

Анатычук Л.И., Вихор Л.Н.



Анатычук Л.И.

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



Вихор Л.Н.

## ПРЕДЕЛЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ

*Представлены результаты исследования предельных возможностей применения термоэлектрического охлаждения для фотоприемников. Внедрение современных технологий для ИК-детекторов позволяет сместить их рабочую температуру из криогенной области в диапазон 120–200 К. Показано, что такие температуры могут достигаться термоэлектрическим охлаждением на основе использования новых современных подходов в разработке и изготовлении каскадных термоэлектрических модулей. Такими подходами являются, во-первых, использование для ветвей охлаждающих модулей оптимальных функционально-градиентных материалов на основе Bi-Te, во-вторых, применение для ветвей n-типа проводимости в низкотемпературных каскадах сплавов Bi-Sb и размещение этих каскадов в оптимально-однородном или оптимально-неоднородном магнитном поле. На основе результатов компьютерного моделирования определено, что практическое внедрение этих подходов при разработке модулей обеспечивает уровень термоэлектрического охлаждения ИК-приемников вплоть до 120 К с достаточной энергетической эффективностью.*

**Ключевые слова:** фотоприемник, ИК-детектор, термоэлектрическое охлаждение.

*The results of research on the limiting capabilities to use thermoelectric cooling for photodetectors 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 implementation 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.

### Введение

Полупроводниковые фотоприемные устройства широко используются для регистрации ИК излучения и формирования ИК изображения в современной наземной и космической аппаратурах, системах для астрономических наблюдений, автоматической ориентации по

звездам, в приборах ночного видения и т.п. Приемники с фотоэлектрическим преобразованием ИК сигнала имеют хорошие пороговые характеристики (спектральную чувствительность, обнаружительную способность) и высокое быстродействие. Но для уменьшения тепловой генерации носителей заряда в полупроводниковом фоточувствительном элементе требуется охлаждение фотоприемника вплоть до криогенных температур [1]. Тепловые переходы носителей конкурируют с оптическими, что приводит к большому по величине темновому шуму в неохлажденных приборах.

Рабочая температура фотоприемника связана с рабочим диапазоном длин волн ИК-детектора и зависит от материала и технологии фоточувствительного элемента. Современные охлаждаемые ИК-сенсоры эффективно работают при температурах ниже 200 К [1]. Для охлаждения таких устройств специально разработаны и используются микрокриогенные системы на основе газовой криогенной машины Стирлинга, которая совмещается с криостатируемым фотоприемником в единой конструкции, что обеспечивает температуру охлаждения фотоприемника до 75 – 150 К [2-6]. Основным недостатком таких систем является высокая их стоимость. Такие механические системы охлаждения делают ИК сенсорные устройства громоздкими и малонадежными, что препятствует широкому практическому использованию ИК приборов. Средне- (3 – 5 мкм) и длинноволновые (5 – 30 мкм) ИК-сенсоры, работающие без криоохлаждения, имеют широкую область практического применения.

Научные исследования последнего десятилетия показали, что надлежащие пороговые характеристики сенсоров средне- и длинноволнового ИК диапазона могут обеспечиваться при рабочих температурах фотоприемников существенно выше криогенных [7, 8]. Эти температуры легко достигаются при помощи термоэлектрического охлаждения [9, 10], которое в данном случае является более рациональным по сравнению с машинным способом получения холода.

Целью настоящей работы является анализ возможностей термоэлектричества для охлаждения сенсорных устройств и определение рационального диапазона рабочих температур фотоприемников с термоэлектрическим охлаждением.

## **Результаты исследований**

Термоэлектрическое охлаждение достаточно широко используется для обеспечения необходимой рабочей температуры ИК-детекторов [1, 9, 10]. Фотоприемное устройство, размещенное на теплопоглощающей площадке термоэлектрического охлаждающего модуля, как правило, монтируется в герметичный корпус, основание которого находится в хорошем тепловом контакте с теплообменником.

Однокаскадные термоэлектрические модули применяются для неглубокого охлаждения (до 250 К) ИК-сенсоров и для стабилизации температуры так называемых неохлаждаемых фотоприемников видимого и ИК диапазонов. Для охлаждения ИК-сенсоров до рабочей температуры 230 К используются двухкаскадные термоэлектрические охладители (ТЭО), до температуры 210 К – трех-, а до температуры 190 К – четырехкаскадные ТЭО. Характеристики таких ТЭО (максимальные перепад температур  $\Delta T_{\max}$ , холодопроизводительность  $Q_{\max}$ , напряжение  $U_{\max}$ , ток питания  $I_{\max}$ ), которыми комплектуются, например, ИК приемники компании VIGO, приведены в таблице 1 [10].

Таблица 1

Характеристики каскадных ТЭО для охлаждения ИК приемников [10]

	2-каскадный ТЭО	3-каскадный ТЭО	4-каскадный ТЭО
$T_{\text{приемника}}, \text{ К}$	~ 230	~ 210	~ 195
$Q_{\text{max}}, \text{ Вт}$	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

Многокаскадные модули выпускаются различными компаниями. В таблице 2 приведены характеристики каскадных модулей ведущих фирм. Модули изготавливаются из традиционных термоэлектрических материалов на основе *Bi-Te* с однородным распределением концентрации примесей в ветвях термоэлементов.

Таким образом термоэлектрические охладители в настоящее время обеспечивают охлаждение ИК-сенсоров до 190 К. Такие устройства малогабаритные, прочные, высоконадежные и имеют рабочий ресурс до 20 лет. Основной недостаток термоэлектрического охлаждения – низкая энергетическая эффективность.

Как уже отмечалось, для ИК-приемников с рабочими температурами в диапазоне 70 – 150 К применяются микрокриогенные системы Стирлинга [3-5]. Это энергоэффективные охладители. При холодопроизводительностях в интервале 100 – 600 мВт их холодильный коэффициент достигает величин  $10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$ .

Вместе с тем, последние исследования показали, что внедрение современных передовых технологий для охлаждения ИК детекторов позволяет сместить рабочую температуру ИК приемника из криогенной области в диапазон 150 – 200 К [8, 11-13]. При этом его пороговые характеристики не ухудшаются. В настоящее время такие температуры могут достигаться термоэлектрическим охлаждением путем использования новых современных подходов в разработке и изготовлении каскадных термоэлектрических модулей.

Одним из таких подходов является использование функционально-градиентных термоэлектрических материалов (ФГТМ) для ветвей термоэлементов [14]. Это материалы с оптимальной неоднородностью основных термоэлектрических свойств: термоЭДС  $\alpha$ , электропроводности  $\sigma$  и теплопроводности  $\kappa$ .

Второй подход – это применение материалов с повышенной эффективностью в области низких температур. Примером таких материалов могут быть сплавы *Bi-Sb* *n*-типа проводимости. Эти сплавы имеют высокую термоэлектрическую добротность при температурах ниже 160 К, которая к тому же возрастает в магнитном поле. Применение оптимально неоднородного магнитного поля дополнительно повышает эффективность охлаждения модулей из таких материалов [15].

Таблица 2

*Характеристики каскадных модулей ведущих компаний*

Компания	Модуль	Количество каскадов	Характеристики модуля			
			$\Delta T_{\max}$ , К	$Q_{\max}$ , Вт	$U_{\max}$ , В	$I_{\max}$ , А
Marlow Industries США [marlow.com]	SP402-01AB NL3040	3	111	0.5	7.5	4.5
		3	98	0.5	4.5	6.5
Ferrotec США [ferrotec.com]	9530/119/045B	3	111	9.7	8.6	4.5
Thermion Украина [thermion-company.com]	3TMC06-070-15	3	116	0.6	5.3	0.9
	4TMB04-099-C112	4	126	0.27	6.5	0.5
	5TMB06-113-B1224	5	130	0.57	6.4	1.2
	5TMB10-164-X1224	5	136	1.8	10.2	3.7
Komatsu Япония [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 Россия [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” Россия [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

В таблице 3 приведены результаты оценки характеристик низкотемпературных каскадных термоэлектрических модулей, обеспечивающих охлаждение до температуры ниже 200 К при температуре тепловыделяющей поверхности 300 К. Максимальный холодильный коэффициент рассчитывался с учетом вышеотмеченных подходов. Для расчетов использовались компьютерные методы, разработанные на основе теории оптимального управления [14].

Таблица 3

Оценочные значения характеристик низкотемпературных ТЭО

Температура охлаждения $T_c$ , К	Количество каскадов	Холодильный коэффициент, $\epsilon_{\max}$	Мощность при тепловой нагрузке $Q_0 = 10$ мВт, $W$ , Вт	Материал ТЭО
200	3	$4 \cdot 10^{-2}$	0.25	ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i>
190	3	$2.5 \cdot 10^{-2}$	0.4	ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i>
180	4	$1.2 \cdot 10^{-2}$	0.83	ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i>
170	4	$5 \cdot 10^{-3}$	2.0	ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i>
160	4	$2 \cdot 10^{-3}$	5.0	ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i>
150	5	$8 \cdot 10^{-4}$	12.0	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 1 верхний каскад – <i>n-BiSb</i> в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
140	6	$3 \cdot 10^{-4}$	33.5	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 2 верхних каскада – <i>n-BiSb</i> в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
130	7	$1.8 \cdot 10^{-4}$	50.0	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 3 верхних каскада – <i>n-BiSb</i> неоднородный по составу, в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
120	7	$6 \cdot 10^{-5}$	170.0	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 3 верхних каскада – <i>n-BiSb</i> неоднородный по составу, в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
110	8	$1.4 \cdot 10^{-5}$	710.0	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 4 верхних каскада – <i>n-BiSb</i> неоднородный по составу, в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
100	9	$2.4 \cdot 10^{-6}$	4160	4 каскада – ФГТМ на основе <i>Bi-Te</i> , 5 верхних каскадов – <i>n-BiSb</i> неоднородный по составу, в неоднородном магнитном поле, <i>p-BiTe</i> ФГТМ

Определено, что для достижения температур 160 – 200 К достаточно использовать трех-, четырехкаскадные модули, термоэлементы которых выполнены из ФГТМ на основе *Bi-Te*. Такие ФГТМ могут быть образованы путем формирования соответствующего неоднородного распределения примесей по материалу или изменения его состава.

Для охлаждения до температур 150 – 120 К четырехкаскадный модуль из ФГТМ на основе *Bi-Te* должен быть дополнен низкотемпературными каскадами. В этих каскадах целесообразно применять для ветвей *n*-типа проводимости сплавы на основе *Bi-Sb*. При комнатной температуре добротность  $Z$  у *n-BiSb* составляет приблизительно  $0.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , при низких температурах  $Z$  возрастает, достигая  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при 100 К. Магнитное поле дополнительно повышает это значение до  $8 - 9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [15]. В этом случае ФГТМ *n*-типа проводимости на основе *Bi-Sb*, т.е. материал с изменяющимися основными термоэлектрическими характеристиками  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ , можно получить при помощи оптимального изменения индукции магнитного поля, в котором размещается этот материал. Для дополнительного повышения холодильного коэффициента можно использовать сочетание оптимальной функции неоднородности поля и оптимальной неоднородности материала *Bi-Sb*, получаемой путем изменения его состава [15]. К сожалению, до настоящего времени в арсенале термоэлектричества нет материалов *p*-типа проводимости с аналогичной зависимостью добротности от магнитного поля. Поэтому для ветвей *p*-типа необходимо использовать ФГТМ на основе традиционного состава *Bi-Te*.

## Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что практическое использование современных технологий в изготовлении модулей позволяет расширить температурный диапазон термоэлектрического способа охлаждения ИК сенсоров и может обеспечить рабочие температуры ИК приемников вплоть до 120 К с достаточной энергетической эффективностью.

## Литература

1. A. Rogalski, Progress in Focal Plane Arrays Technologies, *Progress in Quantum Electronics* 36 (2-3), 342 – 473 (2012).
2. Липин М.В. Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 1-го и 2-го поколений / М.В. Липин, А.В. Громов // Прикладная физика. – 2007 – № 2. – С. 110 – 119.
3. Липин М.В. Современное состояние разработки и перспективы развития МКС Сплит–Стирлинг для охлаждаемых ФПУ / М.В. Липин, А.В. Громов // XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25 – 28 мая 2010, Москва 1. М.В. 2.
4. A. Veprik, S. Zehtzer, H. Vilenchik, and N. Pundak, Micro-Miniature Split Stirling Linear Cryocooler, *AIP Conf. Proc.* 1218, 363 – 370 (2010).
5. Липин М.В. Состояние разработки и перспективы развития МКС Сплит–Стирлинг для охлаждаемых ФПУ / М.В. Липин, А.В. Громов // XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 27 – 30 мая 2008, Москва, [www.cryontk.ru](http://www.cryontk.ru).

6. Липин М.В. 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 // XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 25 – 28 мая 2010, Москва.
7. M.A. Kinch, Fundamental Physics of Infrared Detector Materials, *J. Electronic Materials* 29 (6), 809 – 817 (2000).
8. Itay Shtrichman, Daniel Aronov, Michael ben Ezra, et al., High Operating Temperature *Epi-InSb* and *XBn-InAsSb* Photodetectors, *Proceedings of SPIE* 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* 116, s-52 – s-55 (2009).
10. <http://www.vigo.com.pl/>
11. Michel Vuillermet, Philippe Tribolet, Operating Temperature: a Challenge for Cooled IR Technologies, *Proc. of SPIE* 7660 (2010).
12. Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, Noam Snapi, et al., High Operating Temperature *XBn-InAsSb* Bariode Detectors, *Proc. of SPIE* 8268 (2012).
13. S S. Tsao, H. Lim, W. Zhang, and M. Razeghi, High Operating Temperature  $320 \times 256$  Middle-Wavelength Infrared Focal Plane Array Imaging Based on an *InAs/InGaAs/InAlAs/InP* Quantum Dot Infrared Photodetector, *Applied Physics Letters* 90, 201109-1 – 201109-3 (2007).
14. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Функционально-градиентные термоэлектрические материалы: [том IV] / Л.И. Анатычук, Л.Н. Вихор – Черновцы: Институт термоэлектричества, 2012. – 180 с.
15. L.I. Anatyshuk Optimal functions of magnetic field for one- and multi-stage peltier coolers / L.I. Anatyshuk, L.N. Vykhор // *Journal of Thermoelectricity*. – 1998. – № 2. – p. 14 – 19.

Поступила в редакцию 09.10.2013.