

УДК 537.32



Запаров С.Ф.

Запаров С.Ф.

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

СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ТЭМ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В работе описаны различные методы размерной обработки термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 . Проведен сравнительный анализ средств обработки с учетом глубины нарушенных поверхностных слоев термоэлектрического материала на основе теллурида висмута. Определены преимущества и недостатки технологических режимов при обработке термоэлектрических материалов.

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

This paper studies different methods for dimensional processing of thermoelectric materials based on Bi_2Te_3 . A comparative analysis of processing tools has been made with regard to the depth of damaged surface layers of thermoelectric materials based on bismuth telluride. The benefits and drawbacks of operating practices while processing thermoelectric materials have been determined.

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

Введение

Термоэлектрические модули охлаждения, генераторные модули содержат ветви из полупроводниковых термоэлектрических материалов (ТЭМ) на основе Bi_2Te_3 . Эти материалы в большинстве случаев получают методами вертикальной зонной плавки, Бриджмена или Чохральского. Широко также применяется метод экструзии.

Как правило, полученные указанными методами ТЭМ, имеют цилиндрическую форму в виде слитков диаметром от 10 до 30 мм при длине от 50 до 400 мм. Из этих слитков, необходимо изготовить ветви *n*- и *p*-типов в виде прямоугольных параллелепипедов, требуемый размер граней которых может быть различным – от несколько десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Для изготовления ветвей необходимо выполнить разделение слитка и изготовление образцов ТЭМ заданных размеров. Основным требованием к процессу размерной обработки является сохранение термоэлектрической добротности ТЭМ. Важными также являются ее стоимость и производительность.

Настоящая статья посвящена сравнительному анализу существующих методов и средств размерной обработки ТЭМ на основе Bi_2Te_3 .

Методы размерной обработки материалов

Методы размерной обработки материалов подразделяются на следующие основные группы:

– электронно-лучевая;

- свето-лучевая (лазерная);
- электроэрозионная;
- электрохимическая;
- механическая.

Электронно-лучевые и лазерные методы размерной обработки полупроводниковых материалов широко используются в микроэлектронике. Однако они не применяются для размерной обработки материалов на основе Bi_2Te_3 , поскольку высокие плотности энергии при взаимодействии с теллуридом висмута приводят к подплавлению приповерхностных слоев и существенному снижению добротности.

Электроэрозионные методы обработки основаны на законах эрозии (разрушения) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока. К этим методам относят электроискровую, электроимпульсную, а также высокочастотные: электроискровую, электроимпульсную и электроконтактную обработку.

При электроискровой обработке используют импульсные искровые разряды между электродами, один из которых обрабатываемая заготовка (анод), а другой – инструмент (катод).

При электроимпульсной обработке используют электрические импульсы большой длительности (500 – 10000 мкс), в результате чего происходит дуговой разряд. Электроимпульсную обработку целесообразно применять при предварительной обработке материала. Точность размеров и шероховатость обработанных поверхностей зависят от режима обработки.

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

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 (ЭКО) оплавлением рекомендуют для крупных деталей. Для размерной обработки ТЭМ в основном применяют электроискровой метод (рис 1).

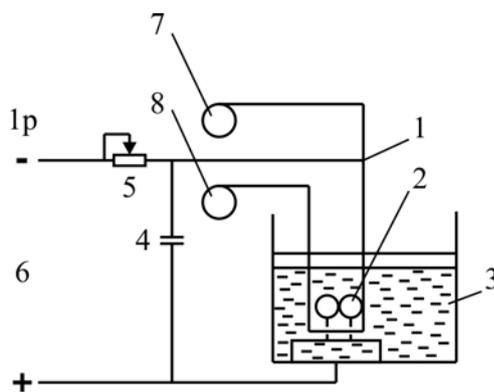


Рис. 1 Схема электроискровой обработки ТЭМ:

- 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, I_p -режим электроискровой обработки.

При сближении двух электродов 1 и 2 при условии подачи на них напряжения, достаточного для пробоя образовавшегося межэлектродного промежутка, возникает

электрический разряд в виде узкого проводящего столба с температурой, измеряемой десятками тысяч градусов. У основания этого столба наблюдается разрушение (оплавление, испарение) материала электродов. Электродом-инструментом является непрерывно перемещающаяся латунная, вольфрамовая или молибденовая проволока диаметром 0.05 – 0.30 мм. Обработку производят в среде рабочей жидкости, в качестве которой используют воду. Жидкая среда обеспечивает возникновение динамических сил, необходимых для удаления разрушаемого материала. Охлаждая электроды, жидкость стабилизирует процесс разрезания.

Характерные черты этого процесса: сравнительно низкая 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, снижающие добротность ветвей. Поэтому обязательной операцией является удаление нарушенного слоя химическим травлением.

Электрохимическая размерная обработка характеризуется большой энергоемкостью процесса, для эффективного разрезания теллурида висмута требуется применение специального электролита. Поэтому для массового производства ветвей ТЭМ этот метод не используется.

Механическая размерная обработка термоэлектрических материалов имеет свои особенности. Поскольку теллурид висмута характеризуется низкой механической прочностью и хрупкостью, обычные механические методы размерной обработки неприемлемы. Практически единственным методом для механической обработки термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 является обработка с использованием связанных или свободных абразивов.

Для резки термоэлектрического материала используют стальные полотна, диски, металлические струны, где применяют абразивный порошок (свободный абразив) или с нанесенными на них алмазными зёрнами (связанный абразив).

Абразивным может быть любой природный или искусственный материал, зёрна которого обладают определёнными свойствами: твёрдостью, абразивной способностью, механической стойкостью. Главной особенностью абразивных материалов является их высокая твёрдость по сравнению с обрабатываемыми материалами, на чём построены все процессы механической обработки.

Под твёрдостью понимают способность абразивного материала сопротивляться вдавливанию в него другого материала, не получающего остаточных деформаций.

Под абразивной способностью – возможность с помощью одного материала обрабатывать другой или группу различных материалов.

Под механической стойкостью – способность абразивного материала выдерживать механические нагрузки и не разрушаться при механической обработке.

Алмаз – самый твёрдый из известных материалов. Его микротвёрдость равна $9.8 \cdot 10^{10}$ Н/м². В промышленности используются в основном искусственные алмазы, которые получают из графита, обработанного под большим давлением и при высокой температуре.

Резка стальными полотнами или наборами полотен с использованием абразивной суспензии показана на (рис. 2).

В зону резки подают абразивную суспензию, которая, ускоряясь за счет движения полотен, с силой ударяет в обрабатываемый материал и откалывает от него микрочастицы. Процесс резки ускоряет частицы абразива, постепенно обновляемые в зазоре между стальными полотнами и термоэлектрическим материалом. Абразивная суспензия достаточно хорошо отводит тепло из зоны резки и специального охлаждения не требует.

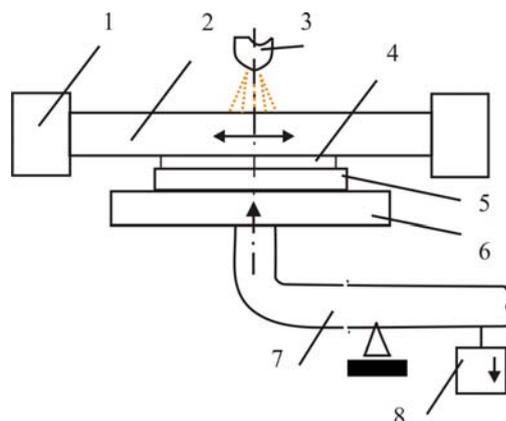


Рис. 2. Резка стальными полотнами:
1 – обойма, 2 – стальное полотно, 3 – сопло подачи суспензии,
4 – разрезаемый материал, 5 – прокладка, 6 – столик, 7 – рычаг, 8 – груз.

Метод не обеспечивает высокой производительности и качества из-за неравномерности натяжения полотен в обойме, их вибрации, неравномерности износа.

Проволочная пила представляет собой проволоку толщиной 0.08 – 0.10 мм. Резка осуществляется набором проволочных пил (рис. 3) с использованием свободного абразива.

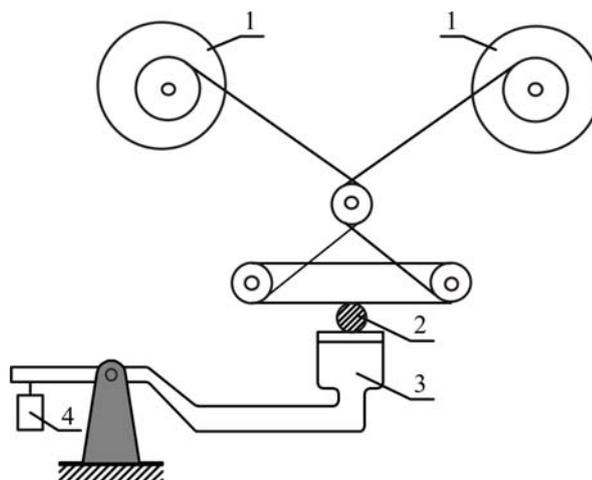


Рис. 3. Резка проволокой:
1 – проволока, 2 – материал, 3 – рычаг, 4 – груз.

Проволочная пила позволяет выполнять одновременно разрезку заготовки на большое количество дисков, а за счет ширины пропила (проволочная пила \varnothing 0.08 – 0.10 мм) достигается большая экономия обрабатываемого материала. Но основное достоинство проволочной резки заключается в том, что этот метод позволяет получить обработанные образцы с минимальными нарушениями структуры кристалла ввиду малых термодинамических напряжений, возникающих в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Однако этому методу присущи и ограничения, не позволяющие широко и эффективно использовать проволочный инструмент для резки крупных кристаллов. К ним в первую очередь относится малая устойчивость проволоки, причем сопротивляемость проволоки во всех направлениях одинаковая, что в значительной степени сказывается на макропрофиле обрабатываемых поверхностей. Этот метод малопроизводителен, стоимость его достаточно велика, поэтому рассмотренный способ применяется лишь для резки на небольшую глубину, где эффективность не играет большой роли.

Разрезание диском с наружной алмазной кромкой по сравнению с процессом резания полотнами или проволокой с применением абразивной суспензии обладает более высокой производительностью. Схема процесса изображена на (рис. 4).

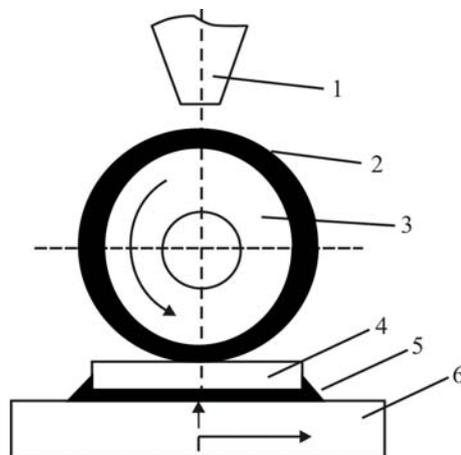


Рис. 4. Резка алмазным диском с внешней режущей кромкой:

1 – сопло подачи охлаждающей жидкости, 2 – режущая кромка диска, 3 – основа диска,
4 – разрезаемый материал, 5 – клеящий материал, 6 – подложка.

Алмазосодержащий режущий слой на металлический диск наносится с помощью специальной связки (органической, керамической, металлической) гальваническим методом. Из всех видов связок только металлическая полностью обеспечивает сцепление алмазосодержащего слоя с металлическим диском. Диск закрепляется на шпинделе станка своей центральной частью. Такое закрепление не обеспечивает высокой жёсткости диска. Режущая кромка выступает за наружный диаметр прижимных фланцев не более чем на 1.5 мм глубины разрезания. В процессе резки диск не должен вибрировать, и отклоняться от плоскости, что довольно затруднительно осуществить.

Способом резки алмазным диском с внутренней режущей кромкой (рис. 5) можно производить разрезание слитков на диски, а дисков – на отдельные кристаллы. Основой алмазного диска служит стальная фольга толщиной 0.1, 0.2 мм. На внутреннюю кромку диска наносится абразив описанным выше гальваническим методом.

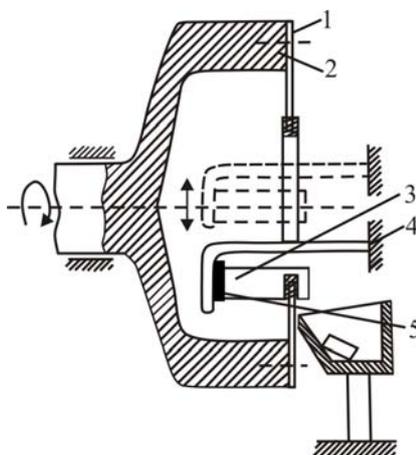


Рис. 5. Резка алмазным диском с внутренней режущей кромкой:

1 – круг АКВР, 2 – барабан, 3 – слиток, 4 – оправка, 5 – клеящая мастика

К преимуществам резки относится высокая скорость резания, хорошее качество обработки поверхности, малый разброс по толщине, небольшие отходы материала. Однако при увеличении частоты вращения диска свыше 5000 об/мин возникает вибрация станка и повышение температуры в зоне разрезания. Недостатки резки: сложность установки алмазного диска, его натяжения и центровки, то есть зависимость качества и точности обработки от точности и качества инструмента.

Принцип резки струнами с нанесёнными алмазными зёрнами практически тот же, что и при резке алмазными дисками, но благодаря гибкости струн, натяжение по всей плоскости инструмента осуществляется равномерно (рис. 6). Струны из вольфрама размещаются на сменной рамке, которая является режущим инструментом. Расстояние между струнами задаётся размерными планками.

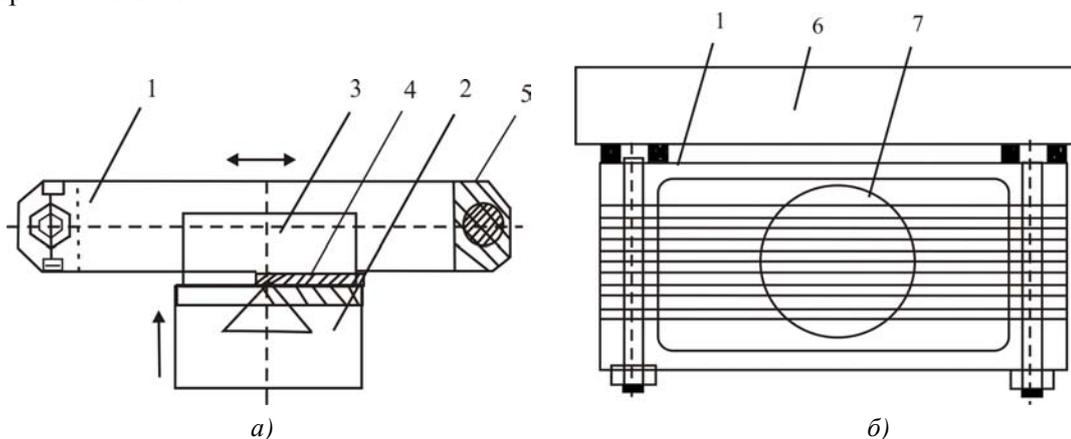


Рис. 6. Рамка со струнами с нанесёнными алмазными зёрнами:
1 – рамка, 2 – столик, 3 – ТЭМ, 4 – прокладка, 5 – размерные планки (а),
6 – каретка, 7 – струны с нанесёнными алмазными зёрнами (б)

При перечисленных методах обработки, нарушенные приповерхностные слои обладают пониженными механическими свойствами (таблица 1), в результате чего прочность сцепления ТЭМ понижена, что снижает механическую прочность.

Таблица 1

Зависимость толщины нарушенного слоя от метода обработки

Метод резания	Глубина нарушенного слоя, мкм
Струнная резка свободным абразивом	5 ÷ 15
Струнная резка с закреплёнными алмазными зёрнами	10 ÷ 25
Электроискровая резка	20 ÷ 30
Резка алмазным диском с внутренней режущей кромкой	30 ÷ 50
Резка алмазным диском с внешней режущей кромкой	50 ÷ 65

Сравнительный анализ различных типов оборудования для резки материалов на основе Bi_2Te_3 показал, что более приемлемым является разрезание струнами с применением свободного абразива, однако скорость разрезания в этом случае весьма низка (0.1 ÷ 0.3 мм/мин), что делает такую технологию неперспективной для массового изготовления термоэлектрических модулей охлаждения и генерации.

Значительно продуктивнее происходит разрезание струнами с закреплёнными алмазными

зёрнами. Скорость при этом возрастает до 1 мм/мин, причём применение ряда параллельных одновременно режущих струн увеличивает производительность такого способа резки.

Электроискровой рез из-за увеличенной глубины нарушенного слоя и невысокой производительности менее привлекательный.

Использование алмазных дисков с внутренней и внешней режущей кромкой – худший способ, который, в конечном итоге, приводит к снижению качества термоэлектрического материала.

Таким образом, в промышленном производстве при массовом изготовлении термоэлектрических модулей охлаждения и генераторов наиболее перспективным является метод разрезания струнами с закрепленными алмазными зёрнами с использованием станков Алтек – 13005М (рис. 7).



Рис. 7. Станок Алтек – 13005М.

Таблица 2

Основные технические данные и характеристики станка Алтек – 13005М

1	Максимальные размерырезаемых заготовок, мм	50×50×14
2	Число струн Ø 0.14 мм на рамке минимальное, шт.	1
3	Число струн Ø 0.14 мм на рамке максимальное, шт.	119
4	Минимальная ширина реза, мм	0.22
5	Количество рабочих столов, шт.	4
6	Ход рабочего стола, мм	не менее 25
7	Привод подачи рабочего стола	гидравлический
8	Рабочее давление в приводе подачи рабочего стола, МПа	0.24 – 0.35
9	Частота движения режущих кареток, двойных ходов в мин	до 1400
10	Ход кареток, мм	36 ± 0.5
11	Вес, кг	не более 150
12	Потребляемая электрическая мощность (без станции обратного водоснабжения), кВт	0.7
13	Напряжение питания частотой 50 Гц, В	380
14	Габариты, мм	1700×1200×500

Высокая скорость движения режущего инструмента обеспечивается применением гидростатических направляющих с жидкостным трением, высокая производительность – одновременным разрезанием заготовок на 4-х рабочих столах со скоростью $0.4 \div 0.8$ мм/мин. Это позволяет использовать его для массового производства термоэлектрических модулей.

210 000 ветвей размером $1.4 \times 1.4 \times 1.5$ мм могут быть получены из материалов Bi_2Te_3 в течение 8 часов.

Точность реза ветвей размером 1.4×1.4 мм составляет ± 0.02 мм. Распределение отклонения от заданного размера приведено на (рис. 8).

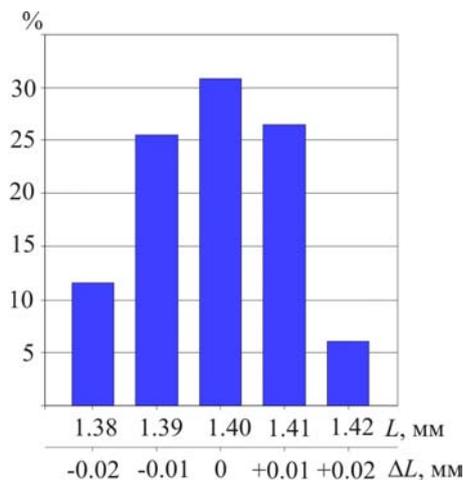


Рис. 8. Распределение отклонения размера ветвей.

Для работы в лабораторных условиях целесообразно использовать малогабаритный настольный станок Алтек – 13009, где производительность не играет большой роли и есть возможность использовать два метода разрезания свободным и связанным абразивом (рис. 9).



Рис. 8. Малогабаритный настольный станок Алтек – 13009.

Подшипниковое скольжение направляющих каретки обеспечивает точность и легкость их возвратно-поступательного движения.

Таблица 3

Основные технические данные и характеристики станка Алтек – 13009

1	Максимальные размеры заготовки для разрезания, мм	40×40×15
2	Число струн Ø 0.14 мм на рамке минимальное, шт.	1
3	Число струн Ø 0.14 мм на рамке максимальное, шт.	95
4	Ширина реза с алмазным покрытием, мм	0.22
5	Ширина реза со свободным абразивом, мм	0.15
6	Вес, кг	не более 30
7	Потребляемая электрическая мощность, Вт	60
8	Блок питания, В	14
9	Габариты, мм	340×690×630

Малогабаритный настольный станок удобен в эксплуатации, экономичный по потреблению электроэнергии, не требует больших материальных затрат на ремонт и обслуживание.

Заключение

Специально разработанные для разрезания термоэлектрических материалов станки струнной резки являются оптимальным средством обработки сплавов на основе теллурида висмута. Они обеспечивают высокую производительность, требуемую точность разрезания, минимальную глубину нарушенного слоя, низкую стоимость процесса разрезания.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Л.И. Анатычук. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
2. Камнев А.Б., Механическая обработка полупроводниковых материалов/ А.Б. Камнев, Б.А. Лапшинов. – Москва: 1990. – 61 с.
3. Нимчук В.В. Высокопроизводительный станок для резания термоэлектрических материалов / В.В. Нимчук, С.Ф. Запаров, А.В. Сатыго // Термоэлектричество. – 2008. – №1. – С. 57-63.
4. Станок для резки полупроводниковых материалов Алтек 13005 М. Рекламный проспект.

Поступила в редакцию 17.07.2014.