



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., Вихор Л.М.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна



Вихор Л.М.

ГРАНИЦІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ ФОТОПРИЙМАЧІВ

Викладено результати дослідження граничних можливостей застосування термоелектричного охолодження для фотоприймачів. Впровадження сучасних технологій для ІЧ детекторів дає можливість змістити їхню робочу температуру із криогенної області в діапазон 120 – 200 К. Показано, що такі температури можуть досягатися термоелектричним охолодженням шляхом використання нових сучасних підходів у розробці й виготовленні каскадних термоелектричних модулів. Такими підходами є, по-перше, використання для віток охолоджуючих модулів оптимальних функціонально-градієнтних матеріалів на основі Bi-Te, по-друге, застосування для віток n-типу провідності в низькотемпературних каскадах сплавів Bi-Sb і розміщення цих каскадів в оптимально-однорідному або оптимально-неоднорідному магнітному полі. На основі результатів комп'ютерного моделювання визначено, що практичне впровадження цих підходів за розробки модулів забезпечує рівень термоелектричного охолодження ІЧ приймачів аж до 120 К з достатньою енергетичною ефективністю.

Ключові слова: фотоприймач, ІЧ детектор, термоелектричне охолодження.

The results of research on the marginal opportunities of using thermoelectric cooling for photo detectors are presented. The introduction of modern technologies for IR detectors allows shifting their operating temperature from the cryogenic region to the range of 120 – 200 K. It is shown that such temperatures can be achieved by thermoelectric cooling through use of new up-to-date approaches in the development and manufacture of stage thermoelectric modules. Such approaches are: first, using optimal functionally graded materials based on Bi-Te for the legs of cooling modules, secondly, using Bi-Sb alloys for n-type legs in low-temperature stages and arrangement of these stages in optimally homogeneous or optimally inhomogeneous magnetic field. Based on the results of computer simulation it was determined that practical introduction of these approaches in the development of modules assures the level of thermoelectric cooling of IR detectors up to 120 K with sufficient energy efficiency.

Key words: photo detector, IR detector, thermoelectric cooling.

Вступ

Напівпровідникові фотоприймальні обладнання широко використовуються для реєстрації ІЧ випромінювання й формування ІЧ зображення в сучасній наземній і космічній апаратурі, системах для астрономічних спостережень, автоматичної орієнтації по зірках, у приладах нічного бачення й т.п. Приймачі з фотоелектричним перетворенням ІЧ сигналу мають добрі граничні характеристики (спектральну чутливість, виявну здатність) і високу швидкодію. Але для цього потрібне охолодження фотоприймача аж до криогенних температур [1]. Охолодження

необхідне для зменшення теплової генерації носіїв заряду в напівпровідниковому фоточутливому елементі. Теплові переходи носіїв конкурують із оптичними, що призводить до великого за величиною темного шуму в неохолоджених приладах.

Робоча температура фотоприймача пов'язана з робочим діапазоном довжин хвиль ІЧ детектора й залежить від матеріалу й технології фоточутливого елемента. Сучасні охолоджувані ІЧ сенсори ефективно працюють за температур, нижчих 200 К [1]. Для охолодження таких обладнань спеціально розроблені й використовуються мікрокріогенні системи на основі газової кріогенної машини Стирлінга, яка сполучається з кріостатованим фотоприймачем у єдину конструкцію [2-6]. Вони забезпечують температуру охолодження фотоприймача на рівні 75 – 150 К. Основний недолік таких систем – їх висока вартість. Такі механічні системи охолодження роблять ІЧ сенсорні обладнання громіздкими, дорогими й малонадійними, що перешкоджає широкому практичному використанню ІЧ приладів. Середньохвильові (3 – 5 мкм) і довгохвильові (5 – 30 мкм) ІЧ сенсори, що працюють без кріоохолодження, потрібні для багатьох важливих практичних застосувань.

Наукові дослідження останнього десятиліття показали, що добрі граничні характеристики сенсорів середньо- і довгохвильового ІЧ діапазону можуть забезпечуватися за робочих температур фотоприймачів суттєво вищих від кріогенних [7,8]. Ці температури легко досягаються за допомогою термоелектричного охолодження [9,10], яке в цьому випадку є раціональнішим порівняно з машинним способом одержання холоду.

Мета пропонованої роботи – аналіз можливостей термоелектрики для охолодження сенсорних пристроїв; визначення раціонального діапазону робочих температур фотоприймачів з термоелектричним охолодженням.

Результати досліджень

Термоелектричне охолодження достатньо широко використовується для забезпечення необхідної робочої температури ІЧ детекторів [1,9,10]. Фотоприймальний пристрій, розміщений на теплопоглинальній грані термоелектричного охолоджуючого модуля, як правило, монтується в герметичний корпус, основа якого перебуває в доброму тепловому контакті з теплообмінником.

Однокаскадні термоелектричні модулі застосовуються для неглибокого охолодження (до 250 К) ІЧ сенсорів і для стабілізації температури так званих неохолоджуваних фотоприймачів видимого й ІЧ діапазону. Для охолодження ІЧ сенсорів до робочої температури 230 К використовуються двокаскадні термоелектричні охолоджувачі (ТЕО), до температури 210 К – трикаскадні, до температури 190 К – чотирикаскадні ТЕО. Характеристики таких ТЕО (максимальні перепад температур ΔT_{max} , холодопродуктивність Q_{max} , напруга U_{max} , струм живлення I_{max}), якими комплектуються, наприклад, ІЧ приймачі компанії VIGO, наведено в таблиці 1 [10].

Багатокаскадні модулі випускаються різними компаніями. У таблиці 2 наведено характеристики каскадних модулів провідних фірм. Модулі виготовляються із традиційних термоелектричних матеріалів на основі *Bi-Te* з однорідним розподілом концентрації домішок у вітках термоелементів.

Таким чином, термоелектричні охолоджувачі в наш час забезпечують охолодження ІЧ сенсорів до 190 К. Такі пристрої малогабаритні, міцні, високонадійні й мають робочий ресурс

до 20 років. Основний недолік термоелектричного охолодження – низька енергетична ефективність.

Як ми вже зазначали, для ІЧ приймачів з робочими температурами в діапазоні 70 – 150 К застосовуються мікрокриогенні системи Стирлінга [3-5]. Це енергоефективні охолоджувачі. За холодопродуктивності в інтервалі 100 – 600 мВт їх холодильний коефіцієнт досягає величин 10^{-2} – $3 \cdot 10^{-2}$.

Таблиця 1

Характеристики каскадних ТЕО для охолодження ІЧ приймачів [10]

	2-каскадний ТЕО	3-каскадний ТЕО	4-каскадний ТЕО
$T_{\text{приймача}}, \text{ К}$	~ 230 К	~ 210 К	~ 195 К
$Q_{\text{max}}, \text{ Вт}$	0.36	0.27	0.28
$\Delta T_{\text{max}}, \text{ К}$	92	114	125
$U_{\text{max}}, \text{ В}$	1.3	3.6	8.3
$I_{\text{max}}, \text{ А}$	1.2	0.45	0.5

Разом з тим, останні дослідження показали, що впровадження сучасних передових технологій для ІЧ детекторів робить можливим змістити робочу температуру ІЧ приймача із криогенної області в діапазон 150 – 200 К [8,11-13]. При цьому його граничні характеристики не погіршуються. У наш час такі температури можуть досягатися термоелектричним охолодженням шляхом використання нових сучасних підходів у розробці й виготовленні каскадних термоелектричних модулів.

Одним з таких підходів є використання функціонально-градієнтних термоелектричних матеріалів (ФГТМ) для віток термоелементів [14]. Це матеріали з оптимальною неоднорідністю основних термоелектричних властивостей: термоЕРС, електропровідності і теплопровідності.

Другий підхід – це застосування матеріалів з підвищеною ефективністю в області низьких температур. Прикладом таких матеріалів можуть бути сплави *Bi-Sb* *n*-типу провідності. Ці сплави мають високу термоелектричну добротність за температур, нижчих 160 К, яка до того ж зростає в магнітному полі. Застосування оптимально неоднорідного магнітного поля додатково підвищує ефективність охолодження модулів з таких матеріалів [14, 15].

У таблиці 3 наведено результати оцінки характеристик низькотемпературних каскадних термоелектричних модулів, що забезпечують охолодження до температури, нижчої 200 К, за температури тепловиділяючої поверхні 300 К. Максимальний холодильний коефіцієнт розраховувався з врахуванням вищевказаних підходів. Для розрахунків використовувалися комп'ютерні методи, розроблені на основі теорії оптимального керування [14].

Визначено, що для досягнення температур 160-200 К досить використовувати три-, чотирикаскадні модулі, термоелементи яких виконані із ФГТМ на основі *Bi-Te*. Такі ФГТМ можуть бути утворені шляхом формування відповідного неоднорідного розподілу домішок по матеріалу або зміни його складу.

Для охолодження до температур 150 – 120 К чотирикаскадний модуль із ФГТМ на основі *Bi-Te* повинен бути доповнений низькотемпературними каскадами. У цих каскадах доцільно застосовувати для віток *n*-типу провідності сплави на основі *Bi-Sb*. За кімнатної температури добротність *Z* в *n-BiSb* становить приблизно $0.8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, за низьких температур *Z* зростає, досягаючи $5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ за 100 К. Магнітне поле додатково підвищує це значення до $8 - 9 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ [14, 15]. У цьому випадку ФГТМ *n*-типу провідності на основі *Bi-Sb*, тобто матеріал зі змінними

основними термоелектричними характеристиками α , σ , κ , можна одержати за допомогою оптимальної зміни індукції магнітного поля, у якому розміщується цей матеріал. Для додаткового підвищення холодильного коефіцієнта можна використовувати комбінацію оптимальної функції неоднорідності поля й оптимальної неоднорідності матеріалу *Bi-Sb*, одержуваної шляхом зміни його складу [14, 15]. На жаль, дотепер в арсеналі термоелектрики немає матеріалів *p*-типу провідності з аналогічною залежністю добротності від магнітного поля. Тому для віток *p*-типу необхідно використовувати ФГТМ на основі традиційного складу *Bi-Te*.

Таблиця 2

Характеристики каскадних модулів провідних компаній

Компанія	Модуль	Кількість каскадів	Характеристики модуля			
			ΔT_{\max} , К	Q_{\max} , Вт	U_{\max} , В	I_{\max} , А
Marlow Industries США [marlow.com]	SP402-01AB	3	111	0.5	7.5	4.5
	NL3040	3	98	0.5	4.5	6.5
Ferrotec США [ferrotec.com]	9530/119/045B	3	111	9.7	8.6	4.5
Thermion Україна [thermion-company.com]	3TMC06-070-15	3	116	0.6	5.3	0.9
	4TMB 099-3112	4	126	0.27	6.5	0.5
	5TMB 113-B1224	5	130	0.57	6.4	1.2
	5TMB 164-X1224	5	136	1.8	10.2	3.7
Komatsu Японія [kelk.co.jp]	K3MC011	3	114	6.2	7.5	5.1
	K4MB005	4	134	3.6	15.3	5.1
	K5MB002	5	145	1.5	14.7	4.8
RMT.ltd Росія [rmtltd.ru]	3МДС04	3	116	0.27	5.7	0.4
Laird Technologies США [lairdtech.com]	MS3	3	118	3.6	6.5	6.5
	MS4	4	122	2.7	7.6	3.5
	MS5	5	123	2	14.5	1.6
Tellurex США [tellurex.com]	M3	3	98	6.6	7.8	3.6
	M4	4	112	3.4	15	3
ОАО “НППТФП ОСТЕРМ СПБ” Росія [osterm.ru]	PE3	3	117	3	6.5	6.5
	PE4	4	125	3.75	7.8	5.4
	PE5	5	133	8	16	7.1

Таблиця 3

Оціночні значення характеристик низькотемпературних ТЕО

Температура охолодження T_c , К	Кількість каскадів	Холодильний коефіцієнт, ϵ_{\max}	Потужність за теплового навантаження $Q_0=10$ мВт, W, Вт	Матеріал ТЕО
200	3	$4 \cdot 10^{-2}$	0.25	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
190	3	$2.5 \cdot 10^{-2}$	0.4	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
180	4	$1.2 \cdot 10^{-2}$	0.83	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
170	4	$5 \cdot 10^{-3}$	2.0	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
160	4	$2 \cdot 10^{-3}$	5.0	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
150	5	$8 \cdot 10^{-4}$	12.0	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 1 верхній каскад – <i>n-BiSb</i> у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
140	6	$3 \cdot 10^{-4}$	33.5	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 2 верхніх каскади – <i>n-BiSb</i> у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
130	7	$1.8 \cdot 10^{-4}$	50.0	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 3 верхніх каскади – <i>n-BiSb</i> неоднорідний за складом, у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
120	7	$6 \cdot 10^{-5}$	170.0	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 3 верхніх каскади – <i>n-BiSb</i> неоднорідний за складом, у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
110	8	$1.4 \cdot 10^{-5}$	710.0	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 4 верхніх каскади – <i>n-BiSb</i> неоднорідний за складом, у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
100	9	$2.4 \cdot 10^{-6}$	4160	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 5 верхніх каскадів – <i>n-BiSb</i> неоднорідний за складом, у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ

Висновки

Результати цих досліджень свідчать про те, що практичне використання сучасних технологій у виготовленні модулів дає можливість розширити температурний діапазон

термоелектричного способу охолодження ІЧ сенсорів і може забезпечити робочі температури ІЧ приймачів аж до 120 К з достатньою енергетичною ефективністю.

Література

1. Rogalski A. Progress in focal plane arrays technologies. Progress in Quantum Electronics, V. 36, N 2–3, 2012, P. 342–473.
2. Липин М.В. Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования М.В. Липин, А.В. Громов // ФПУ 1-го и 2-го поколений. Прикладная физика, №2, 2007г., С. 110 – 119.
3. Современное состояние разработки и перспективы развития МКС Сплит–Стирлинг для охлаждаемых ФПУ. / М.В. Липин, А.В. Громов // Доклад на XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25 –28 мая 2010 г., г. Москва 1. М.В. 2.
4. A. Veprik, S Zehtzer, H Vilenchik and N Pundak. Micro-miniature split Stirling linear cryocooler. AIP Conf. Proc. V. 1218, 2010, p.363-370.
5. Состояние разработки и перспективы развития МКС Сплит–Стирлинг для охлаждаемых ФПУ. / М.В. Липин, А.В. Громов // Доклад на XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 27 –30 мая 2008г., г. Москва, www.cryontk.ru.
6. Результаты модернизации модуля охлаждения фотоприемников 2 класса типа МКС МСМГ-3В-1/80 КВО.0733.000. / М.В. Липин, А.В. Смирнов, Е.А. Лохман, Е.В. Забенкова // Доклад на XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25 –28 мая 2010, г. Москва.
7. M.A. Kinch, Fundamental Physics of Infrared Detector Materials J. of electronic materials, V.29, N6, 2000, p.809-817.
8. Itay Shtrichman, Daniel Aronov, Michael ben Ezra, et al. High operating temperature *InSb* and *XBn-InAsSb* photodetectors. Proceedings of SPIE Volume 8353, Infrared Technology and Applications XXXVIII, 83532Y, May 1, 2012.
9. A. Piotrowski, J. Piotrowski, W. Gawron, J. Pawluczyk and M. Pedzinska Extension of Usable Spectral Range of Peltier Cooled Photodetectors ACTA Physica Polonica A, Vol. 116, 2009, P. s-52 – s-55.
10. <http://www.vigo.com.pl/>
11. Michel Vuillermet, Philippe Tribolet. Operating temperature: a challenge for cooled IR technologies. Proc. of SPIE, Vol. 7660, 2010.
12. Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, Noam Snapi, et al. High Operating Temperature *XBn-InAsSb* Bariode Detectors. Proc. of SPIE, Vol. 8268, 2012.
13. S. Tsao, H. Lim, W. Zhang, and M. Razeghi. High operating temperature 320x256 middle-wavelength infrared focal plane array imaging based on an *InAs/InGaAs/InAlAs/InP* quantum dot infrared photodetector. Applied Physics Letters, V. 90, 2007, P. 201109-1 – 201109-3.
14. Анатичук Л.І. Термоелектричество, том IV. Функционально-градиентные термоелектрические материалы. / Л.І.Анатичук, Л.Н. Вихор // Институт термоелектричества, Черновцы, 2012, 180 с.
15. Anatyhuk L.I., Vihor L.N., Optical function of magnetic field for one- and multi- stage peltier coolers. J. of Thermoelectricity, 1998, №2, p. 14-19.

Надійшла до редакції 09.10.2013