

УДК 537.32

Запаров С.Ф.



Запаров С.Ф.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

**СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАЗРЕЗАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ Bi_2Te_3 ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ МЕТОДОМ
И ПРОВОЛОКАМИ СО СВЯЗАННЫМ АБРАЗИВОМ**

*Проблема повышения качества термоэлектрических модулей охлаждения, генераторных модулей, ветви которых содержат полупроводниковый термоэлектрический материал на основе Bi_2Te_3 , остается актуальной. Рост показателей качества и снижения стоимости термоэлектрических модулей достигается, с одной стороны схемно-конструктивными решениями, с другой – выбором технологии производства и поддержанием достигнутого уровня надежности при эксплуатации. Технологический процесс изготовления полупроводниковых термоэлектрических ветвей *n*- и *p*-типов достаточно отработан, и качество здесь прежде всего обеспечивается уровнем технологического оборудования и квалификации персонала. Проведен сравнительный анализ размерной обработки термоэлектрического материала на основе Bi_2Te_3 электроискровым методом и проволоками с нанесенными алмазными зёрнами. Определены оптимальные методы разрезания ТЕМ на диски и ветви, которые обеспечивают наилучшее качество с сохранением высокой производительности. Показано преимущество метода разрезания проволокой со связанным абразивом.*

Ключевые слова: термоэлектрический материал, метод обработки, теллурид висмута.

*The problem of quality enhancement of thermoelectric cooling modules and generator modules whose legs comprise Bi_2Te_3 -based semiconductor thermoelectric material continues to be relevant. On the one hand, quality enhancement and cost reduction of thermoelectric modules is attained by design solutions, on the other hand, by selection of manufacturing process and maintenance of the achieved reliability level in operation. The process of manufacturing semiconductor thermoelectric legs of *n*- and *p*-types is adequately tried and tested, and quality here is primarily assured by the level of technological equipment and staff qualification. Comparative analysis is performed of Bi_2Te_3 -based thermoelectric material dimensional processing using electric spark method and diamond-coated wires. The optimal methods for cutting thermoelectric material (TEM) into discs and legs providing for the best quality with retention of high throughput are determined. The advantage of cutting method using a wire with bound abrasive is demonstrated.*

Key words: thermoelectric materials, processing methods, bismuth telluride.

Введение

В производстве ветвей (полуэлементов) термоэлектрических модулей широко используется следующая технологическая схема:

- получение слитков термоэлектрических материалов;
- разрезка слитков на диски, диски на полуэлементы термоэлектрического материала *n*- и

p-типов одним из бездефектных методов (электроэрозионным с проволочным электродом или механическим с использованием проволоки со связанным или свободным абразивом, алмазными дисками).

При разрезании термоэлектрического материала возникают и нарушенные слои. Свойства нарушенных слоев существенным образом отличаются от свойств основного материала, эти слои содержат множество дефектов, вследствие чего добротность термоэлектрического материала в приповерхностном слое значительно ниже, чем в объеме. Таким образом, каждая из полученных ветвей – это параллелепипед, охваченный поверхностным слоем материала с ухудшенными параметрами.

Цель работы – сопоставительный анализ размерной обработки термоэлектрического материала двумя методами (электроэрозионным и проволокой с нанесенными алмазными зернами), их преимущества и недостатки.

Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка – контролируемое разрушение материала под действием электрических разрядов, образующихся вследствие протекания импульсного тока между электродами 1, 2 (рис. 1), находящихся в непосредственной близости друг от друга в среде жидкого диэлектрика, то есть обработка материала через электрическую эрозию. В результате этих разрядов из материала выбиваются микрочастицы, которые выносятся из межэлектродного зазора струей диэлектрика. Кроме этого, диэлектрик играет роль катализатора процесса распада, так как при высокой температуре разряда в зоне эрозии превращается в пар. К этим методам относят электроимпульсную, электроконтактную, высокочастотную электроискровую и электроискровую обработку.

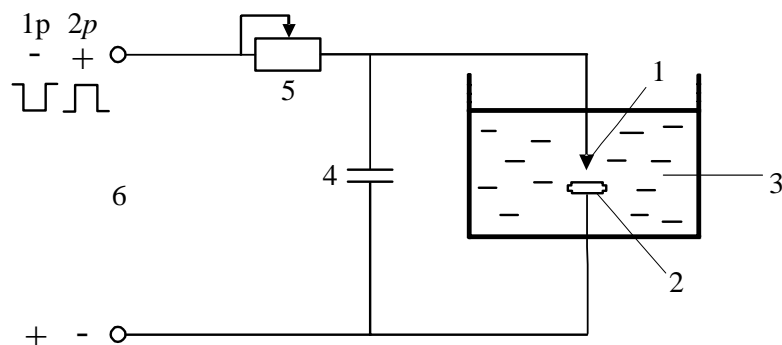


Рис. 1. Схема электроэрозионной обработки материала:

1 – электрод-инструмент, 2 – обрабатываемый материал, 3 – среда, в которой производится разряд, 4 – конденсатор, 5 – реостат, 6 – источник питания, 1*p*-режим электроискровой обработки, 2*p*-режим электроимпульсной обработки.

При электроимпульсной обработке используют электрические импульсы большой длительности (500 – 10000 мкс), в результате чего происходит дуговой разряд. Электроимпульсную обработку целесообразно применять при предварительной обработке штампов, турбинных лопаток, фасонных деталей из жаростойких сплавов. Этот вид обработки не применяется для термоэлектрических материалов вследствие очень большой глубины нарушения слоев.

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или даже расплавленного металла из зоны обработки механическим способом: относительным движением заготовки и инструмента.

Источником теплоты в зоне обработки служат импульсные дуговые разряды. Электроконтактную обработку оплавлением, рекомендуют для обработки крупных деталей из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких и специальных сплавов. Не рекомендуется для обработки ТЭМ вследствие сильного нарушения свойств ТЭМ в приповерхностных слоях.

Высокочастотную электроискровую обработку применяют для повышения точности и уменьшения шероховатости поверхности обработанных электроэрозионным методом. Метод основан на использовании электрических импульсов малой мощности при частоте 100 – 150 кГц.

При электроискровой обработке используют импульсные искровые разряды между электродами, один из которых – обрабатываемая заготовка (анод), а другой – инструмент-проволока (катод). Заготовкой служит термоэлектрический материал на основе Bi_2Te_3 . Поверхность инструмента подвергается разрушению, поэтому проволока должна постоянно протягиваться. Диапазон применяемых диаметров инструмента-проволоки находится в пределах 0.03 – 0.1 мм. Материалом проволоки может служить латунь, молибден, вольфрам. Использование латуни может привести к проникновению в термоэлектрический материал электроактивных примесей. Повторное использование инструмента-проволоки не рекомендуется, так как это приведет к неконтролируемому изменению параметров разрезанного материала и частому обрыву проволоки. Обязательно необходимо применение жидкостей, которые охлаждают электроды и стабилизирует процесс разрезания слитков термоэлектрического материала на диски (рис. 2).

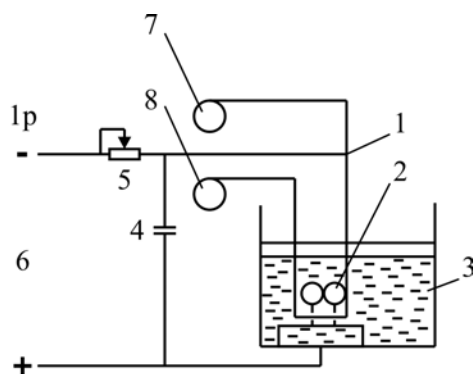


Рис. 2. Схема электроискровой обработки (ТЭМ):

- 1 – инструмент-проволока, 2 – слитки (ТЭМ), 3 – среда в которой производится разряд,
4 – конденсатор, 5 – реостат, 6 – источник питания, 7 – катушка с проводом,
8 – катушка с отработанным проводом, 1р-режим электроискровой обработки.

К недостаткам этого метода можно отнести: сравнительно низкую производительность обработки, износ электрода-проволоки, применение преимущественно релаксационных, т.е. зависящих от состояния межэлектродного промежутка схем генерирования импульсов – длительностью 10 – 200 мкс при частоте 2 – 5 кГц, использование прямой полярности тока. На обрабатываемой поверхности термоэлектрического материала, на основе теллурида висмута, образуются приповерхностные нарушенные слои глубиной 20 – 30 мкм, которые снижают добротность ветвей. Поэтому обязательной операцией является удаление нарушенного слоя химическим травлением.

Нельзя забывать, что при электроэрозионной обработке происходит загрязнение воздуха рабочей зоны и, как следствие, окружающей среды вредными веществами, выделяемыми в процессе работы. Такими веществами являются диоксид азота, диоксид серы, угарный газ, ксилол.

Резка проволоками со связанным абразивом

Метод резки проволоками со связанным абразивом позволяет слитки ТЭМ на основе Bi_2Te_3 разрезать на диски, диски на ветки *n*- и *p*-типов (рис. 3).



Рис. 3. Диски и ветки *n*- и *p*-типов

Основа режущего инструмента – сменная рамка (рис. 4), с равномерно натянутой проволокой с алмазным микропорошком. Шаг наматывания вольфрамовой проволоки задается пазами размерных планок.

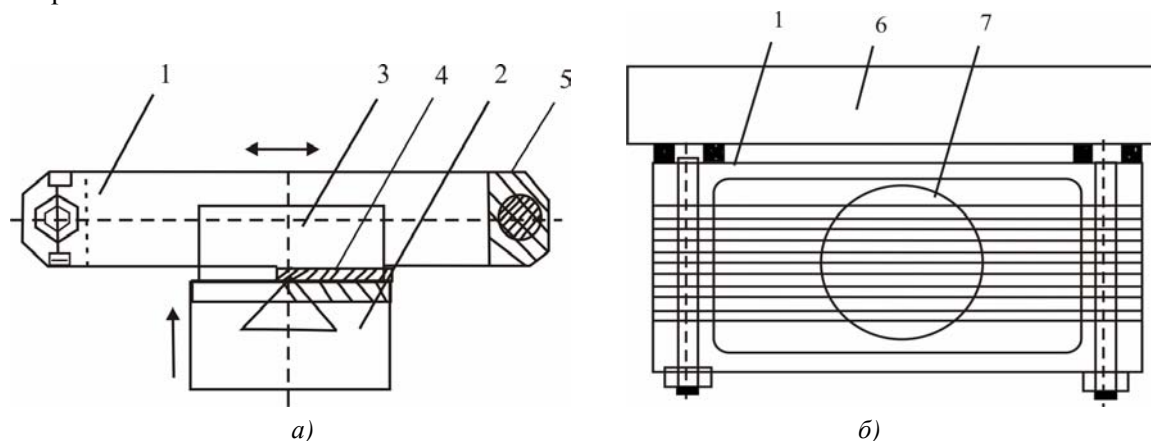


Рис. 4. Сменная рамка с нанесёнными алмазными зёрнами:

1 – рамка, 2 – столик, 3 – ТЭМ, 4 – прокладка, 5 – размерные планки,
б – каретка, 7 – проволока с нанесёнными алмазными зёрнами.

Режущий слой на проволоке формируется путем закреплением синтетических алмазных зерен размером 40/28 гальваническим способом. В качестве металла-связки применяют никель.

По сравнению с электроискровым методом, проволоочная резка позволяет получить разрезанные диски и ветви *n*- и *p*-типов со значительно меньшими нарушениями структуры на поверхности разрезаемого материала. Ввиду малых термодинамических напряжений, которые возникают в зоне разрушения, глубина нарушенных слоев термоэлектрического материала не превышает 10 – 25 мкм.

Оптимальное разрезание составляет 1 мм/мин. Специально разработанный станок струнной резки Алтек-13005М (рис. 5) обеспечивает при одновременном использовании 4-х режущих инструментов высокую производительность.

За 8 часов работы станка при разрезании дисков термоэлектрического материала *n*- и *p*-типов диаметром 24.0 мм и толщиной 1.5 мм можно получить не меньше 21000 шт. полуэлементов сечением $1.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$.

Контрольныерезы позволили определить процент отходов в процессе разрезания дисков термоэлектрического материала $\varnothing 24.0 \text{ мм}$ и толщиной 1.5 мм на ветви в порошкообразном виде, а после промывки и разбраковке в твердом состоянии.

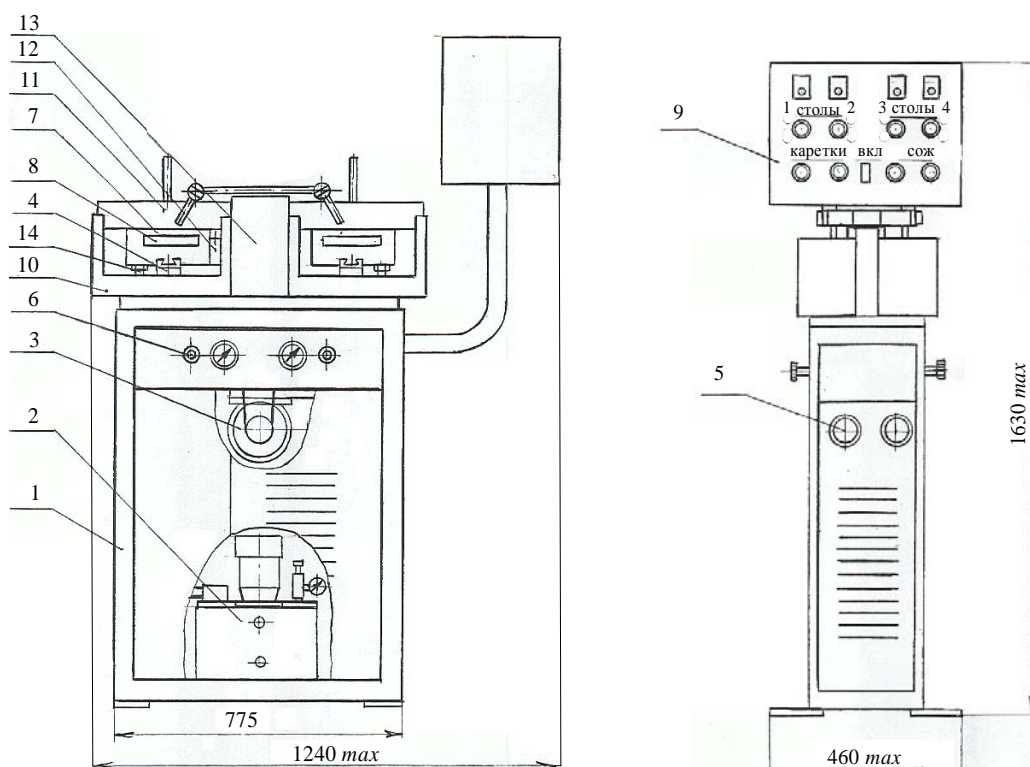


Рис. 5. Станок струнной резки Алтек – 13005М.

- 1 – станина, 2 – гидростанция, 3 – главный привод, 4 – столы с гидроприводами,
 5 – моторы сервоприводов подъёма – опускания столов, 6 – регуляторы давления подачи столов,
 7 – каретка с гидростатическими направляющими, 8 – режущая рамка с нанесёнными алмазами,
 9 – пульт управления, 10 – поддон, 11 – левая крышка, 12 – защитный угольник левого поддона,
 13 – кожух, 14 – микровинты установки глубины разрезания.

В порошкообразном состоянии процент отходов существенно выше, чем в твердом. По завершении 8 часовой работы станка струнной резки Алтек-13005М порошкообразные отходы оседают в баке для отходов в виде пульпы. Для облегчения последующей регенерации необходимо чтобы отходы термоэлектрического материала *n*- и *p*-типов были разделены.

Таблица

Размер ветвей	1.0×1.0×1.5 мм
Количество дисков 1 шт.	вес 5 г.
Количество резов	19
Годных ветвей 283 шт.	вес 3.02 г. 60.4%
Общее количество отходов	вес 1.98 г. 39.6%
Отходы в твердом виде	вес 0.34 г. 6.8%
Отходы в порошковом виде	вес 1.64 г. 32.8%
Размер ветвей	1.4×1.4×1.5 мм
Количество дисков 1 шт.	вес 5 г.
Количество резов	14
Годных ветвей 143 шт.	вес 3.23 г. 64.6%
Общее количество отходов	вес 1.77 г. 35.4%
Отходы в твердом виде	вес 0.47 г. 9.4%
Отходы в порошковом виде	вес 1.3 г. 26%

Станок Алтек-13005М позволяет применять отдельный сбор порошкообразных отходов *n*- и *p*-типов, которые возникают при разрезании термоэлектрического материала на основе Bi_2Te_3 .

Выводы

1. Преимуществом метода разрезания проволокой со связанным абразивом по сравнению с электроэрозионным, при размерной обработке сплавов на основе теллурида висмута на станках струнной резки Алтек-13005М является высокая производительность, минимальная глубина нарушенного слоя, меньшее потребление электроэнергии на единицу продукции, низкая стоимость процесса разрезания.
2. Описан способ отдельного сбора порошкообразных отходов *n*- и *p*-типов термоэлектрического материала на основе Bi_2Te_3 в процессе резки для последующей регенерации.
3. Применение станка струнной резки обеспечивает экологическую безопасность обработки, поскольку во время работы (в отличие от электроискрового метода) в окружающую среду не попадают токсичные пары летучих компонент полупроводникового материала.

Литература

1. Готра З.Ю. Справочник по технологии микросистемных устройств. – Львов: Каменяр, 1986. – 287 с.
2. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 М. Наука, 1972. – 320с.
3. Станок для резки полупроводниковых материалов Алтек – 13005М. Рекламный проспект.

Поступила в редакцию 12.08.2015.