

УДК 532.523.32:621.382(088.8)

А.А. Ащеулов, Ю.Г. Добровольський, А.Г. Шайко-Шайковський, В.Д. Фотій,
А.В. Клепиковський, І.С. Романюк
Термоелектричні модулі Пельтьє підвищеної надійності

*Відкрите акціонерне товариство "Кварц",
вул. Головна, 246, м. Чернівці, 58032
E-mail: kvarz@chv.ukrpack.net*

Розроблено термоелектричні модулі Пельтьє підвищеної надійності. Покращення надійнісних характеристик досягнуто за рахунок декількох факторів. Використанням твердого розчину Ві-Те-Се-Sb діаметром 28-35 мм та довжиною до 300 мм, який характеризується підвищеною механічною міцністю. Технологією антидифузійних шарів, адгезійна міцність яких складає величину $\sigma_p \geq 80$ МПа, $\sigma_n \geq 100$ МПа при $T = 300$ К. Металізацією керамічних пластин за допомогою псевдосплаву молибден-мідь. Значення параметрів розроблених термоелектричних модулів не змінюються після впливу граничних температур в діапазоні від 213 К до 333 К, електричного навантаження в циклічному (1500 годин) та в неперервному (2000 годин) режимах, дії механічних та кліматичних факторів.

Ключові слова: термоелектрика, модуль, твердий розчин, адгезія, надійність, кристалізація, фотрмоутворювач..

Стаття постуила до редакції 15.06.2002; прийнята до друку 23.08.2002

Термоелектричні ефекти мають широке використання у сучасній техніці. Одним з них є ефект Пельтьє. На його основі створено низку уніфікованих термоелектричних модулів (ТЕМ) для охолодження та термостабілізації різноманітних систем та пристроїв радіоелектронної апаратури [1-3].

Виробництво новітніх зразків електронної техніки пов'язано з підвищенням вимог до її надійності. Вони стосуються усього комплексу приладів, в тому числі і ТЕМ Пельтьє. За звичай, такі термоохолоджувачі виготовляються із кристалів на основі твердих розчинів телуриду вісмуту, які отримують вертикальним методом Бріджмена [4]. Ці ТЕМ дозволяють отримувати перепади температур до 120 К в залежності від кількості каскадів (від одного до п'яти) та спожитої потужності (від 0,25 Вт до 150 Вт).

Теоретичні дослідження показали [5-7], що технологічні та експлуатаційні механічні напруження, які виникають в конструкціях ТЕМ при існуючих технологічних розкидах параметрів кристалів та геометричних розмірах р- та n- гілок у випадку максимального перепаду температур, досягають значень 60-80 % від максимально можливого. Це зумовлює невеликий запас (20-40 %) механічної міцності і збільшує ймовірність відмов таких приладів.

Існуюча серійна технологія кристалів твердих розчинів на основі Ві-Те-Се-Sb дозволяє отримувати лише блочні матеріали малого діаметру (7-12 мм) [7],

які мають порівняно низьку механічну міцність (гранична міцність на вигин $\sigma_{\text{и}} = 35 - 42$ МПа, гранична міцність на стискання $\sigma_{\text{с}} = 26 - 29$ МПа при $T = 300$ К). Це в свою чергу, призводить до низького коефіцієнту використання матеріалу та негативно впливає на надійність роботи згаданих ТЕМ.

Для підвищення технологічності, а саме коефіцієнту використання матеріалу та проценту виходу якісних пристроїв, розроблено технологію вирощування кристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту [8 - 10]. Дослідні зразки кристалів після синтезу вихідних компонентів відповідного складу отримувались видозміненим вертикальним методом Бріджмена. При цьому використовувалися спеціальні формуютьовувачі фронту кристалізації, запропоновані в [11], доопрацьовані для конкретних умов кристалізації. Завдяки їм під час вирощування забезпечується стабільність термодинамічного стану розплаву та необхідне геометричне розташування фронту кристалізації. Контроль температури та відповідного розташування формуютьовувача здійснюється електронною системою спостереження, яка порівнює реальні параметри з еталонними та дає відповідні команди на корекцію режимів вирощування.

Такий підхід дозволив отримувати однорідні кристали твердих розчинів на основі телуриду вісмуту довжиною до 300 мм та діаметром 28 - 35 мм, які відповідають необхідному розподілу блочної структури [9], що веде до зростання

механічної міцності та підвищує коефіцієнт використання матеріалу. Термоелектрична добротність (Z) зразків, отриманих за цією технологією, складає $3,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ для матеріалу р-типу провідності та $3,0 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ для матеріалу n-типу, а гранична міцність на вигин $\sigma_{\text{и}} = 83 - 99 \text{ МПа}$, гранична

373 К. На рис. 1 представлено вигляд мідного шару (2), нанесеного на керамічні пластини з молібденовим покриттям (1). Для зручності підготовки шліфу дві керамічні пластини складено одна до одної мідними шарами, при чому одна з них до відпалу (5), друга після нього (4). Виміри адгезійної міцності на розрив, які проводились на установці МР-50

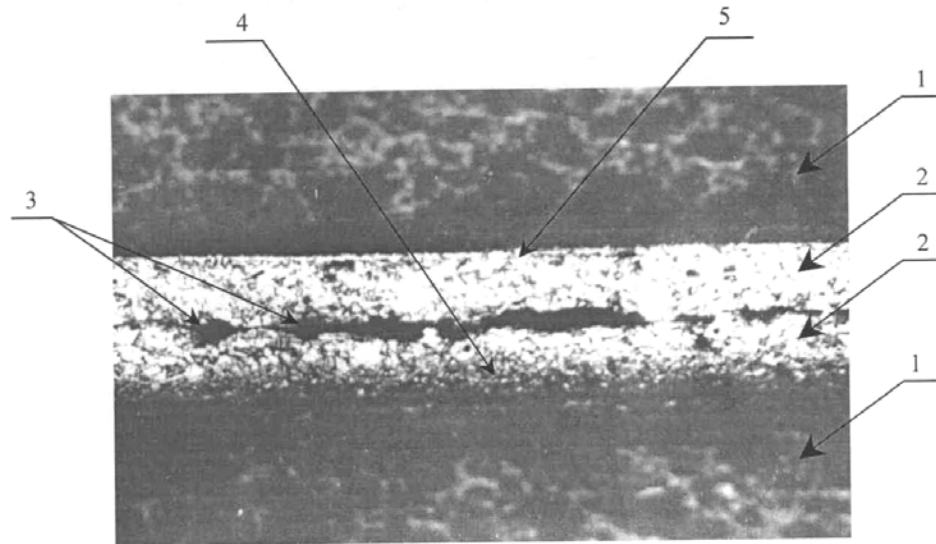


Рис. 1. Вигляд мідного шару, нанесеного на керамічні пластини з молібденовим покриттям. 1 – шар кераміки; 2 – шар міді; 3 – мажа розділу між шарами міді; 4 – границя шарів міді та кераміки (зразок відпалений); 5 - границя шарів міді та кераміки (зразок не відпалений).

міцність на стискання $\sigma_{\text{с}} = 56 - 62 \text{ МПа}$ при 300 К.

Підвищена якість зробианих кристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту привела до створення ТЕМ більш високого рівня надійності, ніж існуючі серійні зразки. Надійність згаданих термоелектричних модулів досягала також і технологічними особливостями виготовлення р- та n-гілок модулів і теплоелектрокомутуючих переходів.

Металізація керамічних пластин здійснюється за допомогою псевдосплаву молібден-мідь [12 – 14]. На першому етапі на підготовлену поверхню пластини наноситься рівномірний шар молібденомарганцевої пасти товщиною 30 – 60 мкм, який сушиться у відповідній камері. Впалення цього шару в кераміку проводять у ковпаковій печі ОКВ-8083 в азотно-водневій суміші при температурі 1650 К на протязі 40 хвилин. На другому етапі ця пластина розміщується в установці “Перун”, в якій методом детонаційного наплення наноситься шар міді необхідної товщини (0,06 – 0,3 мм). Внаслідок того, що температура плавлення міді суттєво нижча за температуру повного змочування молібдену другий етап впалювання проводиться в декілька стадій. При такому веденні процесу забезпечується повне всмоктування міді та її перерозподіл в об’ємі молібдену та кераміки, завдяки чому створюється однорідна структура [14]. Для недопущення розривів та короблення, які зумовлюються температурними напруженнями, заготовки повільно охолоджуються до температури

показали, що міцність зчеплення шару міді з керамікою знаходиться в межах 150 – 170 МПа.

Для отримання заданої комутаційної топології теплоелектропереходів використовувався метод фотолітографії із наступним травленням пластини травником складу: 60 мас. % азотної, 30 мас. % плавикової та 10 мас. % оцтової кислот. Після цього пластини облужуються. У зв’язку з високою міцністю кераміки розділення пластин на теплопереходи певного розміру та у відповідності з заданим малюнком комутації проводилось механічним способом. Для цих цілей розроблена спеціальна оснастка, яка дозволяє здійснювати різання кераміки алмазними дисками з точністю 0,3 мм.

У випадку ТЕМ, розрахованих на роботу в умовах протікання через них великих струмів (понад 3 А), до комутаційних ділянок, які облужуються сплавом олово-вісмут-сурма, приєднуються мідні пластини відповідної товщини. Така конструкція теплопереходів забезпечує мінімальні теплові втрати ТЕМ.

В результаті комплексних досліджень створена технологія антидифузійних, термостійких низькоомних шарів, які характеризуються високими адгезійними характеристиками. Ця технологія складається з наступних операцій [15]:

- попереднє відбракування термоелектричних пластин та відбір по значенню термоелектричної добротності Z ;

- електрохімічне травлення поверхні термоелектричних пластин (густина струму 1,5 – 2 мА/мм²;

фіксацію р- та n-гілок відносно теплопереходів та їх притискання у процесі розплавлення припою для забезпечення надійних спаїв.

Послідовне електрохімічне травлення поверхні

Таблиця 1

Умови випробувань ТЕМ на довго тривалість

Т середовища, К	Час випробувань, год.	Кількість циклів
293 ± 2	500	3000
333 ± 2	500	3000
213 ± 2	500	3000

- хімічне осадження шарів нікелю ($\varnothing_1 = 10 - 12$ мкм);
- електрохімічне осадження шару міді ($\varnothing_2 = 8 - 10$ мкм);
- термічний відпал термоелектричних пластин ($T = 575$ К, на протязі одного часу в водневому середовищі);
- облужування відповідним припоєм (в залежності від робочої температури);
- проміжний контроль термоелектричної добротності Z пластин;
- розрізання пластин на р- і n-гілки;
- укладка р- і n- гілок з теплоелектрокомутаційними пластинами в оснастку для збирання модулів;
- комутація р- і n- гілок з теплоелектрокомутаційними пластинами;
- ультразвукова промивка ТЕМ;
- вакуумне обезгажування ТЕМ;
- термоелектротренування ТЕМ;
- контроль та відбракування ТЕМ;
- пакування ТЕМ.

Практично збирання модулів зводиться до процесу одночасної комутації термоелементів і теплопереходів у відповідності до заданої схеми

пластини, хімічне осадження півки нікелю, електрохімічне осадження півки міді, відпал та облужування дозволили створити антидифузійні перехідні шари р- та n-гілок, величина електричного опору

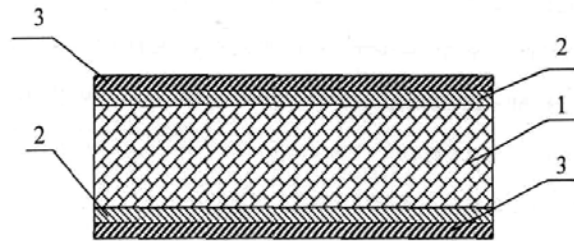


Рис. 2. Зовнішній вигляд термоелектричної пластини з нанесеними шарами. 1- термоелектричний матеріал, 2 – антидифузійний шар нікелю, 3 – шар припою.

яких складає: $r_p = 2,6 \cdot 10^{-5}$ Ом/см², $r_n = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Ом/см² при $T = 300$ К. Адгезійна міцність цих шарів складає величину $\sigma_p \geq 80 - 85$ МПа, $\sigma_n \geq 100$ МПа при $T = 300$ К. Зі зниженням температури величини перехідного опору падають, а їх адгезійна міцність зростає [16]. На рис. 2 наведено структуру термоелектричної пластини з нанесеними шарами.

Надійність розроблених ТЕМ [17,18] в часі

Таблиця 2

Дані про вимірювання параметру-критерія придатності ТЕМ (ΔT) до та після випробувань на довготривалість.

№ виробу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
До випробувань ΔT , К	43	44	40	43	43	42	43	41	42	43
Після 500 годин ΔT , К $T = (293 \pm 2)$ К	43	44	40	43	43	41	43	42	42	43
Після 500 годин ΔT , К $T = (333 \pm 2)$ К	43	44	40	43	43	41	42	41	42	43
Після 500 годин ΔT , К $T = (213 \pm 2)$ К	43	44	40	43	43	42	43	41	42	43
Після 1000 годин ΔT , К $T = (293 \pm 2)$ К	43	44	40	43	43	42	42	41	41	43
Після 2000 годин ΔT , К $T = (293 \pm 2)$ К	43	44	40	43	43	42	43	41	41	43

з'єднання термоелементів. Найбільш технологічним для такого роду пристроїв є метод пайки в паяльних ваннах із застосуванням оснастки, яка забезпечує

перевірялась випробуваннями на довготривалість, які складались з випробування в циклічному режимі, а після нього – в неперервному режимі. Дослідженню

надійності було піддано 100 зразків, відібраних методом випадкового відбору з 1500 шт. серійних виробів.

Випробування на довготривалість в циклічному режимі роботи проводилось за такою методикою: 10 хвилин включено, 5 хвилин виключено. Випробування проводились в камері тепла та холоду АДБ7.0002.00.00. Температура оточуючого середовища під час випробувань та умови випробувань наведені в таблиці 1.

Після напрацювання в циклічному режимі ТЕМ проходили випробування в неперервному режимі. Температура оточуючого середовища (293 ± 2) К на протязі 10000 годин.

мальних кліматичних умовах не менше 1 години. Дані вимірювань наведено в таблиці 2.

Як видно з отриманих даних, значення параметрів ТЕМ не змінюються після впливу граничних температур в діапазоні 213 – 333 К, а також в результаті впливу електричного навантаження в циклічному режимі на протязі 1500 годин та 2000 годин в неперервному режимі. При контролі зовнішнього вигляду механічних порушень не спостерігалось.

Розроблені ТЕМ також досліджувались на стійкість до механічних та кліматичних факторів.

Зокрема на стійкість до механічних факторів випробування проводились за такими впливаючими факторами: вібростійкість; віброміцність;

Таблиця 3

Механічні та кліматичні фактори на стійкість до яких випробовувались ТЕО

Найменування впливаючого фактору, одиниці вимірювання	Норми			Режими
	1-кас. ТЕМ	2-кас. ТЕМ	4-кас. ТЕМ	
1. Вібростійкість Діапазон частот, Гц Прискорення, g	10-2000 15	-	-	Оптимальний режим
2. Віброміцність Діапазон частот, Гц Прискорення, g	5-2000 15	1-300 12	1-100 3	н/р
3. Багаторазові удари Прискорення, g Трив. імпульсу, мс.	10000 75 6	1000 12 6	2000 15 2-5	н/р
4. Одноразові удари Прискорення, g Тривалість імпульсу, мс.	3 150 3	-	3 100 3	н/р
5. Лінійні навантаження Прискорення, g Час, хвил.	50 10	10 10	-	н/р
6. Зміна температур Максимальна, К Мінімальна, К	5 циклів 343 213	5 циклів 3730 213	5 циклів 323 223	н/р
7. Підвищена температура середовища, К Час витримки, години	358 1	353 1	342 1	Оптимальний робочий
8. Понижена температура середовища, К Час витримки, години	223 1	213 1	213 1	Оптимальний робочий
9. Комплексний вплив Температура середов., К Вібрація, Гц Загальний час, хвилин	3 цикли 373 50 15	-	-	Оптимальний робочий
10. Понижений атмосферний тиск Час витримки, с	5мм.рт.ст. 10	5мм.рт.ст. 10	10^{-4} мм рт.ст. 30	Оптимальний робочий

Параметри-критерії придатності (перепад температур (ΔT) контролювалися в циклічному режимі через кожні 500 годин випробувань, в неперервному – через кожні 1000 годин на установці АДБ0140.000.00. Перед вимірюванням параметрів-критеріїв придатності ТЕМ витримувались в нор-

багаторазові удари; одноразові удари; лінійні навантаження.

Стійкість до кліматичних факторів визначалась за такими впливаючими факторами: зміна температур; підвищена температура середовища; знижена температура середовища; комплексний вплив

температури середовища та вібрації; знижений атмосферний тиск.

Конкретні величини впливаючих кліматичних та механічних факторів наведено у таблиці 3.

Перед проведенням випробувань на ТЕМ були виміряні термоелектричні параметри, які після закінчення комплексу випробувань були виміряні знову. Це такі параметри як: оптимальний струм; падіння напруги; перепад температур; температура гарячого спаю; холодоутворюваність; споживча потужність.

Випробування ТЕМ Пельтьє на стійкість до механічних та кліматичних факторів (п. 1-8 та 10 таблиці 3) проводяться по ГОСТ 20.57.406 (методи

1 години, а після випробувань – не менше 2 годин.

Комплексний вплив підвищеної температури оточуючого середовища та вібраційних навантажень у 50 Гц (п. 9 таблиці 3) проводився на однокаскадних ТЕМ шляхом їх розігріву у випробувальній оснастці в камері тепла та холоду АДБ7.0002.00.00. до 373 К перенесенням його на вібростенд і випробуванням при 50 Гц. Згідно таблиці 1 таких циклів відбувалось 3. Перед випробуваннями та після нього контролюється зовнішній вигляд ТЕМ та вимірюється перепад температур на ньому. Після випробування параметри контролюються не раніше, ніж через годину.

Механічні та кліматичні випробування згідно з

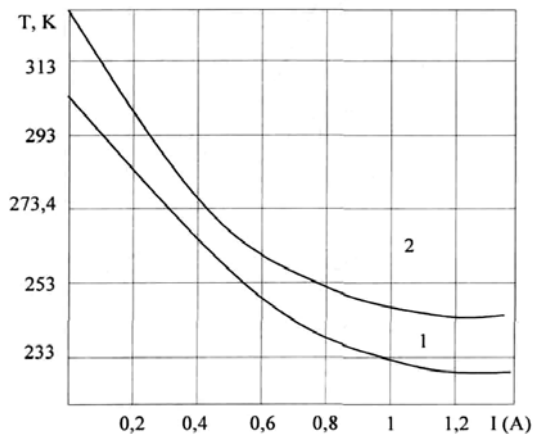


Рис. 3. Температурна залежність холодного спаю 4-х каскадного ТЕМ при температурі оточуючого середовища 293 К (1) та 333 К (2).

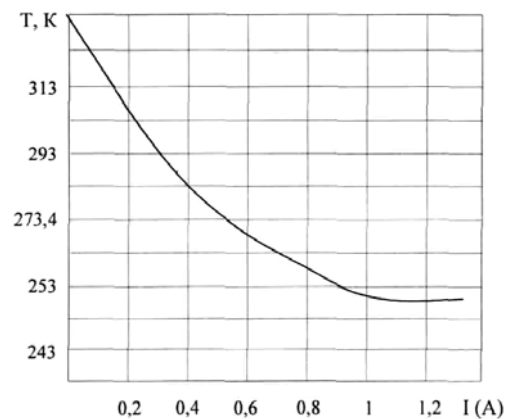


Рис. 4. Залежність температури холодного спаю від струму живлення при 333 К для двох-каскадного ТЕМ.

випробувань виробів електронної техніки) за відповідними методами. Датчик для вимірювання навантаження під час механічних випробувань

таблицею 3 було проведено з позитивним результатом для усіх конструкцій ТЕМ. Усі основні термоелектричні параметри ТЕМ після проведення

Таблиця 4

Параметри розроблених ТЕМ підвищеної надійності

Параметри	Типи ТЕМ			
	1 каскад (малострум.)	1-о каскадн.	2-х каскадн.	4-х каскадн.
1. Оптимальний струм, А	0,5	1,2	1,2	1,2
2. Падіння напруги, В	0,5	0,2	2,5	5,0
3. Перепад температур $\Delta T, K$	65	70	90	110
4. Температура гарячого спаю, К	333	333	333	300
5. Холодоутворюваність, Вт	0,05	0,05	0,15	0,08
6. Споживча потужність, Вт	0,25	0,25	3,5	6
7. Площа холодного боку, мм ²	2,8x2,8	2,8x2,8	4x9	3x8
8. Площа гарячого боку, мм ²	2,8x3,3	2,8x3	10x11	13x16
9. Висота модуля, мм	2,6	2,6	6,4	12,8
10. Число каскадів	1	1	2	4

закріплювався в контрольній точці на платформі відповідного випробувального стенду. Перед проведенням кліматичних випробувань ТЕМ витримуються в нормальних кліматичних умовах не менше

випробувань залишились в межах норм, виміряних до початку випробувань. Норми параметрів ТЕМ, що піддавались випробуванням, наведено в таблиці 4.

Досліджено також залежність температури

холодного спаю ТЕМ від струму живлення при температурах оточуючого середовища 293 К та 333 К. Результати випробувань наведено на рис. 3 – 6 для різних конструкцій ТЕМ.

1500 годин та 2000 годин в неперервному режимі, та інших механічних та кліматичних чинників) тотожні твердження [17] в частині, де мова йде про оцінку надійності в часі термоелектричних генераторів

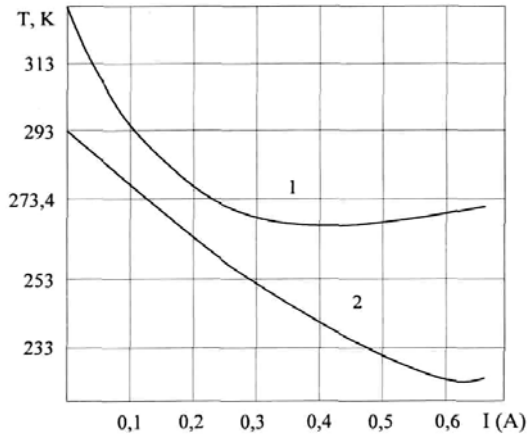


Рис. 5. Залежність температури холодного спаю від струму живлення при 333 К (1) та при 293 К (2) для однокаскадного ТЕМ (малострумний варіант).

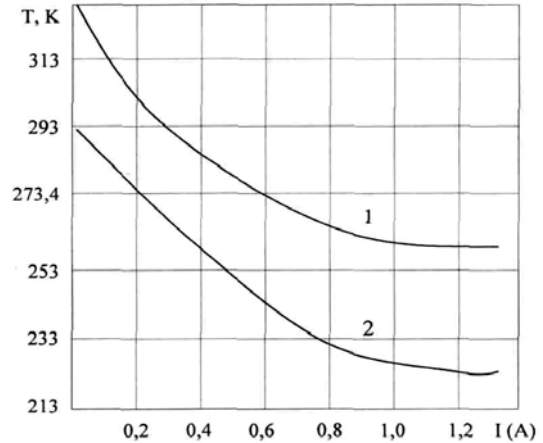


Рис. 6. Залежність температури холодного спаю від струму живлення при 333 К (1) та при 293 К (2) для однокаскадного ТЕМ (звичайний варіант).

Необхідно зауважити, що результати дослідження надійності розроблених термоелектричних модулів підвищеної надійності (впливу електричного навантаження в циклічному режимі на протязі

складної електричної схеми. Величезний досвід авторів згаданої роботи в галузі термоелектрики дозволяє вважати результати виконаних досліджень коректними.

А.А. Ащеулов – доктор технічних наук, головний науковий співробітник Чернівецького Національного університету та ІТ НАНУ і МОН України, професор;

Ю.Г. Добровольський – кандидат технічних наук, науковий співробітник ВАТ "ЦКБ "Ритм"

А.Г. Шайко-Шайковський – кандидат технічних наук, доцент Чернівецького національного університету;

В.Д. Фотій – кандидат фізико-математичних наук, головний інженер ВАТ "Кварц"

А.В. Клепиковський – викладач Чернівецького залізничного технікуму;

І.С. Романюк – начальник відділу ВАТ "Кварц"

- [1] Л.И. Анатычук. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник*, Киев: Наук. думка, С. 253 (1979).
- [2] А.А. Ащеулов, Л.И. Простеби, А.А. Теслюков и др. *Полупроводниковые термоэлектрические охладители. Информационный листок о научно-техническом достижении № 90-003*. Черновцы: ЦНТИ, С. 4 (1990).
- [3] *Стандартные модули "АЛТЕК" (Реклама) Термоэлектричество*, **1**, сс. 93 – 100 (2001).
- [4] Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов. *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3* , М.: Наука, С.320 (1972).
- [5] А.А. Ashcheulov, I.S. Romanyuk, A.G. Shaiko-Shaikovsky. Passed for existent of strange parameters of multistage thermoelectric cooler // *J. of Thermoelectricity*, **4**, PP.57-71, (1999).
- [6] А.А. Ащеулов, А.Г. Шайко-Шайковський. Конструктивно-технологические пути повышения надежности термомоэлектрических батарей // *ТКЭА*, **5-6**, СС.1-11, (2000).
- [7] Н.В. Горобец, В.В. Рюхтин, Л.И. Простеби, А.А. Теслюков. Получение термоэлектрических материалов повышенной добротности в промышленных условиях // *Электронная техника, Сер. Материалы*, **183(12)** СС. 126-128 (2000).
- [8] И.С. Романюк. О возможности получения монокристаллического теллурида висмута // *НТС Электроника и связь*, **4(3)**, С. 443 (1998).

- [9] А.А. Ащеулов, І.С. Романюк, Л.І. Простебі, Ю.Г. Добровольський. Пристрій для отримання монокристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту // *Науковий вісник Чернівецького університету*, **66**, СС. 39-40 (1999).
- [10] А.А. Ащеулов, Ю.Г. Добровольський, І.С. Романюк. Патент України на винахід № 36796 *Спосіб отримання монокристалів твердих розчинів на основі телуриду вісмуту методом вертикальної зонної перекристалізації*. МПК Н 01 С30В13/30, С30В13/34. Заявк. № 2000020710 від 09.02.2000, опубл. 16.04.2001. Бюл. № 3
- [11] O'Connor et al. Patent USA № 39033572. *Method for growing crystals*, 1976.
- [12] В.П. Кручинин, І.І. Метелкин. *Способ металлизации керамики*. А.С. СССР № 564293. Заявл. 27.12.1971, опубл. Бюл. из. № 25. 1977.
- [13] Н.И. Рыкалин, М.Х. Шершоров, Ю.Л. Красулин. Физические и химические проблемы соединений разродных металлов // *Изв. АН СССР. Орган. Материалы*, **3**(1), сс.29-38 (1965).
- [14] А.А. Ащеулов. Исследование технологических возможностей термоэлектрических модулей с целью автоматизации процессов их изготовления // *Отчет по НИР № 01900067959*, Черновцы, С.126 (1991).
- [15] А.А. Ащеулов, І.С. Романюк, Л.І. Простебі, Ю.Г. Добровольський, С.А. Вітрик. Особливості виготовлення удосконалених термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту // *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка*, **79**, сс. 92-94 (2000).
- [16] Т.Н. Алиева, Я.С. Фейзиєв, Ф.Г. Мусаєв и др. Сопротивление и адгезионная прочность переходов контактов на границах раздела монокристаллов твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ со слоями Ni с эвтектикой системы Bi-Sn // *Изв. АН СССР. Неорг. мат.*, **26**(4), сс. 716-718 (1990).
- [17] Л.И. Анатычук, О.Я. Лусте. Особенности применения теории надежности в термоэлектричестве // *Термоэлектричество*, **1**, сс. 63-69 (2001).
- [18] Н.Н. Прошкин. Методы повышения надежности и долговременной стабильности охлаждающих термоэлектрических модулей // *Термоэлектричество*, **2**, сс. 57-65 (2000).

A.A. Asheulov, Yu.G. Dobrovolsky, A.G. Shayko-Shaykovsky, V.D. Photiy,
A.V. Klepikovskiy, I.S. Romaniyk

Thermoelectric modules Peltie of heightened reliability

*The open joint-stock company "Quartz",
str. Golovna, 246., Tchernivtsi, 58032
E-mail: kvarz@chv.ukrpack.net*

High-reliability thermoelectric Peltier modules have been developed. Reliability characteristics improvement is achieved at the expense Bi-Te-Se-Sb solid solution 28 – 35 mm in diameter and up to 300 in length characterized up rated mechanical strength being a value of $\sigma_p \geq 80$ MPa, $\sigma_n \geq 100$ MPa at $T = 300$ K and by plating ceramic plates with a molybdenum-copper pseudo-alloy. TEM parameters values do not change on ultimate temperature of 213-333 K effect at electric load in cyclic (1500 hours) and continuous (2000 hours) modes. TEM developed resistively to mechanical and climatic factors influence.