

УДК 537.322.9

Термоэлектрические приемники излучения

Л. И. Анатычук, Б. Н. Демчук, Р. Р. Кобылянский, А. В. Прибыла, В. Ю. Шустаков

Приведены результаты компьютерного моделирования и разработки термоэлектрических приемников излучения на основе анизотропных, короткозамкнутых и термопарных преобразователей энергии. Проектирование приемников выполнено путем применения объектно-ориентированного программирования. Изготовлены образцы приемников с приемными площадками от 5×5 до 20×20 мм и вольт-ваттной чувствительностью до 5 В/Вт. Приводятся примеры их применения в приборах для измерения лазерного излучения.

PACS: 41.20.Cv

Ключевые слова: термопарный элемент, анизотропный термоэлемент, короткозамкнутый термоэлемент, приемник излучения, компьютерное моделирование, быстродействие, вольт-ваттная чувствительность, постоянная времени.

Введение

К настоящему времени накопился достаточно большой материал по разработке и применению термоэлектрических приемников излучения. В качестве первичных преобразователей таких приемников используются наряду с классическими термопарными элементами и преобразователи на основе анизотропных и короткозамкнутых термоэлементов, что расширяет области практического применения термоэлектрических приемников излучения [1—3].

Но как показал анализ литературы, при разработке первичных преобразователей традиционно пользуются упрощенными физическими моделями, что не учитывают контактные эффекты и температурные зависимости кинетических коэффициентов материала.

Цель работы — создание более точных компьютерных методов проектирования первичных преобразователей для приемников излучения на основе анизотропных, короткозамкнутых и термопарных термоэлементов и разработка экспериментальных образцов на их основе.

Приемник излучения на основе анизотропного термоэлемента

Принцип работы анизотропного термоэлемента (АТ) основан на использовании анизотропии термоЭДС [4, 5]. В материале с анизотропным коэффициентом термоЭДС разность температур создаст поперечную термоэлектродвижущую силу (перпендикулярную градиенту температуры). Томсон [6] установил, что величина этих термоэлектродвижущих сил равна:

$$E = (\alpha_{11} - \alpha_{22})\Delta T \sin\varphi \cos\varphi a/b, \quad (1)$$

где $\Delta\alpha = (\alpha_{11} - \alpha_{22})$ — разность между компонентами тензора термоЭДС;

$\Delta T = (T_1 - T_2)$ — разность температур между верхней и нижней гранью кристалла;

φ — угол между кристаллографической осью и гранью кристалла;

a/b — отношение между геометрическими размерами кристалла (рис. 1).

Из соотношения (1) следует, что величиной выходного сигнала можно управлять, меняя соотношение между геометрическими размерами кристалла. Такие преобразователи технологичны и не требуют больших затрат на изготовление. Также к их преимуществам можно отнести быстродействие, отсутствие большого числа коммутационных спаев и низкую зонную неоднородность.

Описание физической модели АТ

Физическая модель АТ (см. рис. 1) представлена в виде монокристаллического бруска 2, изго-

Анатычук Лукьян Иванович, директор.

Демчук Б. Н., научный сотрудник.

Кобылянский Р. Р., аспирант.

Прибыла А. В., аспирант.

Шустаков В. Ю., младший научный сотрудник.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины.

Украина, 58002, г. Черновцы, Главпочтамт, а/я 86.

Тел. (380-3722)-44422. E-mail: ite@inst.cv.ua

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2011 г.

© Анатычук Л. И., Демчук Б. Н., Кобылянский Р. Р.,

Прибыла А. В., Шустаков В. Ю., 2011

товленного из анизотропного материала, φ — угол наклона кристаллографической оси к оси x , кинетические коэффициенты материала (коэффициенты термоЭДС $\alpha_{ii}(T)$, электропроводности $\sigma_{ii}(T)$ и теплопроводности $k_{ii}(T)$) зависят от температуры.

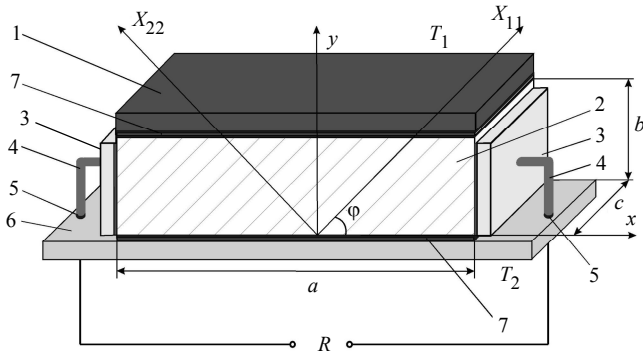


Рис. 1. Анизотропный преобразователь

На верхней грани анизотропного бруска размещена теплоприемная площадка 1, которая прилегает к верхней грани бруска. На нижней стороне бруска размещен термостат 6, который находится в тепловом контакте с токовыми проводниками 4 (токовые проводники электрически изолированы от термостата изоляцией 5). Между приемной площадкой, термостатом и анизотропным бруском размещены электрические изоляции 7. На боковых гранях анизотропного бруска размещены токовые пластины 3. Ток от анизотропного термоэлемента отводится во внешнюю цепь с сопротивлением R проводниками. На боковые грани анизотропного термоэлемента наложены условия адиабатической изоляции.

Математическое и компьютерное описание модели АТ

Уравнения для распределений потенциала U и тока в термоэлементе даются выражениями:

$$-\nabla \left[\left(\hat{\kappa}(T) + \hat{\alpha}(T)^2 \hat{\sigma}(T)T + \hat{\alpha}(T)U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla T \right] - \nabla \left[\left(\hat{\alpha}(T) \hat{\sigma}(T)T + U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla U \right] = 0; \tag{2}$$

$$-\nabla \left(\hat{\sigma}(T) \hat{\alpha}(T) \nabla T \right) - \nabla \left(\hat{\sigma}(T) \nabla U \right) = 0, \tag{3}$$

полученные из законов сохранения энергии и электрического заряда, соответственно. Уравнения (2) и (3) — это дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных для искомых функций электрического потенциала U и температуры T , которые необходимо решать с соответствующими граничными условиями.

Для построения компьютерной модели был использован пакет прикладных программ Comsol

Multiphysic, что дало возможность решить поставленную задачу [7].

Конструкция анизотропного приемника излучения

Моделирование анизотропного преобразователя энергии в качестве приемника излучения позволило определить его оптимальную конструкцию, представленную на рис. 2. Разработанный приемник состоит из шести анизотропных термоэлементов на основе CdSb длиной $a = 15$ мм и шириной $c = 1,5$ мм. Его характеристики в зависимости от толщины b термоэлемента приведены в табл. 1.

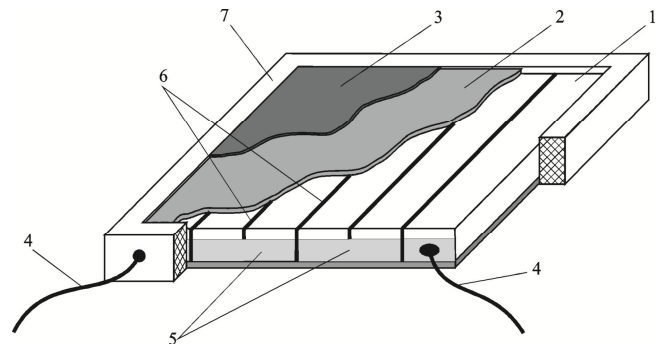


Рис. 2. Анизотропный приемник излучения:

- 1 — анизотропный термоэлемент; 2 — приемный коллектор;
- 3 — черное покрытие; 4 — токовые проводники; 5 — коммутационные пластины; 6 — изоляционные промежутки;
- 7 — корпус

Таблица 1

Параметры	Толщина термоэлемента b , мкм		
	30	300	3000
Коэффициент преобразования, В/Вт	0,3	0,3	0,3
Постоянная времени, с	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2}$	2,9
Сопротивление, Ом	2000	180	19
Обнаружительная способность, см \cdot Гц $^{0,5} \cdot$ Вт $^{-1}$	10^7	$2 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$

Сравнение компьютерного моделирования с экспериментальными результатами показало, что погрешность моделирования составляет не более 6 %.

Следует также отметить, что анизотропные приемники характеризуются лучшими значениями зонной однородности (± 3 %) по сравнению с классическими термопарными приемниками.

Приемник излучения на основе короткозамкнутого термоэлемента

Принцип работы короткозамкнутого термоэлемента (КЗТЭ) [4, 8, 9] основан на генерации поперечных электродвижущих сил вследствие протекания термоэлектрических токов, вызванных

замыканием граней термоэлемента, находящихся при разной температуре. В таком термоэлементе поперечная к тепловому потоку термоЭДС E_{\perp} зависит от коэффициента Зеебека материала, разности температур между изотермическими гранями, соотношения геометрических размеров КЗТЭ и ориентации закорачивающих элементов относительно градиента температуры:

$$E_{\perp} = \alpha \cdot \Delta T \frac{a}{b} f(n, \varphi), \quad (4)$$

где α — коэффициент Зеебека;

ΔT — разница температур;

a, b — длина и высота КЗТЭ;

$f(n, \varphi)$ — некоторая функция, зависящая от количества проводников и угла закорачивания φ (угол между изотермической гранью и закорачивающим элементом).

В работах [8, 9] установлено, что при определенных условиях КЗТЭ могут иметь большие значения КПД, напряжения и повышенную надежность, чем известные анизотропные термоэлементы.

Своей надежностью КЗТЭ также превышают аналогичную характеристику обычных термопарных элементов. Нарушение электрического контакта, как правило, выводит термопарные элементы из строя, а для КЗТЭ нарушение контактов проводников или появление трещин в материале самого термоэлемента приводит только к незначительному уменьшению напряжения.

Описание физической модели КЗТЭ

Физическая модель КЗТЭ с косым замыканием представлена на рис. 3. Согласно этой модели КЗТЭ состоит из рабочего тела 1 в виде прямоугольного бруска с геометрическими размерами a, b, c , электрических контактов 2 и закорачивающих элементов 3. Соответствующие закорачивающие элементы, которые соединяют верхнюю и нижнюю изотермические грани бруска, образуют с одной из этих граней угол φ , отличный от 0 и 90°. На торцевых гранях бруска расположены токовые контакты 4 и токовые проводники 5, которыми термоэлемент соединен с внешней электрической цепью 6.

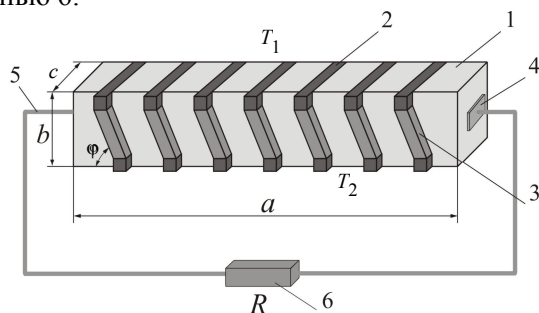


Рис. 3. Схема короткозамкнутого термоэлемента с косым замыканием

В физической модели необходимо учесть температурную зависимость кинетических коэффициентов материалов, влияние термоэлектрических эффектов Зеебека, Пельтье, Томсона и вихревых термоэлектрических токов; материалы рабочего тела термоэлемента (Bi_2Te_3) и закорачивающих элементов (Cu) — однородный и изотропный.

Математическое и компьютерное описание модели КЗТЭ

Уравнения для построения математической модели КЗТЭ с косым замыканием получены из законов сохранения энергии и электрического заряда, которые можно представить в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных:

$$-\nabla \left[(k + \alpha^2 \sigma T + \alpha \sigma T) \nabla T \right] - \quad (5)$$

$$-\nabla \left[(\alpha \sigma T + \sigma U) \nabla U \right] = 0;$$

$$-\nabla (\alpha \sigma \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (6)$$

Для построения компьютерной модели КЗТЭ использовались методы решения дифференциальных уравнений в частных производных в системе моделирования Comsol Multiphysics.

Конструкция короткозамкнутого приемника излучения

Разработанный в результате моделирования приемник состоит из отдельных, скоммутированных между собой, короткозамкнутых термоэлементов (рис. 4) на основе Bi_2Te_3 с геометрическими размерами рабочего тела: длина $a = 20$ мм, ширина $c = 1$ мм, толщина $b = 2$ мм. Характеристики такого преобразователя с приемной площадью размером 20×20 мм приведены в табл. 2.

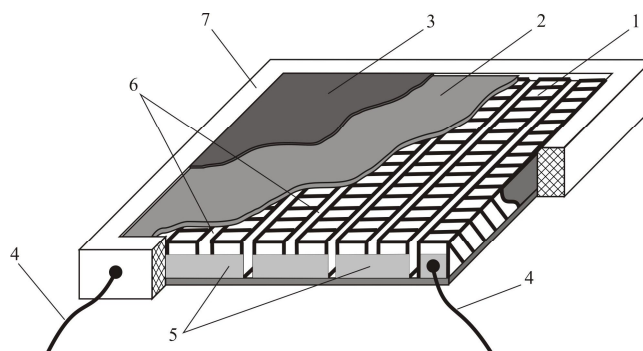


Рис. 4. Приемник излучения на основе КЗТЭ: 1 — короткозамкнутый термоэлемент; 2 — приемный коллектор; 3 — черное покрытие; 4 — токовые проводники; 5 — коммутационные пластины; 6 — изоляционные прокладки; 7 — корпус

Таблица 2

Параметр	Коэффициент преобразования, В/Вт	Постоянная времени, с	Обнаружительная способность, см·Гц ^{0,5} ·Вт ⁻¹
Значение	0,5	2,5	1,2·10 ⁸

Примечание. Погрешность моделирования не превышает 5 %.

Термопарный многоэлементный приемник излучения

Принцип работы термопарных приемников излучения состоит в генерации термоЭДС вследствие возникновения термоэлектрического эффекта Зеебека на контакте двух разнородных материалов (*n*- и *p*-типов проводимости).

Разработанная компьютерная модель многоэлементного термопарного приемника излучения позволила определить его геометрию и послужила основой для создания экспериментального образца такого приемника (рис. 5).

Термобатарея приемника состоит из плотно упакованных ветвей *n*- и *p*-типа с малым поперечным сечением, изоляционной прослойки из полиамидной пленки и клеявого соединения на основе эпоксидных компаундов. При этом коэффициент заполнения (соотношение площади ветвей к общей площади приемника) составляет 0,8—0,85.

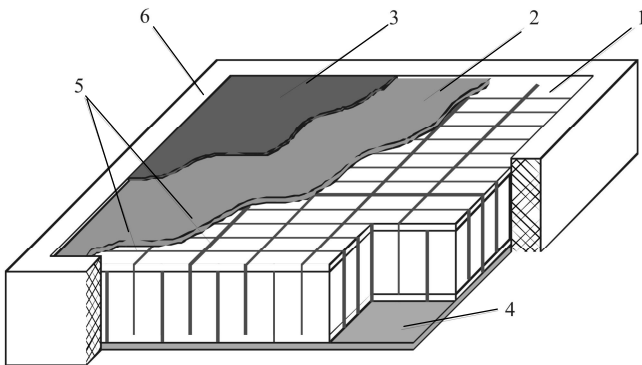


Рис. 5. Термопарный многоэлементный приемник излучения:

1 — термобатарея; 2 — приемный коллектор; 3 — черное покрытие; 4 — керамическая подложка; 5 — изоляционные промежутки; 6 — корпус

В качестве приемного коллектора выбрана алюминиевая фольга, обладающая высокой теплопроводностью. Со стороны горячих спаев химическим способом нанесен оксидный слой, служащий электроизолятором. Внешняя сторона коллектора покрыта черной оптической краской толщиной 5 мкм, повышающей коэффициент поглощения.

Важной задачей было устранение составляющей погрешности, обусловленной зависимостью коэффициента преобразования от места локализации пучка излучения на приемном коллекторе (зонная неоднородность чувствительности). Для этого был проведен ряд исследований по изучению зонной неоднородности при различных толщинах приемного коллектора и составах клеявых соединений. Оптимальная толщина приемного коллектора оказалась равной 0,05 мм. При дальнейшем увеличении толщины приемного коллектора происходит незначительное уменьшение зонной неоднородности, что, однако, ведет к снижению коэффициента преобразования и значительному увеличению постоянной времени. Результаты таких измерений приведены в табл. 3.

Ниже приведены основные характеристики термопарного многоэлементного приемника (рис. 6):

Диапазон измеряемых мощностей, Вт..	10 ⁻⁵ —10 ⁻³
Спектральный диапазон, мкм	0,4—11
Коэффициент преобразования, В/Вт.....	4,5
Постоянная времени, с, не более	3
Сопротивление термобатареи, Ом	4000
Рабочая поверхность, мм ²	20×20
Высота, мм.....	2,5

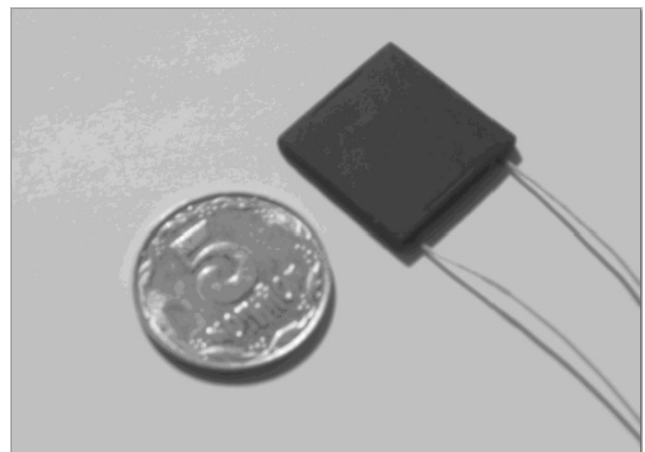


Рис. 6. Внешний вид термопарного приемника

Таблица 3

Параметры	Толщина приемного коллектора, мкм					
	без коллектора	15	20	30	50	90
Коэффициент преобразования, В/Вт	4,9	4,8	4,8	4,7	4,3	4,1
Постоянная времени, с	0,4	0,6	0,7	1,2	1,7	3
Установление стационарного режима, с	2,5	3	4	7	8	12
Зонная неоднородность, %	34	20	14	9	6	5

Следует отметить, что вольт-ваттная чувствительность такого приемника значительно превосходит чувствительность приемников на основе анизотропного и короткозамкнутого термоэлементов, но уступает им в быстродействии и характеризуется большими значениями зонной неоднородности.

Выводы

На основе расчетных и экспериментальных исследований в работе получены следующие основные результаты.

1. Разработаны компьютерные методы проектирования термоэлектрических приемников излучения на основе анизотропных, короткозамкнутых и термопарных преобразователей энергии.
2. Изготовлены экспериментальные образцы таких приемников с приемными площадками в пределах 5×5 — 20×20 мм.
3. Показано, что первичные преобразователи приемников излучения на основе анизотропных и

короткозамкнутых термоэлементов характеризуются более высокими значениями быстродействия, а термопарные приемники — более высокой вольт-ваттной чувствительностью.

Литература

1. *Анатычук Л. И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1979.
2. *Анатычук Л. И., Луспе О. Я.* Микрокалориметрия. — Львов: Выща школа, 1981.
3. *Анатычук Л. И.* Термоэлектричество. Часть 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. — Киев, Черновцы: ИТЭ, 2003.
4. *Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А.* // ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1281.
5. *Tomson W.* // Math. Phys. Papers. — Cambridge. 1882. V. 1. P. 248.
6. *Прибила А. В.* // Термоэлектрика. 2006. № 1. С. 19.
7. *Анатычук Л. И., Разиньков В. В.* // Вісн. АН УРСР. 1978. № 11. С. 50.
8. *Разиньков В. В.* Дис. канд. физ.-мат. наук. — Черновцы, 1981.
9. *Кобылянский Р. Р.* // Термоэлектричество. 2008. № 4. С. 34.

Thermoelectric radiation detectors

L. I. Anatyshuk, B. N. Demchuk, R. R. Kobylansky, A. V. Pribyla, V. Yu. Shustakov
Institute of Thermoelectricity, Box 86, General Post Office, Chernivtsi, 58002, Ukraine
E-mail: ite@inst.cv.ua

The results of computer simulation and thermoelectric radiation detectors design on the basis of anisotropic, short-circuited, and thermocouple power converters are given. Detectors design is performed by means of object-oriented programming. Detector models are prepared with receiving pads ranging from 5×5 to 20×20 mm and volt/watt sensitivity up to 5 V/W. Examples of their application are illustrated in laser emission measuring devices.

PACS: 41.20.Cv

Keywords: thermocouple element, anisotropic thermoelement, short-circuit thermoelement, radiation detector, computer simulation, speed of response, volt/watt sensitivity, time constant.

Bibliography — 9 references.

Received February 24, 2011