

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.С. Морозов

magicmusic@mail.ru

А.С. Кротов

С.И. Каськов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведена оценка возможностей использования термоэлектрического холодильника в составе системы обеспечения теплового режима фотоприемного устройства дистанционного зондирования поверхности Земли в инфракрасном диапазоне. Предложен способ обеспечения температурной стабильности фоточувствительного элемента с расчетом холодильного коэффициента на создаваемый перепад температур. Получены массогабаритные характеристики устройства применительно к предложенному способу обеспечения температурной стабильности. Проанализирован холодильный коэффициент цикла работы системы для криогенного диапазона температур

Ключевые слова

Фотоприемное устройство, термоэлектрический холодильник, пассивная система обеспечения теплового режима, криогенный аккумулятор холода, дистанционное зондирование Земли

Поступила в редакцию 16.11.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

При проектировании систем обеспечения тепловых режимов бортовых фотоприемных устройств дистанционного зондирования Земли в инфракрасном диапазоне [1] возникают сложности, заключающиеся в необходимости обеспечения высокой тепловой стабильности в условиях криогенных температур: характерное отклонение температуры фоточувствительного элемента (ФЧЭ) фотоприемного устройства (ФПУ) должно составлять не более 0,1...0,5 К в рабочем режиме (режиме съемки). При этом характерное значение температуры ФЧЭ в рабочем режиме составляет от 60 до 65 К.

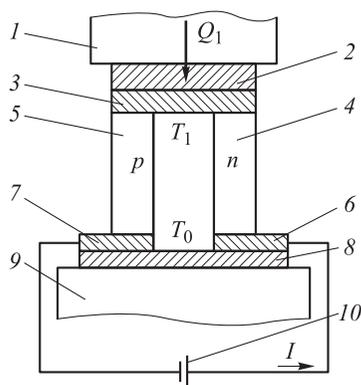
Для обеспечения заданного теплового режима подобных фотоприемных устройств используется система обеспечения теплового режима (СОТР), в схему которой входит криогенный аккумулятор холода (АХ) [1–4] с установленным (непосредственно или через тепловой мост) ФЧЭ. В качестве рабочего тела АХ используется плавящееся при температуре стабилизации ФЧЭ вещество. В дежурном режиме осуществляется захолаживание АХ, например, с помощью газовой криогенной машины (ГКМ); в рабочем режиме ГКМ выключена — ФЧЭ охлаждается за счет накопленного в АХ запаса холода. Однако в процессе фазового перехода рабо-

чего тела АХ в результате увеличения толщины жидкой фазы на поверхности теплообмена АХ с ФЧЭ температура контакта постепенно увеличивается и отклонение от температуры стабилизации может достигать от 1 до 3 К.

Поэтому между криогенным АХ и ФЧЭ предлагается устанавливать термоэлектрический холодильник (ТЭХ), горячий спай которого установлен на АХ — стоке теплоты для данной холодильной машины, а холодной спай — на ФЧЭ, являющимся источником теплоты. При этом тепловая стабильность ФЧЭ достигается путем изменения силы тока в ветвях ТЭХ по мере увеличения температуры АХ. Принципиальная схема ТЭХ в составе системы охлаждения ФПУ приведена на рис. 1.

Рис. 1. Принципиальная схема ТЭХ в системе охлаждения ФПУ:

- 1 — ФЧЭ; 2, 3 — изоляционные пластины;
4, 5, 6 — коммутационные пластины; 7, 8 —
ветви термоэлемента; 9 — АХ; 10 — источник
электрической энергии



Особенности ТЭХ при криогенных температурах. Основная сложность использования ТЭХ в задаче охлаждения ФЧЭ заключается в необходимости поддержания условий работы холодильной машины на уровне криогенных температур: температура охлаждаемого элемента должна составлять от 60 до 65 К. Большинство полупроводниковых материалов при данных температурах имеет низкую термоэлектрическую способность, обычно оцениваемую по коэффициенту добротности (или коэффициенту качества) материала z :

$$z = \frac{\alpha}{\sqrt{\kappa\rho}},$$

где α — коэффициент термо-ЭДС; κ — коэффициент теплопроводности; ρ — удельное сопротивление.

Для некоторых материалов коэффициент добротности увеличивается при помещении контура с током в магнитное поле (эффект Эттингсгаузена, эффект Нернста — Эттингсгаузена и др.). Однако подобные термомагнитные холодильные машины здесь не рассматриваются, поскольку их конструкции несколько сложнее ТЭХ из-за необходимости организации магнитного поля.

Известны полупроводниковые сплавы n -типа, имеющие аномальные термоэлектрические свойства при криогенных температурах: при снижении температуры их коэффициент добротности повышается. Примерами являются сплавы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ [5] и $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_{1-z}\text{Te}_z$ [4, 5], где $0 < x \leq 20$. На p -ветвь для этих материалов аномальность не распространяется.

Оценка параметров и размеров ТЭХ. Материалы полупроводников подбирают приближенно: материалом *n*-ветви выбран сплав Bi-Sb, *p*-ветви — Bi₂Te₃. Отметим, что характеристики материалов также подбирали приближенно, поскольку не было найдено достаточно точных данных в литературе по термоэлектрическим свойствам полупроводников при низких температурах, а также не были проведены соответствующие эксперименты. В общем случае характеристики зависят от множества факторов, влияние которых сложно прогнозировать:

- концентрация носителей (в [5] ее оптимальное значение предлагается рассчитать численно, используя вариационный подход, можно также определить экспериментально);

- способ получения кристаллов [6] — экструзия, зонная плавка, метод Чохральского, кристаллизация в узких щелях и т. д.;

- чистота материала влияет на подвижность носителей, механизм рассеяния, концентрацию носителей;

- ориентация образца материала при измерении его характеристик — многие используемые материалы обладают анизотропными свойствами.

Используя известные данные, экстраполяцию и простые оценочные расчеты, приняты характеристики материалов, приведенные в таблице.

Характеристики используемых в оценке материалов ветвей ТЭХ

Параметр	Bi-Sb	Bi ₂ Te ₃
z, K^{-1}	$5 \cdot 10^{-3}$ [7, 8]	$1,8 \cdot 10^3$ (77 K) $2 \cdot 10^3$ (100 K) $0,76 \cdot 10^3$ (60 K)*
$\alpha, \text{В/К}$	$180 \cdot 10^{-6}$ [7, 9]	$60 \cdot 10^{-6**}$
$\kappa, \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$ [9]	$7,5 \cdot 10^{-2**}$
$\sigma = \frac{1}{\rho}, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$	4500 [8, 9]	$1,585 \cdot 10^4$

* Рассчитано по α, κ, σ , приведенным в таблице.
** Выбран худший случай из имеющихся данных.

Рассчитаем коэффициент добротности для *p-n* пары:

$$z_{\text{ТЭХ}} = \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\sqrt{\frac{\kappa_1}{\sigma_2}} + \sqrt{\frac{\kappa_2}{\sigma_1}}} \right)^2 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

где индекс 1 соответствует материалу Bi-Sb; индекс 2 соответствует материалу Bi₂Te₃.

Соотношение между площадями поперечного сечения ветвей имеет вид

$$m = \sqrt{\frac{\kappa_2 \sigma_1}{\kappa_1 \sigma_2}} = 0,730.$$

В данных условиях эксплуатации холодопроизводительность (количество теплоты, снимаемой с ФЧЭ ФПУ) принята $Q_1 = 1$ Вт, а температуры спаев: горячего, сбрасывающего теплоту АХ, $T_0 = 63$ К, холодного, принимающего теплоту от ФПУ, $T_1 = 60$ К. Принятая температура горячего спаев соответствует температуре плавления азота в тройной точке. Отметим, что в оценочных расчетах принимается, что теплообмен между ФПУ и холодным спаем, а также между АХ и горячим спаем соответствует граничным условиям IV рода. В действительности температуры спаев зависят от характера теплообмена с соответствующими средами.

Бортовая сеть космического аппарата обеспечивает для ТЭХ напряжение $V = 2$ В, длина ветвей (она же толщина холодильника за вычетом изоляции и толщин коммутационных пластин между каскадами) $l_1 = l_2 = 5$ мм. В целях снижения габаритных размеров холодильника необходимо уменьшать длину ветвей, но при этом ухудшаются условия теплообмена между спаем и окружающей средой (придется снимать большую плотность теплового потока q_1 от ФПУ и отдавать большее значение q_0 криогенному аккумулятору) и увеличиваются нежелательные теплопритоки от горячего спаев к холодному. Рекомендуемая длина ветвей $l > 3$ мм. При этом падение напряжения на элементе составляет

$$v_0 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(T_0 - T_1)\sqrt{1 + 0,5z(T_0 + T_1)}}{\sqrt{1 + 0,5z(T_0 + T_1)} - 1} = 0,012 \text{ В.}$$

При определении холодильного коэффициента машины принято, что термоэлектрическое охлаждающее устройство может работать в двух основных режимах — максимального холодильного коэффициента ε_{\max} и максимальной холодопроизводительности Q_{\max} . В первом случае прибор наиболее эффективно будет преобразовывать потребляемую электрическую энергию в «холод», во втором случае в ущерб экономичности может быть получено наибольшее понижение температуры. Поскольку в рассматриваемой задаче необходимо обеспечить небольшой перепад температур, устройство должно работать в режиме ε_{\max} , для которого справедлива формула:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \frac{\sqrt{1 + 0,5z(T_0 + T_1)} - T_0/T_1}{\sqrt{1 + 0,5z(T_0 + T_1)} + 1} = 0,141.$$

При получении данной формулы использовали модель, в которой не учитывался эффект Томпсона. В настоящем случае этот эффект будет пренебрежимо мал из-за невысокой разности температур; потребляемая термобатареей мощность

$$W = \frac{Q_1}{\varepsilon_{\max}} = 7,12 \text{ Вт, рабочий ток } I = \frac{W}{V} = 3,55 \text{ А.}$$

Выполнен анализ зависимости $\epsilon_{\max} = f(\Delta T, z, T_0, T_1)$, где $\Delta T = T_0 - T_1$. Результаты приведены на рис. 2–5.

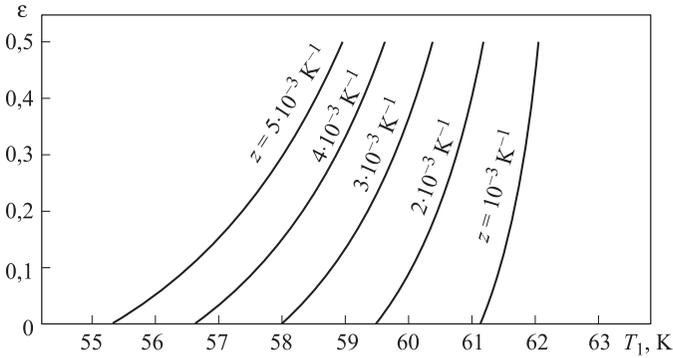


Рис. 2. Зависимость холодильного коэффициента от температуры холодного спаея при фиксированных значениях температуры горячего спаея и коэффициента добротности

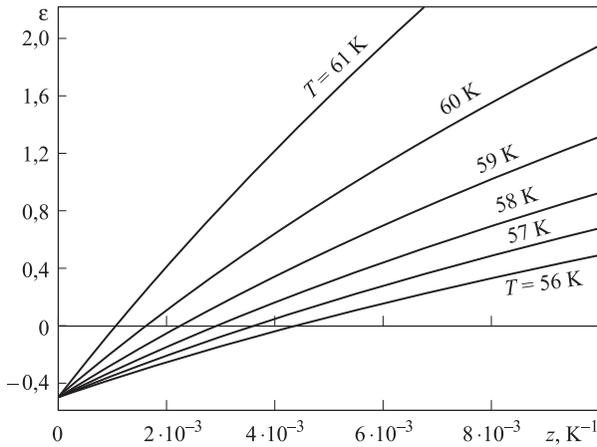


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента от коэффициента добротности при фиксированных значениях температур горячего и холодного спаев

Число термоэлементов находим по формуле: $N = V/v_0 \approx 162$.

Сопротивление одного термоэлемента можно определить из падения напряжения на нем следующим образом:

$$v_0 = IR + (\alpha_1 - \alpha_2)(T_0 - T_1) \Rightarrow R = \frac{v_0 - (\alpha_1 - \alpha_2)(T_0 - T_1)}{I} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Через найденное сопротивление найдем площади сечений ветвей:

$$R = l \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right) = \frac{l}{S_1} (\rho_1 + m_0 \rho_2) \Rightarrow S_1 = \frac{l(\rho_1 + m_0 \rho_2)}{R} = 0,043 \text{ см}^2,$$

$$S_2 = S_1/m_0 = 0,059 \text{ см}^2.$$

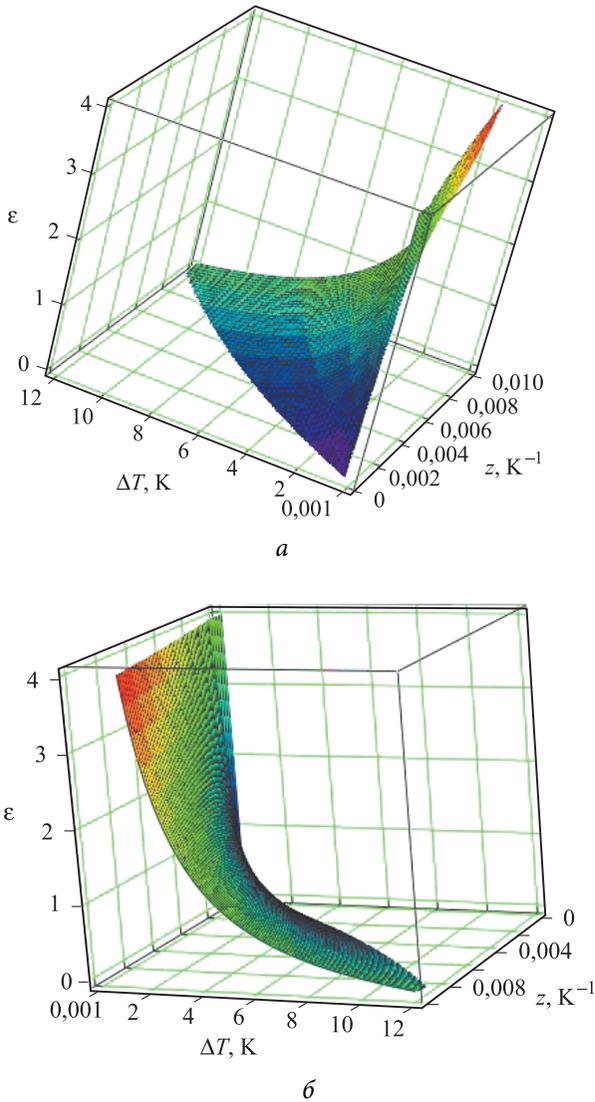


Рис. 4. Зависимость холодильного коэффициента от коэффициента добротности и разности температур при фиксированной температуре горячего спая $T_0 = 63$ К:
 а — повернуто; б — прямо

Оценка размеров и массы элемента Пельтье дала следующие результаты:

$$L_1 = L_2 = \sqrt{S_2} \sqrt{2N} \approx 45 \text{ мм},$$

$$L_3 = l + 2l_1 = 7 \text{ мм},$$

где $l_1 = 1$ мм — толщина изоляционных пластин.

Объем элемента Пельтье составил $V = L_1 L_2 L_3 \approx 10 \text{ см}^3$. Масса $M = N(D_1 l S_1 + D_2 l S_2) \approx 70$ г, где $D_1 = 9,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ — плотность сплава Bi-Sb; $D_2 = 6,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ — плотность материала Bi_2Te_3 .

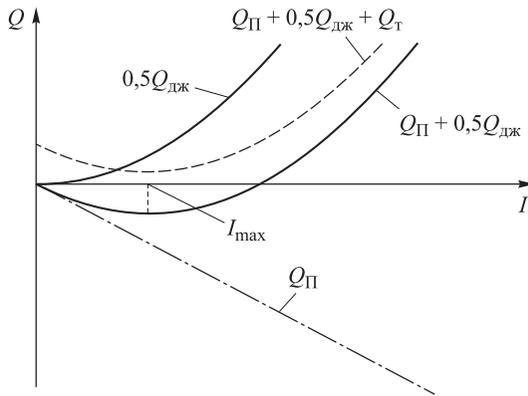


Рис. 5. График зависимости теплоты Q_0 от силы тока

Анализ изменения холодильного коэффициента. На рис. 3 видно, что при достаточно низких значениях z холодильный коэффициент принимает отрицательные значения, что, на первый взгляд, кажется нефизичным. Однако этому можно дать объяснение. При выводе формулы для ε_{\max} предполагалось, что температуры спаев жестко фиксированы, а сам коэффициент определялся как функция от силы тока следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{\Pi_{1,2}I - \frac{1}{2}I^2R - K\Delta T}{(\alpha_1 - \alpha_2)(T_0 - T_1)I + I^2R},$$

где $\Pi_{1,2} = (\alpha_1 - \alpha_2)T_1$ — коэффициент Пельтье; K — термическое сопротивление в контуре с током.

Мощность W , затрачиваемая на преодоление эффекта Зеебека $Q_3 = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_0 - T_1)I$ и теплоту Джоуля $Q_{дж} = I^2R$, по определению не может быть отрицательной. Следовательно, отрицательное значение принимает теплота Q_1 , т. е. теплота отводится от холодного спаю, хотя цель холодильной машины обратная.

Анализируя Q_1 (см. рис. 5), выявили следующее: эффект охлаждения чувствительного элемента (подвод теплоты к холодному спаю) реализуется за счет теплоты Пельтье $Q_{П} = \Pi_{1,2}I$, пропорциональной силе тока. Но в то же время на холодном спае выделяется джоулева теплота, пропорциональная квадрату силы тока и уменьшающая требуемый эффект охлаждения. В первом приближении принято считать, что на холодном спае выделяется половина джоулевой теплоты всего контура с током $0,5I^2R$. Очевидно, что линейная функция до некоторого значения тока $I_{\max} = \Pi_{1,2}/R$ растет быстрее, чем параболическая, и поэтому в рамках данной модели (при пренебрежении эффекта Томпсона и теплопроводности внутри контура с током) холодопроизводительность будет достигать своего

максимума при $I = I_{\max}$ (см. рис. 5, кривая $Q_{\Pi} + 0,5Q_{\text{дж}}$). Однако большое влияние могут оказать и теплопритоки от горячего спая к холодному из-за теплопроводности — $Q_m = K\Delta T$ — еще больше уменьшающие эффект охлаждения. Можно считать, что эта теплота не зависит от силы тока, и при достаточно больших ее значениях в равновесном состоянии системы теплота Q_0 будет принимать отрицательное значение, т. е. холодный спай будет отдавать теплоту внешней среде:

$$Q_1 = Q_{\Pi} + 0,5Q_{\text{дж}} + Q_{\tau} < 0.$$

Выводы. 1. Исследование показало, что термоэлектрические холодильники могут применяться в составе СОТР, обеспечивая необходимый тепловой режим ФЧЭ ФПУ дистанционного зондирования Земли в инфракрасном диапазоне. Для поддержания температуры ФЧЭ ФПУ на уровне 60 К применение ТЭХ позволяет устранить нестабильность температуры элемента охлаждения ФПУ — криогенного АХ до 3 К за счет точного изменения холодопроизводительности ТЭХ при регулировке тока в его ветвях.

2. Использование в составе предложенной СОТР ТЭХ требует дополнительные 7 Вт мощности в рабочем режиме из бортовой сети КА-носителя. При этом остальное оборудование ИК-прибора дистанционного зондирования Земли (а именно приводы зеркал и фокусировки оптической системы, блок обработки информации с ФЧЭ и система управления) в рабочем режиме потребляет около 250 Вт из сети КА. Типичная кремниевая солнечная батарея имеет КПД ~15 % (на околоземной орбите ее эффективная удельная поверхностная мощность составит 200 Вт/м²) и удельную поверхностную массу 3 кг/м². Следовательно, для обеспечения работы оборудования ИК-прибора при съемке требуется солнечная батарея массой приблизительно 3,75 кг без учета мощности ТЭХ, с ее же учетом требуется порядка 3,86 кг. Также выявили, что масса и объем такого холодильника (0,070 кг и 0,000010 м³) составляют малую часть массогабаритных характеристик всей СОТР ФПУ (имеющей характерную массу 12...14 кг) и ИК-прибора в целом (массой около 100 кг).

3. Данный способ охлаждения предлагается в дальнейшем использовать для обеспечения тепловых режимов штатных ИК-приборов высокого разрешения, эксплуатируемых в составе целевой аппаратуры автоматических КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Формозов Б.Н.* Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. СПб.: СПбГУАП, 2002. 120 с.
2. *Gilmore D.G.* Spacecraft thermal control handbook. Vol. 2: Cryogenics. Reston, Va. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 641 p.
3. *Bugby David C.* Development of advanced cryogenic integration solutions, in Cryocoolers 10. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. P. 671–687.

4. *Карагузов В.И.* Исследование принципов построения бортовых криогенных систем охлаждения на базе газовых криогенных машин Стирлинга для аппаратуры инфракрасного наблюдения // Сб. науч.-техн. статей по ракетно-космической технике. Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2001. С. 72–84.
5. *Анатычук Л.И., Семенюк В.А.* Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Черновцы: Прут, 1992. 135 с.
6. *Булат Л.П., Ведерников М.В., Вялов А.П.* Термоэлектрическое охлаждение. СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. 147 с.
7. *Агаев З.Ф., Абдинова Г.Д., Тагиев М.М.* Анизотропия термоэдс экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ / Известия Национальной академии наук Азербайджана. Серия физико-технических и математических наук. 2003. № 2. С. 111–114.
8. *Урюпин О.Н.* Термоэлектрические явления в кристаллах системы висмут–сурьма в широком интервале температур. Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: Физ.-техн. ин-т, 1995. 17 с.
9. *Thermoelectric module for low temperature applications / S. Lal, S. Loo, D.-Y. Chung, T. Kyratsi, M.G. Kanatzidis, C. Cauchy, T.P. Hogan // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2002. Vol. 691. P. G6.2.1–G6.2.9.*

Морозов Алексей Сергеевич — студент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Кротов Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Каськов Сергей Иосифович — научный сотрудник НИИ ЭМ, старший преподаватель кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Морозов А.С., Кротов А.С., Каськов С.И. Оценка применимости термоэлектрической холодильной машины для термостабилизации фотоприемного устройства дистанционного зондирования Земли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 48–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-48-58

FEASIBILITY ASSESSMENT OF THERMALLY STABILIZING THE PHOTODETECTOR FOR EARTH REMOTE SENSING WITH THERMOELECTRICAL COOLER

A.S. Morozov

magicmusic@mail.ru

A.S. Krotov

S.I. Kas'kov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This paper estimates whether thermoelectrical cooler can be used as a component of thermal control system of infrared photodetector for earth remote sensing. The article offers a method to maintain thermal stability of the photodetector. The authors calculated coefficient of performance for thermoelectrical cooler and maximal temperature drop, and estimated its mass-dimensional parameters as applied to proposed method of thermal stability maintenance. The paper shows the analysis of a curve behavior of theoretical coefficient of performance for thermoelectrical cooler under cryogenic temperatures

Keywords

Photodetector, thermoelectrical cooler, passive thermal control system, cryogenic thermal storage unit, earth remote sensing

REFERENCES

- [1] Formozov B.N. Aerokosmicheskiye fotopriyemnyye ustroystva v vidimom i infrakrasnom diapazonakh [Aerospace visual and infrared photodetectors]. St. Petersburg, SPbGUAP Publ., 2002. 120 p.
- [2] Gilmore D.G. Spacecraft thermal control handbook. Vol. 2. Cryogenics. Reston, Va. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 641 p.
- [3] Bugby David C. Development of advanced cryogenic integration solutions, in Cryocoolers 10. R. Ross Jr., ed. Kluwer Academic/Plenum Publishers, N.Y., 1999, pp. 671–687.
- [4] Karagusov V.I. Research of principles of on-board cryogenic refrigeration system construction based on gas cryogenic stirling machines for infrared viewing equipment. *Sb. nauch.-tekh. statey po raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Collection of scientific and engineering articles on rocket and space technology]. Samara, SRPSRC TSSKB-Progress, 2001, pp. 72–84 (in Russ).
- [5] Anatyshuk L.I., Semenyuk V.A.. Optimal'noye upravleniye svoystvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal controlling the properties of thermoelectric materials and devices]. Chernovtsy, Prut Publ., 1992. 135 p.
- [6] Bulat L.P., Vedernikov M.V., Vyalov A.P. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye [Thermoelectric cooling]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2002. 147 p.
- [7] Agaev Z.F., Abdinova G.D., Tagiev M.M. Thermoelectric power coefficient anisotropy of the extruded samples of $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ solid solution. *Izv. nats. akad. nauk Azerbaydzhana. Ser. fiz.-tekh. i mat. nauk* [Proceedings of the National Azerbaijan Academy of Science. Applied Physics and Mathematics Series], 2003, no.2, pp. 111–114 (in Russ.).
- [8] Uryupin O.N. Termoelektricheskiye yavleniya v kristallakh sistemy vismut-sur'ma v shirokom intervale temperature. Avtoreferat diss. kand. fiz.-mat. nauk [Thermoelectric phenomena in crystals of bismuth-antimony system in a wide temperature range] Cand. phys.-math. sci. diss. abstr.]. St. Petersburg, Fiz.-tekh. inst., 1995. 17 p.
- [9] Lal S., Loo S., Chung D.-Y., Kyratsi T., Kanatzidis M.G., Cauchy C., Hogan T.P. Thermoelectric module for low temperature applications. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2002, vol. 691, pp. G6.2.1–G6.2.9.

Morozov A.S. — student of Thermal Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Krotov A.S. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Refrigeration, Cryogenic Technics, Air Conditioning and Life-Support Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kas'kov S.I. — Scientific Researcher of the Energy Engineering Research and Development Institute, Senior Lecturer of Thermal Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Morozov A.S., Krotov A.S., Kas'kov S.I. Feasibility Assessment of Thermally Stabilizing the Photodetector for Earth Remote Sensing with Thermoelectrical Cooler. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 5, pp. 48–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-48-58