

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Bi-Te-Se-Sb

© Романюк И.С., 2004

В работе приведено краткое описание технологических особенностей получения однородных кристаллов твердых растворов Bi-Te-Se-Sb, электрокоммутационных слоёв меди керамических теплопереходов, а также антидиффузионных слоёв никеля ветвей ТЭМ, испытания которых показали их безотказную наработку в течение 12000 часов в непрерывном и 3000 часов – в циклическом режимах.

Несмотря на то, что эффект охлаждения контакта двух разнородных материалов, через который протекает электрический ток, открыт Анри Пельтье в 1834 году, его практическое использование началось только после того, как Юрием Шмелевым в начале 50-х годов минувшего столетия были исследованы системы *Bi-Te-Se-Sb*, на основе которых впоследствии были созданы высокоэффективные термоэлектрические материалы *p*- и *n*-типа проводимости [1]. Удачное конструктивное воплощение этого эффекта в виде термоэлектрического модуля Пельтье (ТЭМ) привело к появлению ряда оригинальных приборов и устройств, которые сегодня применяются в различных областях науки и техники [2]. К основным характеристикам этих ТЭМ наряду с термоэлектрической добротностью, холодильным коэффициентом, а также другими, относятся и надежность. На момент начала настоящих исследований гарантированное время надёжной работы ТЭМ составляло 5–7 тысяч часов наработки, что явно недостаточно для решения современных практических задач.

Как известно, надёжность изделий определяется надёжностью элементов, из которых они состоят. Для ТЭМ к ним относятся: ветви *p*- и *n*-типов проводимости с антидиффузионными слоями, а также электротеплокоммутирующие пластины с соответствующим топологическим рисунком. Как показывают результаты предварительного анализа статистической обработки, причинами отказов ТЭМ на этапах как технологии, так и дальнейшей эксплуатации, являются недостаточная механическая прочность ветвей, а также низкая адгезия электрокоммутирующих дорожек керамических теплопереходов и антидиффузионных слоёв никеля. Поэтому цель работы – анализ факторов, определяющих механическую прочность ТЭМ на основе кристаллов твердых растворов *Bi-Te-Se-Sb* с последующей разработкой технологии модулей повышенной надежности.

Поскольку надежность вместе с другими параметрами определяется и механической прочностью, то с помощью уравнения совместимости для статически неопределенных систем в рамках действия закона Гука были оценены прочностные характеристики ветвей ТЭМ. Исследовались зависимости эксплуатационных и технологических термоупругих напряжений ветвей для одно- и двузатянутых ТЭМ от величины разброса длин ветвей, толщин припоя и неоднородности применяемых термоэлектрических материалов по модулю упругости E_T . [3,4] Результаты этих исследований показали, что разброс значений модуля упругости E применяемых кристаллов и длин ветвей $\Delta l/l$ ведет к появлению в ветвях ТЭМ с двусторонним зажатием термоупругих напряжений, величина которых в некоторых случаях превышает критические значения. Для ТЭМ с односторонним зажатием величина этих напряжений значительно меньше [5].

Предварительные экспериментальные исследования прочностных характеристик серийных кристаллов [6,7], выполненные методом металлографического анализа, показали, что вместе с малой

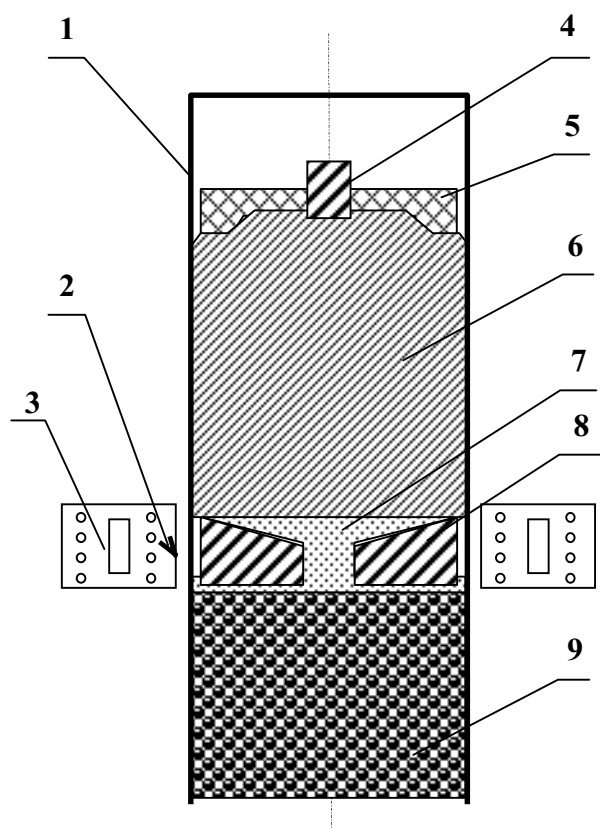


Рис. 1. Схематическое изображение ампулы с навеской:
 1 – контейнер; 2 – термopapa;
 3 – зонный нагреватель;
 4 – монокристаллическая затравка;
 5 – кристаллодержатель;
 6 – закристаллизованный слиток твердого раствора Bi-Te-Sb-Se;
 7 – расплав; 8 – тепловыравнивающая шайба;
 9 – поликристаллическая часть слитка

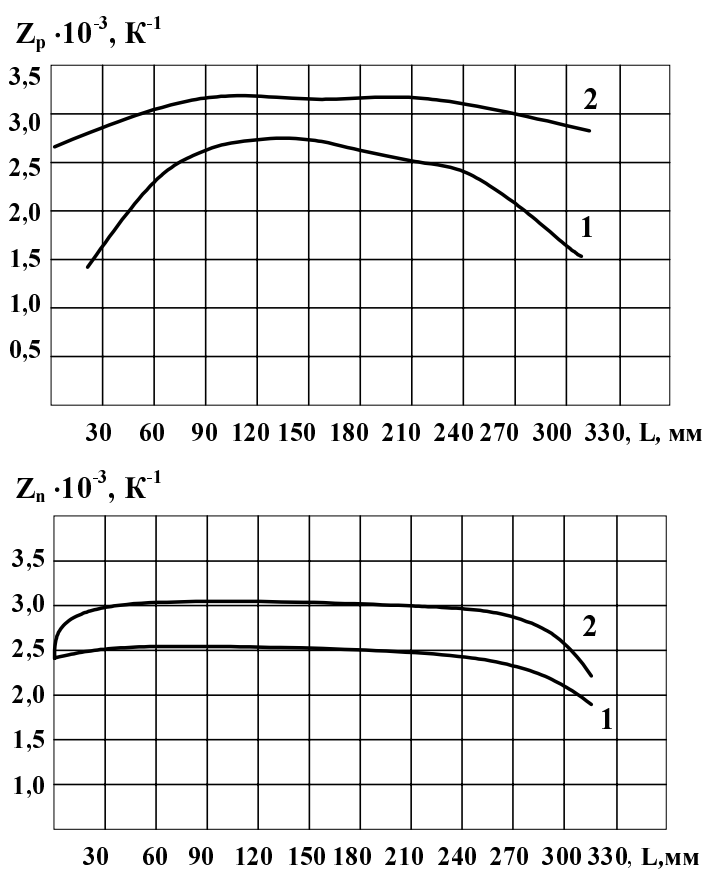


Рис. 2. Распределение $Z_{p,n}$ слитков вдоль длины при градиентах температур: 1 – 80 K/см; 2 – 200 K/см:
 а) 75 % Sb_2Te_3 + 25 % Bi_2Te_3 + ат.% Te_2 ;
 б) 90% Bi_2Te_3 + 10% Bi_2Se_3 + 0,08 ат. % $CdCl_2$

механической прочностью, они за счет блочной структуры слитков характеризуются большим разбросом значений модуля Юнга. Повышение механической прочности ветвей ТЭМ, а вместе с тем и их надежности, может быть достигнуто лишь в случае увеличения как механической прочности применяемых термоэлектрических слитков, так и их однородности.

Наряду с этим осуществлены оценки резонансных частот колебаний ТЭМ [8]. Как известно, в некоторых случаях наблюдается совпадение частот собственных колебаний ТЭМ с вынужденными, внешними колебаниями, приводящими к их разрушению. Для предотвращения этого явления с помощью уравнения Даламбера рассчитывались собственные частоты колебаний f_p каскадов ТЭМ с учетом характеристик слоёв припоя и керамических пластин [7]. Анализ этих результатов показал, что диапазон частот собственных колебаний существующих ТЭМ находится в интервале 10^2 - 10^4 Гц, а их значениями в некоторых пределах можно управлять, изменяя толщины демпфирующих слоёв припоя. Это дает возможность, в случае необходимости, изменять собственные частоты колебаний ТЭМ в требуемую сторону, избегая совпадения с частотами внешних, вынужденных колебаний.

Исследования позволили сформулировать следующее:

1. Термоэлектрические материалы на основе кристаллов твердых растворов *Bi-Te-Se-Sb*, вместе с требованием высокой добротности $Z_{p,n}$, должны характеризоваться повышенными значениями механической прочности Σ_p и однородности модуля Юнга E по длине слитков.

2. При отборе ветвей в пары, наряду с требованием $Z_p=Z_n$, они должны характеризоваться минимальным разбросом по длине $\Delta l_p / l_p = \Delta l_n / l_n$.

3. Значения частот собственных колебаний ТЭМ в некоторых пределах управляются изменением толщины демпфирующих слоёв припоя.

Особенности физико-химических процессов кристаллизации материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb* исследовались многими авторами [1]. Практически все они особое внимание уделяли вопросам влияния концентрационного переохлаждения и анизотропии теплопроводности, приводящих к возникновению значительной неоднородности и снижению термоэлектрических параметров этих материалов. Уменьшение влияния этих эффектов достигалось применением больших градиентов температуры в области перехода от жидкого состояния к твердому. Известная серийная технология [6,7] позволяет получать слитки твердых растворов *Bi-Te-Se-Sb* в виде блочных кристаллов диаметром (15-18)мм с $Z_{p,n}=(2,8-3,0) \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, механической прочностью $\Sigma_p=0,4-0,5 \text{ кгс/мм}^2$ при разбросе значений модуля Юнга вдоль длины более 60%.

Для решения вопроса повышения однородности и механической прочности материалов был выполнен комплекс исследований, позволивший создать как технологическую аппаратуру – установки синтеза и вертикальной зонной плавки, так и технологию получения кристаллов твердых растворов *Bi-Te-Se-Sb*, состоящей из этапов синтеза слитков соответствующих составов *p*- и *n*-типов проводимости и их последующей перекристаллизации методом вертикальной зонной плавки. Высокая однородность этих кристаллов достигалась использованием модифицированной идеи О'Конноли [9].

В отличие от [9] нами предложена и реализована конструкция “тонущего” формообразователя, медленно погружающегося в расплав (рис.1) [10]. Это устройство в виде шайбы изготавливается из материала, плотность и теплопроводность которого превышают аналогичные параметры кристаллизуемого вещества. Верхняя торцевая грань этой шайбы имеет форму вогнутой сферы и является эффективным регулятором распределения температурного поля, обеспечивающего стабилизацию центра кристаллизации слитка на протяжении всего времени выращивания. Кроме того, она дает возможность использования монокристаллической затравки, что позволяет получать слитки необходимой кристаллографической ориентации.

Поскольку плотность и теплопроводность материала формообразователя значительно превышает плотность и теплопроводность кристаллизуемого вещества, то шайба погружается в расплав, находясь ниже зонного нагревателя, опираясь на нерасплавленную часть поликристаллического материала на протяжении всего времени своего перемещения. Это способствует кристаллизации однородного монообъема с малыми термическими напряжениями при повышенных однородности и механической прочности слитков.

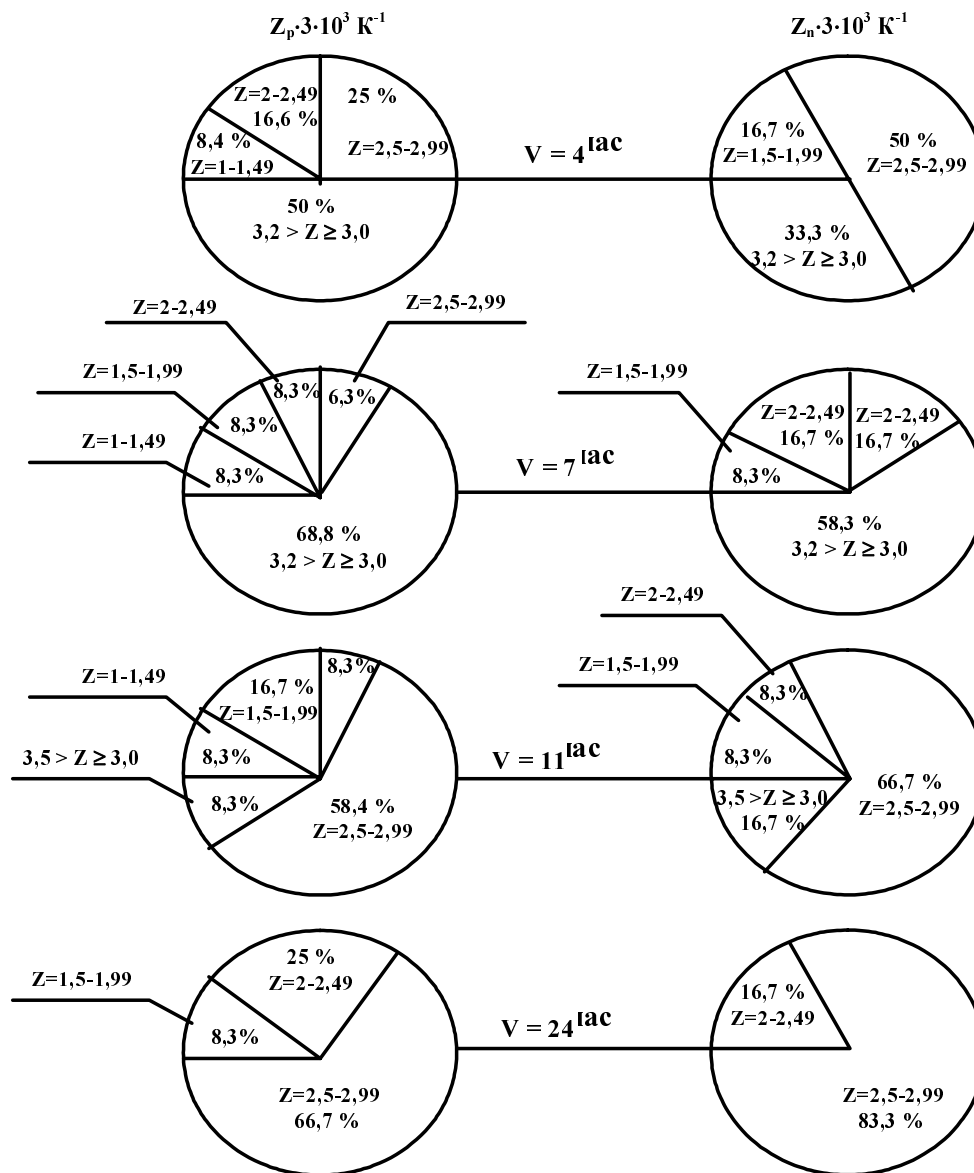
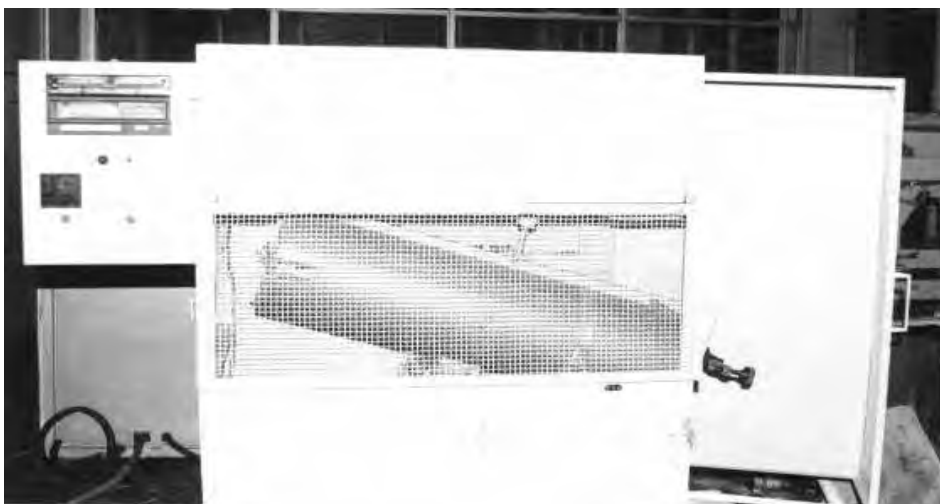


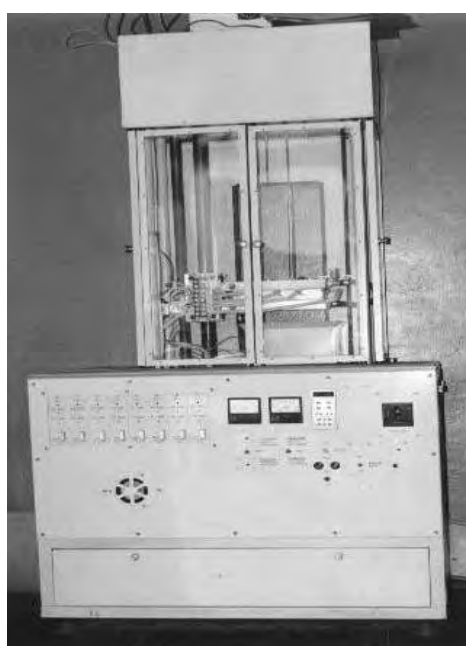
Рис. 3. Процентное распределение $Z_{p,n}$ кристаллов от скорости перемещения фронта кристаллизации

На рис.2 и 3 представлены результаты распределения однородности термоэлектрической добротности $Z_{p,n}$ кристаллов твердых растворов $Bi-Te-Se-Sb$ соответствующих составов от скорости перемещения зонного нагревателя и радиусов изгиба формообразующих шайб. Наибольшей однородностью и процентом выхода годных характеризуются материалы, полученные при скорости кристаллизации 7 мм/ч и радиусах изгиба шайб $r_1=40$ мм для слитков p -типа проводимости и $r_2=60$ мм для слитков n -типа проводимости [11,12].

Полученные результаты привели к возможности создания оборудования (рис.4) и технологии кристаллов твердых растворов $Bi-Te-Se-Sb$ [11]. Материалы, получаемые по этой технологии, характеризуются выходом годных 75% в случае слитков p -типа проводимости и 69% – n -типа проводимости при внешних диаметрах 28-38 мм и длинах 300-320 мм. Кристаллографические оси [100] и [010] этих слитков ориентированы вдоль оси и радиуса, соответственно. Их термоэлектрическая добротность составляет величину $Z_{p,n} = (3,0-3,2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при механической прочности на разрыв $\Sigma_p=2,4-2,5 \text{ ГГс/мм}^2$. Внешний вид кристалла, полученного по предложенной технологии, приведен на рис.5.



a

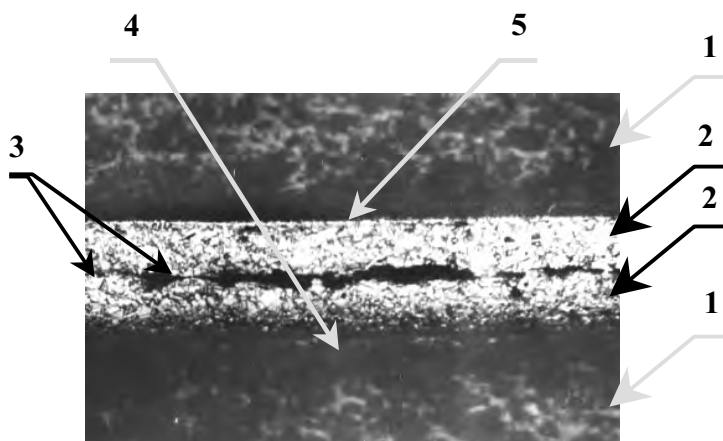


б

Рис. 4. Внешний вид установок :
а) синтеза; б) выращивания



Рис. 5. Слиток кристалла твердого раствора Bi-Te-Sb-Se, полученного с помощью “тонущего” формообразователя



- 1- керамические подложки;
- 2- слои меди;
- 3- граница раздела между слоями меди;
- 4- граница слоев меди и керамики (образец отожжён);
- 5- граница слоев меди и керамики (образец)

Рис. 6. Вид структуры медных слоев, нанесенных на керамические пластины методом детонационного напыления (x120)

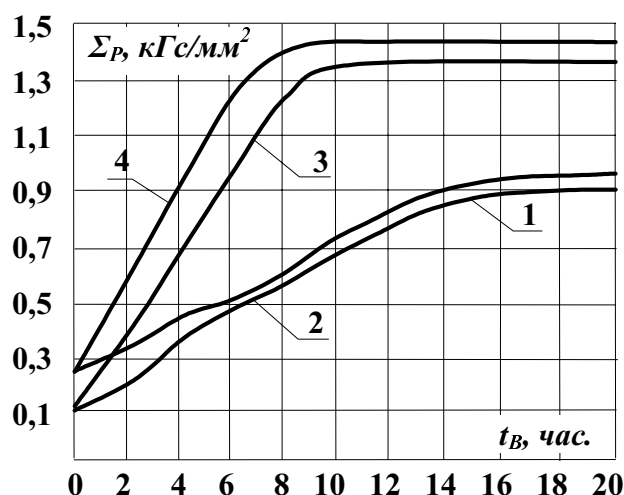


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности слоев никеля от времени отжига

Для неразрушающего контроля однородности этих кристаллов создан прибор, основанный на явлении газоразрядной визуализации [12]. Он позволяет осуществлять прямое наблюдение электроразрядного процесса между объектами (в нашем случае слитком и близко расположенным электродом) в случае высокочастотного электрического поля и по плотности этого излучения делать выводы о их однородности.

Наряду с решением вопроса создания технологии термоэлектрических материалов был выполнен комплекс технологических и физико-химических исследований, результаты которых дали возможность создать технологию медных электрокоммутирующих слоёв керамических пластин [13]. На момент начала этих исследований технология этих слоёв состояла из этапов нанесения металлизационных паст, их отжига и припаивания медных электрокоммутирующих дорожек, которые характеризуются малыми значениями адгезии — $\Sigma = 0,2-0,3$ кгс/мм².

Для повышения прочности было предложено создание коммутационных медных слоёв методом детонационного напыления. Технология, включающая в себя этот метод, состоит из предварительной металлизации пластин керамики ВК94-1, которую выполняют с помощью молибдено-марганцевой пасты. Перед нанесением этой пасты керамические подложки обрабатывают в соответствующих травителях и активаторах. После этого на соответствующей установке методом трафаретной печати наносится необходимый рисунок металлизации и производят его вжигание. При температуре 1275 К марганец, окисленный до MnO , взаимодействует с Al_2O_3 с образованием марганцевой шпинели $MnOAl_2O_3$, играющей существенную роль в закреплении металлизации на керамике. Стеклофаза при температуре 1275 К становится жидкотекучей и под действием капиллярных сил всасывается в поры металлизационного слоя на глубину до 100 мкм. Это обеспечивает достаточно высокое значение связи между вожженным металлизационным слоем и керамикой. Вжигание проводится в колпаке печи ОКБ80-86 в азотно-водородной смеси при температуре 1630-1650 К на протяжении 40 минут.

Далее с помощью метода детонационного напыления на поверхность керамической пластины с топологическим рисунком наносится медь. Схематически этот процесс можно изобразить так: замкнутый с одной стороны ствол детонационной установки заполняется взрывной смесью (в нашем случае пропан-бутан-кислородной) и необходимым количеством медного порошка. Вокруг дульного среза ствола располагают керамические подложки с трафаретом, имеющие соответствующий рисунок, и с помощью электрического разряда инициируют взрыв газовой смеси. Высокотемпературный газовый поток продуктов детонации с большой скоростью вытекает из ствола. Вследствие ударного взаимодействия разогретые частицы взаимодействуют с подложкой, вследствие чего происходит закрепление основной части порошка, то есть формируется слой детонационного покрытия.

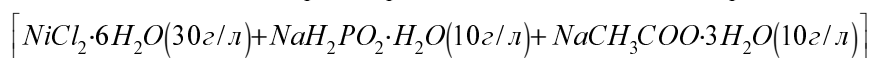
Как известно, медь с молибденом образует псевдосплав, прекрасно смачивающий и заполняющий поры керамики под действием капиллярных сил. При отжиге в среде водорода температура полного смачивания молибдена медью составляет 1620 К, поэтому эта температура и является оптимальной для создания беспористой структуры псевдосплава. Вследствие того, что температура плавления меди составляет 1353 К, что значительно ниже температуры полного смачивания молибдена медью, отжиг осуществляется в две стадии: нагревание до температуры 1408 ± 25 К на протяжении 2-2,5 ч.; выдержка при этой температуре на протяжении 45 мин.; нагревание до температуры 1608 ± 25 К на протяжении 30-40 мин.; выдержка при этой температуре на протяжении 30 мин.; отключение печи при дальнейшем охлаждении до 373 К. Такой процесс обеспечивает полное всасывание меди при первой температурной остановке и его гомогенизацию – при второй.

Исследования показали (рис.6), что полученный медный слой плотный, его микроструктура зернистая. Анализ результатов, приведенных в таблице показывает, что максимальная величина адгезии электрокоммутационных слоёв меди наблюдается в случае отжига медно-молибденовых слоёв. В этом же случае наблюдается и минимальное электрическое сопротивление, величина которого на 5-10% больше сопротивления объемных медных проводников такого же разреза. Таким образом, детонационная технология позволила создать электрокоммутационные слои меди на керамике, которые удовлетворительно паяются, характеризуются высокой адгезией и малым переходным сопротивлением.

При разработке разнообразных конструкций ТЭМ для их термостойкости и временной стабильности параметров применяются различные антидиффузионные покрытия торцов ветвей, в т.ч. и слоями из элементов переходной группы таблицы Менделеева – никеля, хрома, железа и др. В настоящее время используются методы электрохимического и химического осаждения этих слоёв, а также нанесение их путем ионно-плазменного распыления в вакууме. Анализ их параметров показывает, что эти слои уступают паянным по механическим свойствам и воспроизводимости.

В результате комплексных исследований была усовершенствована технология химического нанесения низкоомных слоёв никеля на торцевые грани ветвей ТЭМ, характеризующихся удовлетворительными адгезионными свойствами. Она состоит из следующих этапов [4]: электрохимического травления термоэлектрических пластин; химического осаждения слоёв никеля; термического отжига пластин со слоями никеля; облуживание пластин пропоем и разрезание пластин на ветви р- и n-типы проводимости.

В процессе электрохимического травления (в растворе $\text{KOH} + \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$ при плотности тока $I = (1,5-2) \cdot 10^{-3} \text{ А/мм}^2$) снимается поверхностный слой кристалла, нарушенный при разрезании слитка, а также создается развитая поверхность торцевой грани пластины. После этого осуществляется химическое осаждение слоёв никеля в растворе, состоящем из таких ингредиентов:



при $T = 368 \text{ К}$; $pH = 6-7$; скорость осаждения – 0-12 мкм/ч.

Пластины предварительно обрабатываются хлористым палладием, а последующее осаждение слоёв никеля проводится при непрерывном перемешивании раствора и присутствии металлического алюминия.

Наличие слоя никеля на поверхности пластины *Bi-Te-Se-Sb* приводит к появлению химической связи между ним и атомами висмута, теллура, селена и сурьмы. Эта связь осуществляется двумя путями: при помощи переключения валентных связей кристаллов и образования предельной области этого химического соединения, обеспечивающего довольно высокий уровень адгезии [15].

Проведение следующей операции – отжига – ведет к значительному снижению как степени дефектности объема пластины в приповерхностной области, так и величины внутренних упругих напряжений, а также повышает количество валентных связей между никелем и матрицей кристалла. Особенность этого процесса в нашем случае – воздействие постоянного магнитного и импульсного электрического полей на протяжении всего времени отжига, осуществляемого при помощи устройства, называемым гиротропным цилиндрическим конденсатором [16].

Размещение отжигаемых образцов вместе с печью в область воздействий этих полей при подаче на конденсатор униполярных прямоугольных импульсов приводит к уменьшению времени отжига и возрастанию адгезии слоёв никеля. Зависимость адгезионной прочности от времени отжига приведена на графике рис.7, из которого следует, что значение прочности на разрыв после полевого воздействия возрастает – $\Sigma = 1,35\text{--}1,45 \text{ кГс/мм}^2$ – при величине переходного сопротивления $r_{кр} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/см}^2$, $r_{кл} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/см}^2$. Это обеспечило возможность усовершенствования технологии изготовления ТЭМ.

Параметры разработанных ТЭМ

Количество каскадов	$P_{\max}$, Вт	$I_{\max}$, А	$U_{\max}$, В	Геометрические размеры верх/нижн, мм	ΔT , К
1	68,8	8,5	15,4	40×40	70 – 72
1	33,4	3,9	15,4	30×30	70 – 72
1	18,7	3,9	8,6	30×30	55 – 67
1	2,5	2,2	2,0	12×12	70 – 72
1	1,0	0,3	4,0	10×10	70 – 72
2	2,9	2,0	7,0	9,5×8,0/15×14	86
2	1,3	2,1	2,6	5,1×5,1/9,5×8,0	88
3	1,5	1,8	6,4	7,9×7,9/15×14	96
3	0,8	1,0	6,5	7,3×4,7/16×12	96
4	0,7	1,2	7,5	8,0×4,0/16×13	105
4	0,5	1,0	7,0	8,0×4,0/16×13	102
5	0,8	2,2	11,0	6,0×6,0/25×27	120

Дальнейшая сборка ТЭМ практически сводится к процессу одновременной коммутации *p*- и *n*-ветвей с электротеплопереходами в соответствии с заданной схемой соединения. Наиболее технологичным для такого типа устройств является метод пайки в паяльных ваннах с применением оснастки, обеспечивающий жесткую фиксацию ветвей относительно керамических электротеплопереходов и их взаимного сжатия во время расплавления припоя для обеспечения надежной пайки [17]. Предварительно ветви раскладываются в специальную оснастку, состоящую из оправки и системы распределительных фиксирующих пластин с небольшим зазором. Пайка осуществляется в чистом глицерине при температуре плавления коммутирующего пропоя. Конструкция оснастки выполнена таким образом, что ветви с пластинами расположены в поле действия гиротропного цилиндрического конденсатора, аналогичного предыдущему.

Параметры изготовленных ТЭМ, приведенные в таблице, показывают, что они не уступают аналогичным зарубежным образцам. Последующие испытания свойств этих ТЭМ проводились в соответствии с требованиями, обусловленными их возможными условиями эксплуатации по стандартным методикам испытаний – испытание надежности во времени, а также механических и климатических свойств. Надежность ТЭМ во времени проверялась как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Испытания показали, что они выдержали всю программу при времени наработки 12000 часов в непрерывном и 3000 часов – в циклическом режимах [18].

Созданные ТЭМ успешно применялись в ряде устройств бытового, медицинского и другого назначения. Это: переносные и стационарные автомобильные холодильники [19]; термостат для хранения плодоовощной продукции; прибор для термопунктуры биологически активных точек человека [20]; термостатированный фотоприёмник лазерного излучения повышенной плотности [21]; ряд термостатированных фотоприёмников ИК-излучения [22,23].

1. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . – М., 1972.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К.: Наукова думка, 1979. – 767 с.
3. Шайко-Шайковский А.Г., Ащеулов А.А. Конструктивно-технологические пути повышения надежности термоэлектрических батарей // ТКЭА, 2000. – №5–6. – С.8–12.
4. Ащеулов А.А., Добровольский Ю.Г., Романюк И.С. Особенности технологии термоэлектрических модулей Пельтье повышенной надежности // ТКЭА. – 2004. – №4. – С.28–31.
5. Ащеулов А.А., Добровольский Ю.Г., Романюк И.С. Механическая прочность ветвей термоэлектрических модулей Пельтье при их односторонней фиксации // Тез.докл.XVIII междунар. н.-т. конф. по фотоэл.и ПНВ. – М., 2004. – С.116–117.
6. Горобец Н.В., Рюхтин В.В., Простеби Л.И., Теслюков А.А. Получение термоэлектрических материалов с повышенной добротностью в промышленных условиях // Электронная техника. Материалы. – 1978. – №12. – С.126–128.
7. Горобец Н., Простеби Л.И., Фаленчук А.Д. Экстремальное легирование материалов на основе Bi_2Te_3 для термоэлектрических холодильников // Электронная техника. Материалы. – 1980. – №9. – С.72–76.
8. Ащеулов А.А., Шайко-Шайковский А.Г., Романюк И.С. Расчет механических напряжений и собственных колебаний в двухкаскадной термоэлектрической батарее, используемой в термопунктуре // Термоэлектричество. – 2000. – №4. – С.58–62.
9. Пат.№3933572 США, КВ H01C. Method for growing crystall. O'Konol (USA). Заявл.3.10.1974. Опубл. 23.06.1975.
10. Пат.№36796А Украины. МПК 7C30B 13/30. Спосіб отримання монокристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту методом вертикальної зонної перекристалізації. Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. (Україна); ВП "Гермес-Кварц". – №200020710; Заявл.09.02.2000; Надр.16.04.2001; Бюл.№3;4.
11. Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк С.С. Простебі Л.І., Пристрій для отримання монокристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту // НВ ЧНУ. Фізика. Електроніка. – 1999. – Вип.66. – С.39–40.
12. Ащеулов А.А., Романюк И.С., Добровольский Ю.Г., Особенности получения кристаллов твердых растворов Bi-Te-Se-Sb методом вертикальной зонной перекристаллизации с «тонуцим» формообразователем // Термоэлектричество. – 2002. – №2. – С.60–67.
13. Ashcheulov A.A., Dobrovolsky Yu.G., Romanyuk I.S. About an opportunity of quality surveillance of thermoelectric materials with the help of gas-charge visualization // J.of Thermoelectricity. – 2000. – N1. – P.54–55.
14. Ащеулов А.А., Дунаенко А.Х., Пундик В.И., Романюк И.С., Фотий В.Д. Получение электрокоммутационных слоёв на керамических теплопереходах методом детонационного напыления // ТКЭА. – 2004. – №1. – С.51–52.
15. Алиева Т.Д., Фейзиев Я.С., Мусаев Ф.Г. и др. Сопротивление и адгезионная прочность переходных контактов на границах разделов монокристаллов твердых растворов систем $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ со слоями никеля и эвтектикой системы $\text{Bi} - \text{Sb}$ // Неорганические материалы. – 1990. – Т.26. – Вып.4. – С.716–718.
16. Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. Дослідження впливу певних комбінацій електричного та магнітного полів на властивості напівпровідникових приладів // НВ ЧНУ. Фізика. – 1998. – Вип.79. – С.173–175.
17. Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С., Постебі Л.І., Вітрук С.А. Особливості виготовлення удосконалених термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту // НВ ЧНУ. Фізика. Електроніка. – 2000. – Вип.79. – С.92–94.
18. Ащеулов А.А., Романюк И.С., Добровольский Ю.Г., Клепиковский А.В., Фотий В.Д., Шайко-Шайковский А.Г. Охладители Пельтье повышенной надежности для фотоприёмников // Прикладная физика. – 2003. – Вып.2. – С.173–175.

19. Ashcheulov A.A., Romanyuk I.S., Dobrovolsky Yu.G., Godovanyuk V.N. Investigation of the ways to develop multi-chamber household thermoelectric cooler // *J.of Thermoelectricity*. – 1997. – N4. – P.98–99.

20. Пат.№45615А України. МКВ H01C 35/02. Пристрій для термопунктури / Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С., Борец В.Я., Шайко-Шайковський О.Г., (Україна); Заявка №2001042798 від 24.2001.

21. Пат.№39347А України. МПК H01C L13/06. Фотоелектричний приймач лазерного випромінювання / Ащеулов А.А., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. (Україна); ЧНУ ім.Ю.Федьковича. – №2000052887; Заявл.22.05.2000; Надр.11.06.2001. Бюл.№5; 4 с.

22. Ащеулов А.А., Годованюк В.Н., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. Оптимізація надійності кремнієвих р-і-п-фотодіодов по темновому току // *ТКЭА*. – 1999. – №1-2. – С.18-21.

23. Ащеулов А.А., Годованюк В.Н., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. Повышение надежности кремнієвих фотодіодов путем оптимізації их параметров. Тезиси конференції «Системи и средства передачи и обработки информации». – ССПОИ-98. – Одесса, 1998. – С.39.

Z. Złonkiewicz

Lublin University of Technology,

Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies, Lublin, Poland

ELECTRICAL CONTACT MODELS BASED ON MULTIPOINT CONTACT

© Złonkiewicz Z., 2004

The paper presents simulation results of contacts applied in low-current circuits. Various parameters of low-current contact space based on the model consisting of multipoint contingence were analysed. For selected model, the values of current density, power and voltage distributions at operating contact at assumed value of applied voltage were obtained. FLUX 2D software package was used to analyse the contact. This simulation aims at defining how much the number of contact points influences the distribution of current, power and voltage in contact model. The contact made of beryllium bronze with outer layer of gold was taken for the analysis. This enabled to define (electric) phenomena, which occur in operating contact, which cannot be obtained by the application on physical models.

1. Introduction

The paper presents the analysis of various parameters of low-current contact space based on the model, which consists of multipoint contact. For selected model, the values of current density, power and voltage distributions in operating contact at assumed value of applied voltage were obtained. Such distributions for the single and multipoint contacts were then compared at the assumption that the contact surface is the same. This simulation enables to define how much the number of contact points influence current and voltage distributions in the contact. The contact made of beryllium bronze with outer layer of gold was chosen for the analysis. This enabled to define (electric) phenomena, which occur in operating contact, which cannot be obtained by the application on physical models. FLUX2D software package was used for the analysis.

This software enables to define the geometry of designed contact, model configurations and introduce boundary conditions. Modelled space has been divided using finite element mesh. Material data base is used for contact analysis which allows for quick estimation of changes occurring in the contact. Obtained results are presented as tables or diagrams of current intensity distributions, power density and voltages in the connecting area.