10. Диффузионные карты Cu

Диффузионные карты Te_2Bi_3

Результаты для барьерного слоя, полученного на электродуговой вакуумной установке с помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы



Результаты для барьерного слоя, полученного магнетронным методом



← БАРЬЕРНЫЙ СЛОЙ →

Рис. 11. Диффузионные карты теллурида висмута

Видна высокая эффективность барьерного слоя, полученного на электродуговой вакуумной установке с помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы, по сравнению с типовым барьерным слоем, нанесенным магнетронным методом. Для данных условий отжига, встречная диффузия атомов меди и атомов термоэлектрического материала барьерным слоем, полученным на электродуговой вакуумной установке с

помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы, практически "остановлена". Неровная граница между термоэлектрическим материалом и медным контактным слоем в случае барьерного слоя обусловлена первоначальной формой поверхности теллурида висмута.

Внешний вид установки ВИТ-2, на которой реализована технология CALT SID - Cathodic Arc Low Temperature Separated Ion Deposition - нанесение покрытий из сепарированной плазмы дугового разряда при низкой температуре, представлен на рис.12. На рис. 13 приведена принципиальная схема данной установки.

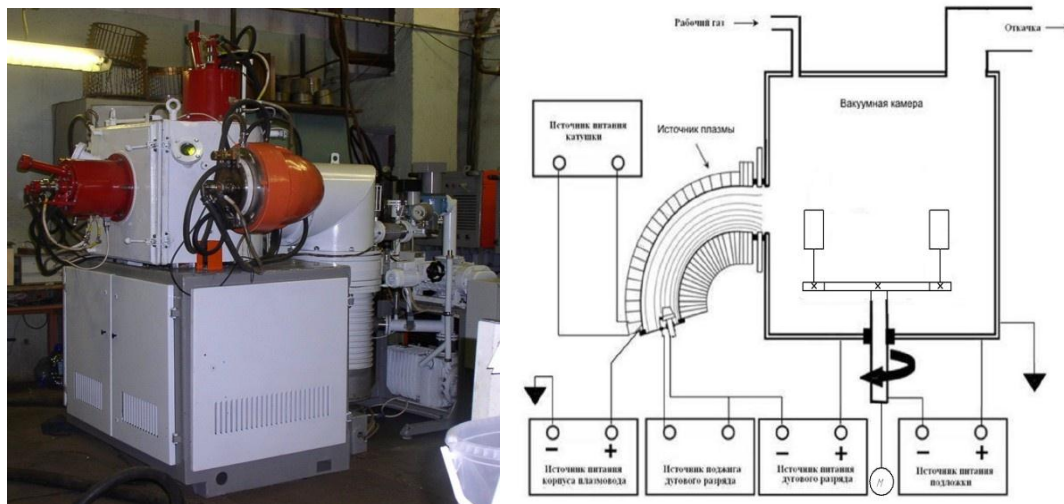


Рис. 12,13. Внешний вид и принципиальная схема установки ВИТ-2

В источниках плазмы, различного типа, расположенных на стенках вакуумной камеры формируется поток плазмы на основе ионов материала катода источников плазмы и ионов рабочего газа, подаваемого в камеру. Поток направляется на изделия, расположенные в вакуумной камере на механизме вращения. Ионы потока плазмы ускоряются напряжением от источника питания подложки, приложенным к механизму вращения. Ионы плазмы бомбардируют поверхность подложки.

Исследование технологии нанесения покрытий позволило установить, что электродуговой метод имеет существенные преимущества перед магнетронным методом распыления материала такие, как возможность управление потоком плазмы и его характеристиками проведения ионной очистки перед нанесением покрытия, что обеспечивают высокую чистоту поверхности и улучшение адгезии, короткая длительность технологического процесса нанесения покрытия, простота подготовки образцов. Из существующих методов нанесения покрытий электродуговыми методами выбран метод нанесения коммутационных покрытий на электродуговой вакуумной установке с помощью источника плазмы с сепарацией потока плазмы, позволяющий практически прекратить диффузию материала проводника в полупроводник.

Был проведён ряд экспериментальных исследований[4]. Сравнивались два образца. Первый был получен магнетронным способом (Ni барьерное покрытие), второй - электродуговым источником с сепарацией потока плазмы (Ti барьерное покрытие). Экспериментальные исследования и работа в целом проводилась в ООО «Новые Плазменные Технологии».

Результат: технология нанесения барьерного покрытия из Ti дуговым методом (электродуговой источник с сепарацией потока плазмы) позволяет увеличить срок службы ТЭМ на основе теллурида висмута, работающих при температурах до 250 °С, 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.

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, надежные и экологически чистые термоэлектрические охлаждающие системы.

В данной работе были изучены ТЭМ, проблемные этапы их производства, предложена новая технология нанесения барьерных покрытий с целью повышения надёжности и срока службы модулей. В настоящее время прорабатываются возможности технической реализации новой технологии для серийного производства модулей.

Литература

1. Тушенцова Екатерина Николаевна. Термоэлектрический модуль (ТЭМ) [Электронный ресурс] // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2011: Машиностроительные технологии» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Электрон. дан. – М.: МГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: ПЭВМ, ОС Windows. – Режим доступа: <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=351>. – Загл. с экрана. - № гос. регистрации 0321100671.
2. Абрютин В., Нестеров С., Романько В., Холопкин А. Создание термоэлектрических материалов из нанопорошков сплавов теллурида висмута // XXIII Международный симпозиум «Тонкие плёнки в электронике» – 2010.
3. 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.
4. Патент RU 2425434 «Способ изготовления термоэлектрического модуля с увеличенным сроком службы»/ Башков В.М., Беляева А.О., Горбатовская Т.А. и др.
5. Патент RU 2173911 «Получение электродуговой плазмы в криволинейном плазмоведе / Додонов А.И.; Башков В.М.