

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в декабре 1993 г.,
издается 6 раз в год

№ 5

2018

Редакционная коллегия

Главный редактор Л.И. АНАТЫЧУК

П. И. Баранский

Б. И. Стаднык

Л. Н. Вихор

О. Я. Лусте

В. В. Лысько

Е. И. Рогачева

С. В. Мельничук

А. А. Снарский

Международный редакционный совет

Л. И. Анатычук, *Украина*

А. И. Касиян, *Молдова*

С. П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзикава, *Япония*

Ж. К. Теденак, *Франция*

Т. Тритт, *США*

Х. Дж. Голдсמיד, *Австралия*

С. О. Филин, *Польша*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю. Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грин, *Германия*

Основатели – Национальная академия наук Украины,
Институт термоэлектричества Национальной академии наук
и Министерства образования и науки Украины

Свидетельство о государственной регистрации – серия КВ № 15496-4068 ПР

Редакторы:

В. М. Крамар, П. В. Горский, О. Я. Лусте, Т. Г. Подбегалина

Одобрено к печати Ученым советом Института термоэлектричества
Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины

Адрес редакции:

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

Тел.: +(380-372) 90 31 65.

Факс: +(380-3722) 4 19 17.

E-mail: jt@inst.cv.ua

<http://www.jt.inst.cv.ua>

Подписано к печати: 26.11.18 Формат 70×108/16. Бумага офсетная № 1.

Печать офсетная. Ус. печ. л. 11.5. Уч.-изд. л. 9.2. Тираж 400 экз. Заказ 4.

Отпечатано с оригинал-макета, изготовленного редакцией журнала «Термоэлектричество»,
в типографии издательства “Букрек”

Украина, 58000, г. Черновцы, ул. Радищева, 10.

©Институт термоэлектричества Национальной академии
наук и Министерства образования и науки Украины, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Технологии

Дзундза Б.С. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс для измерения термоэлектрических параметров полупроводниковых материалов	5
---	---

Конструирование

Анатычук Л.И., Прибила А.В. Термоэлектрические генераторы с пламенными источниками тепла переменной мощности, двухкаскадными термобатареями и аккумуляторами электрической энергии	14
Ницович О. В. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации Bi_2Te_3 при наличии электрического тока	21
Горский П.В., Разиньков В.В. Влияние геометрии контейнера на ориентацию и степень параллельности плоскостей спайности монокристаллов теллурида висмута.	31
Закордонец В.С., Кутузова Н.В. Расчет термоэлектрической системы охлаждения светодиодов	41

Надежность

Максимук Н.В. Об экономических аспектах использования предпускового отопителя с термоэлектрическим источником электричества	50
---	----

Термоэлектрические изделия

Анатычук Л.И., Пасечникова Н.В., Науменко В.О., Задорожный О.С., Денисенко О.И., Кобылянский Р.Р. Термоэлектрический прибор для определения теплового потока с поверхности глаз	57
Микитюк П. Д., Микитюк О. Ю. К вопросу о выборе материала термопары для термопреобразователей метрологического назначения	73
Запаров С.Ф., Захарчук Т. В. Устройство для получения образцов термоэлектрического материала прямоугольной формы	81

УДК 53.082



Дзундза Б.С.

Дзундза Б.С., канд. физ.-мат. наук

Прикарпатский национальный университет
имени Василия Стефаника,
ул. Шевченко, 57, Ивано-Франковск, 76018, Украина,
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО- АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описана методика измерения коэффициента Зеебека, холловской концентрации носителей, удельной электропроводности полупроводниковых пленочных термоэлектрических материалов. Представлена электрическая схема и разработана компьютерная программа, которая обеспечивает автоматизацию измерений, регистрацию и первичную обработку данных, с возможностью построения графиков временных зависимостей для предварительного анализа экспериментальных данных уже в процессе измерения. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: термоэлектричество, холловские измерения, автоматизация, микроконтроллер, тонкие пленки.

Введение

Проблема автоматизации измерений коэффициента Зеебека, холловской концентрации носителей заряда, удельной электропроводности и их зависимостей от температуры и магнитного поля для полупроводниковых термоэлектрических материалов, в частности соединений типа $A^IV B^VI$, актуальна благодаря перспективе использования этих материалов для создания термоэлектрических преобразователей энергии [1]. Такие измерения требуют точной стабилизации температур, величины магнитного поля, тока через образец, прецизионной и дорогой электрометрической техники, а исследование термоэлектрических параметров таких образцов является достаточно трудоемким.

В последние десятилетия быстрое развитие микропроцессорной и компьютерной техники открывает новые возможности автоматизации сложных технологических процессов и лабораторных исследований. Специализированные микросхемы и микроконтроллеры с большой емкостью памяти, широко развитой периферией и небольшой ценой в соединении с простотой освоения являются оптимальными для их использования в автоматизированных измерительных комплексах.

В данной работе представлена электрическая схема и разработана компьютерная программа, которая обеспечивает автоматизацию измерений коэффициента Зеебека, удельной электропроводности и холловской концентрации носителей заряда в зависимости от температуры и магнитных полей для пленочных термоэлектрических материалов, а также регистрацию, визуализацию и первичную обработку полученных данных.

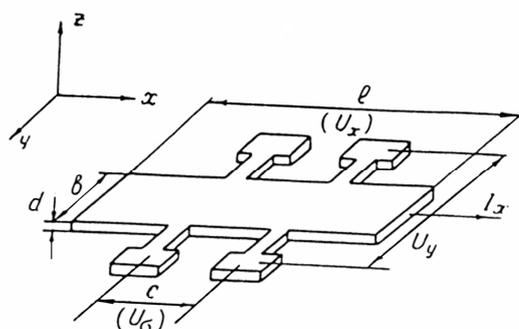
Методика измерения

Измерение коэффициента Зеебека, удельной электропроводности и холловской концентрации проводили в постоянных магнитных полях величиной до 2 Тл. При измерении пленочные образцы располагались в держателе типовой конструкции [2] с шестью измерительными зондами (два токовых и четыре холловских). Изготовление надежных омических контактов, которые не разрушают пленку и удовлетворяют всем необходимым требованиям [2, 3], проводилось методами осаждения серебра в соединении с позолоченными прижимными подпружиненными контактами или пайки при $T < 400$ К. Выбор основного контактного материала определялся его работой выхода, температурными и механическими свойствами. Для припаивания использовались индий и его сплавы с оловом, свинцом, серебром и сурьмой, а как соединительные элементы – серебряный и медный провод диаметром (0.01 - 0.05) мм. Для обеспечения омичности контактов и улучшения адгезии в местах пайки химически осаждалось золото (для пленок р-типа проводимости) или медь (для пленок n-типа). Контроль свойств изготовленных контактов проводился путем анализа ВАХ образцов [2].

Токовые контакты выполнены в виде двух массивных медных пластин, их конструкция обеспечивала создание в образце стабильного градиента температуры величиной (0.3 - 1.2) К/мм. Интервал температур в рабочей зоне был (77 - 500) К. Точность измерения температур составляла 0.1-0.2 К, а магнитных полей ± 3 %. Криостаты для создания низких температур представляли собой кварцевые сосуды Дьюара или сосуды из пенопласта, заполненные жидким азотом и размещенные в зазоре магнита. Промежуточные температуры между азотной и комнатной достигались подогревом с помощью нихромовой спирали, бифилярно намотанной на трубчатый цилиндр, который герметически устанавливался на держатель образца, что дало возможность проводить измерения в вакууме 10^{-4} Па.



а)



б)

Рис. 1. Общий вид измерительной ячейки (а) и конфигурация образца (б) для измерения электрических параметров тонких пленок.

Результаты представляли собой среднее из измерений в двух направлениях тока и магнитного поля по обеим парам контактов образца (рис. 1). Толщину тонких пленок определяли оптическим методом с помощью микроинтерферометра МИИ-4. При этом обеспечивалась точность ~ 0.02 мкм. Тип проводимости определялся по знаку термоЭДС [2].

Схемотехника установки

Функциональная схема установки приведена на рис. 2. Данный измерительный комплекс является усовершенствованной и существенно переработанной версией ранее разработанной установки, описанной автором в [4]. Основой измерительного комплекса является цифровой мультиметр UNI-T UTM1805A, который поддерживает вывод данных на компьютер и в режиме вольтметра постоянного напряжения обеспечивает разрешающую способность 1 мкВ при точности 0.015% и имеет режим автоматического выбора диапазона измерения.

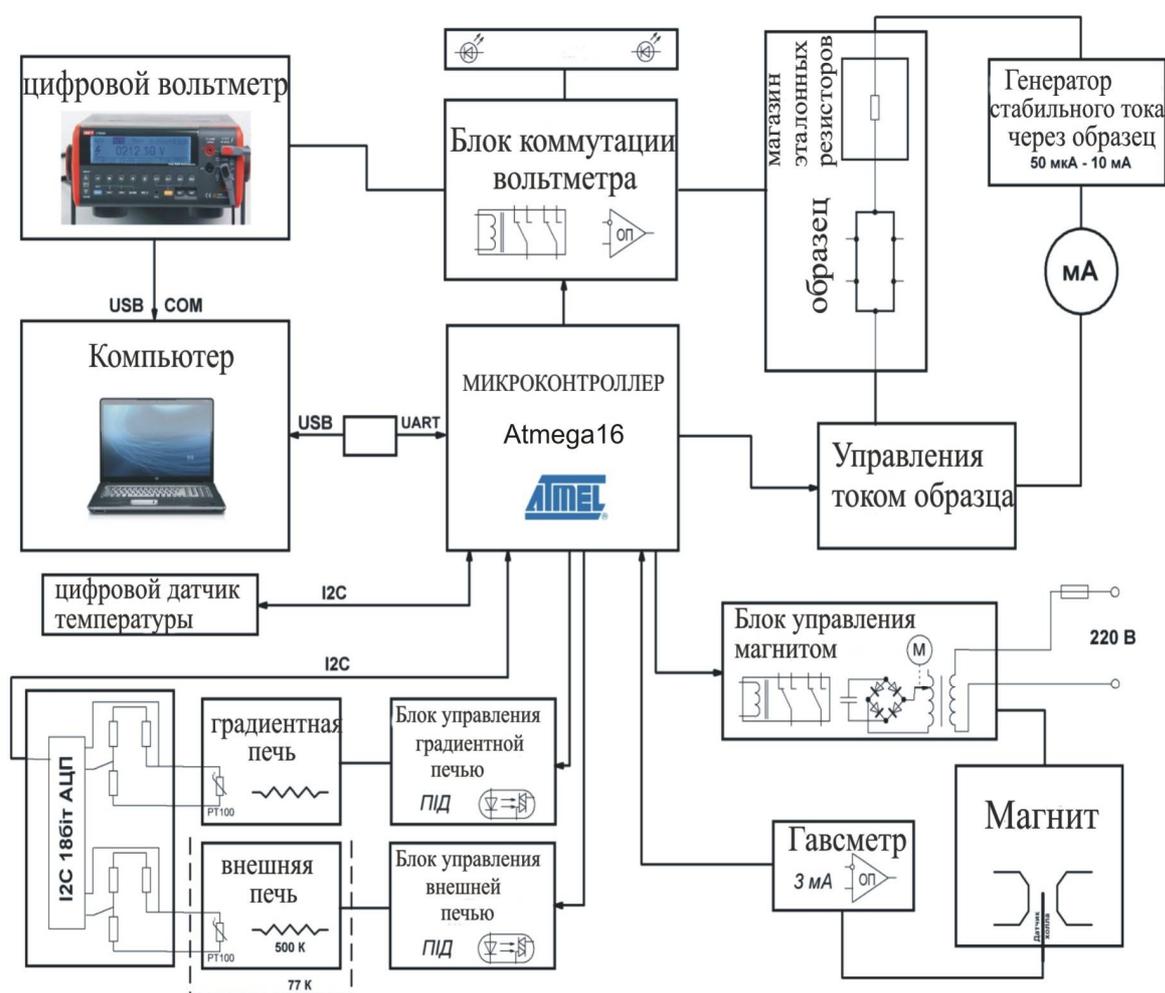


Рис. 2. Функциональная блок-схема установки автоматизированных измерений термоэлектрических параметров полупроводников.

В качестве управляющего устройства выбран микроконтроллер Atmega16, который характеризуется достаточным объемом памяти и обладает развитой периферией. Использование данного микроконтроллера дало возможность реализовать поставленную

задачу. Также остались ресурсы для дальнейшей модернизации и расширения функциональных возможностей. Программа для микроконтроллера написана на языке С. Связь с компьютером на аппаратном уровне обеспечивается преобразователем USB-UART, а на программном – с помощью интерпретатора текстовых команд, который обеспечивает двусторонний обмен данными между управляющей программой на компьютере и микроконтроллером установки.

Снятие падения напряжения на образце, эталонном резисторе, холловской и токовых парах контактов осуществляется последовательно с помощью шести герконовых микрореле блока коммутации. Использование герконовых микрореле обеспечивает низкое сопротивление контактов во включенном и чрезвычайно высокое (больше 1 ГОм) в выключенном состоянии, а также стабильность контактов во времени. Генератор стабильного тока через образец собран на микросхеме LM234 и имеет 12 дискретных значений тока, которые контролируются амперметром. Включение тока и изменение полярности реализовано на электромеханических реле, управляемых микроконтроллером.

Изменение полярности магнитного поля и включение магнита реализовано на электромагнитных контакторах, которые гальванически развязаны от микроконтроллера с помощью оптосимисторов. С целью минимизации электромагнитных помех на все контакторы установлены искрогасящие RC цепочки. Управление величиной магнитного поля осуществляется плавно с помощью моторизованного лабораторного автотрансформатора. Управление мотором реализовано через оптосимисторы и реле с целью гальванической развязки от управляющего микроконтроллера. Обратная связь осуществляется по напряжению через развязывающий трансформатор TR3 (рис. 4). В предыдущей версии была попытка реализовать плавное управление магнитным полем с помощью широтно-импульсной модуляции на силовых высоковольтных MOS-FET транзисторах, но в связи с большим количеством электромагнитных помех и нестабильностью работы на индуктивную нагрузку от такой реализации пришлось отказаться.

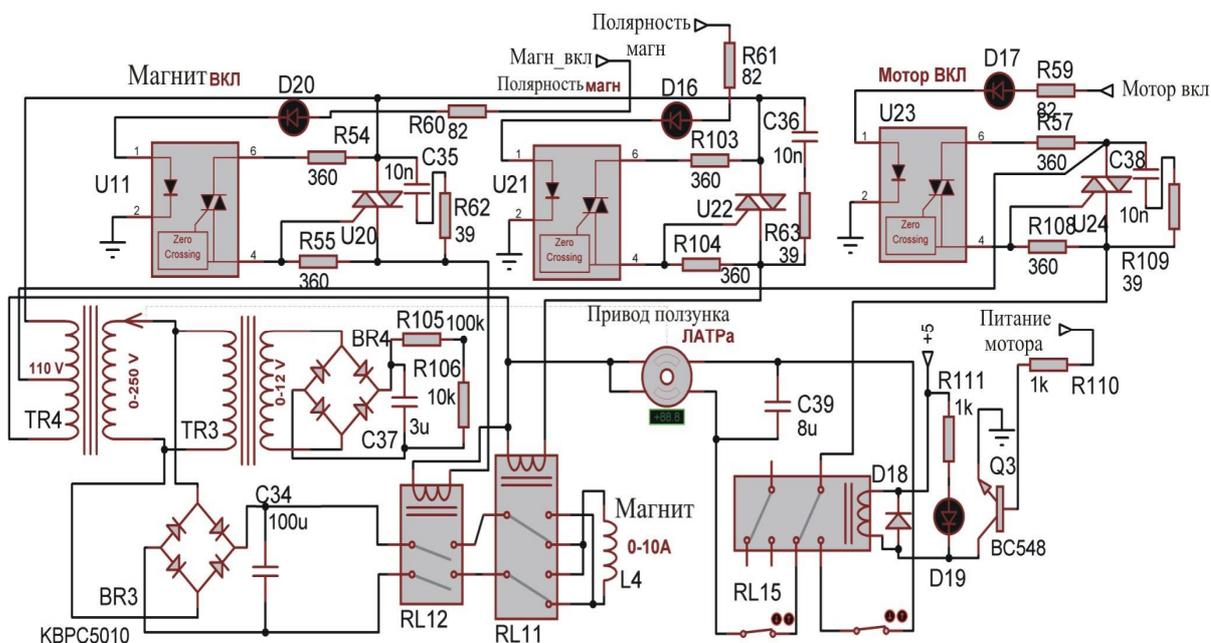


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока управления величиной магнитной индукции.

Для измерения индукции магнитного поля применен датчик Холла (ДХК-0.5А,

ПХЭ602117Б), который питается стабильным током 3 мА и размещается на выносном щупе в рабочей зоне магнита (рис. 3). Сигнал от датчика нормируется операционным усилителем и считывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) микроконтроллера. Калибровка и поверка проводилась с помощью высокоточного гавсметра Ш1-8 в диапазоне (0.05 - 2.0) Гл с занесением калибровочной таблицы в память микроконтроллера.

Температура измеряется платиновыми терморезисторами РТ100, включенными в мостовую схему (рис. 4), которая питается от прецизионного источника опорного напряжения AD1583. В качестве резисторов в плечах моста использованы 0.1% SMD резисторы с малым ТКС. Напряжение разбаланса моста измеряется дискретным I2C сигма-дельта АЦП MCP3424, размещенным вместе с мостовыми схемами и источником опорного напряжения на отдельной плате в разъемной измерительной ячейке. Управление нагревателями обеспечивается симисторным регулятором, с коммутацией при переходе напряжения через нуль и опторазвязкой. Стабилизация температур осуществляется с помощью пропорционально интегрально дифференциального (ПИД) алгоритма с равномерным распределением периодов согласно алгоритму Брезенхема.

Общий вид установки показан на рис. 5. С целью минимизации электромагнитных помех функциональные блоки собраны на отдельных печатных платах, которые размещаются в закрытых алюминиевых ячейках заземленного корпуса и соединяются между собой экранированным проводом, а силовая часть (блок управления магнитом и нагревателями) вынесена в отдельный корпус (рис. 5).

Программная реализация процесса измерения

Компьютерная программа обеспечивает автоматизированное управление процессом измерения, регистрацию данных с цифрового вольтметра, предварительную обработку и визуализацию данных. Программа написана в среде Delphi. Данные с вольтметра принимаются и декодируются программой и отображаются на экране, а также рассчитывается и отображается среднее значение по десяти последним полученным измерениям. Поддерживаются вольтметры UNI-T как с новым протоколом передачи данных (UTM1805A), так и предыдущие версии (UT804).

Между контроллером и компьютером реализован двусторонний обмен информацией через UART (скорость 9600 бит/с, 8 бит), управление установкой и запрос данных осуществляется путем отправления команд и получения ответа после их выполнения. Реализована проверка правильности команды и повторная отправка в случае ошибки. Так как некоторые команды выполняются периодически по таймеру, во избежание сбоев отслеживается статус ожидания результата выполнения текущей команды.

В ручном режиме программа позволяет управлять отдельными функциональными блоками независимо, что дает возможность производить наладку и выполнять нестандартный эксперимент с автоматической или ручной записью результатов.

В автоматизированном режиме программа позволяет проводить как одиночные измерения электрических параметров с автоматическими расчетами коэффициента Зеебека, удельной проводимости, концентрации и подвижности носителей, и др., так и серии измерений от времени, температуры или магнитного поля с построением температурно-временной диаграммы запланированных измерений (рис. 6). В процессе измерений возможна визуализация выбранных параметров в виде графических зависимостей.

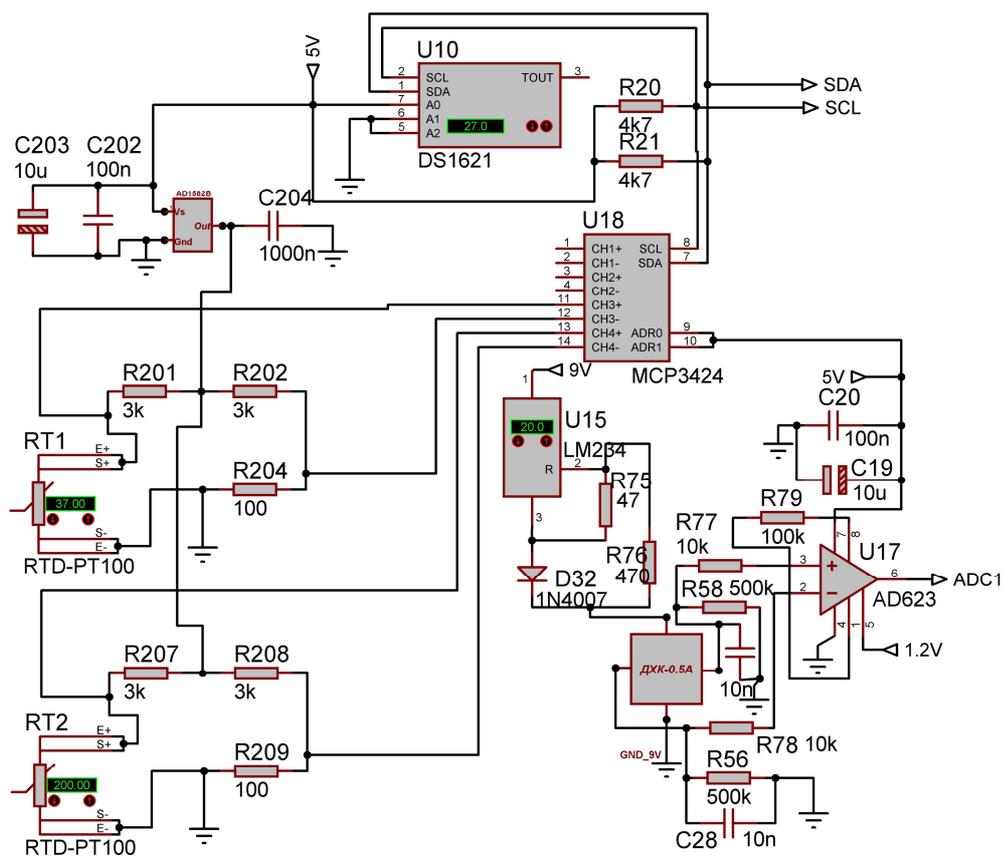


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема блока измерения температуры и магнитной индукции.



Рис. 5. Общий вид установки автоматизированных измерений термоэлектрических параметров полупроводников.

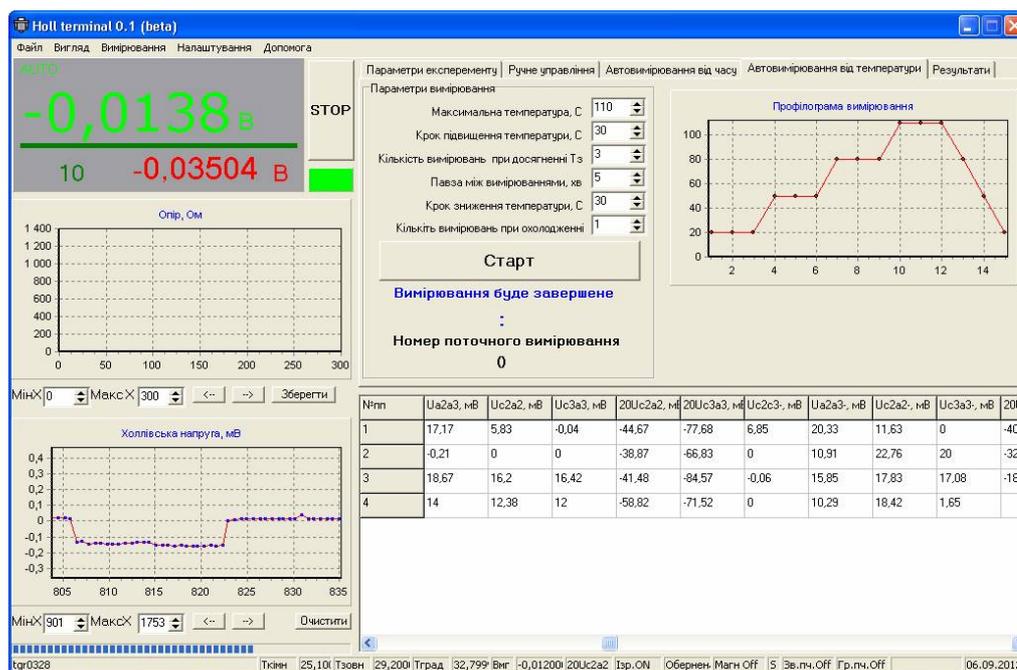


Рис. 6. Общий вид окна управляющей программы в процессе автоматизированных измерений термоэлектрических параметров пленок.

Для серии образцов различных толщин реализуется возможность автоматической фильтрации данных и построения профилей термоэлектрических параметров. Результаты измерения каждого образца хранятся в отдельном MS Excel совместимом файле с возможностью дальнейшего продолжения эксперимента.

Для оценки погрешностей проводили измерения образцов разного типа проводимости с известными параметрами. Максимальная погрешность определения σ не превышала 3 %, R_H – 5 %, а величины α – 10 %. Результаты исследований термоэлектрических полупроводниковых пленок, полученные на данном измерительном комплексе, представлены в работах [4-6]. При продолжительной регулярной эксплуатации установка показала высокую надежность и стабильность результатов.

Выводы

1. Разработана электрическая схема и сконструирована действующая установка измерения коэффициента Зеебека, холловской концентрации носителей заряда и удельной электропроводности полупроводниковых пленочных термоэлектрических материалов.
2. Создана компьютерная программа, обеспечивающая автоматизацию измерений, регистрацию и первичную обработку данных с возможностью их визуализации в виде графических зависимостей.

Литература

1. Шперун В.М., Фрейк Д.М., Запыхляк Р.И. Термоэлектричество теллурида свинца и его аналогов. Ивано-Франковск, Плай, 2000, 250 с.
2. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. Москва, Советское радио, 1974, 328 с.

3. Ковтонюк Н.Ф. Измерение параметров полупроводниковых материалов. Москва, Металлургия, 1970, 429 с.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi// Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.
5. Дзундза Б.С., Костюк О.Б., Маковишин В.И., Перегинчук М.Ю. Термоэлектрические свойства тонких пленок на основе чистого и легированного пломбум теллурида // Термоэлектричество. – 2016. – №6. – С. 55 – 61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorskyu Ya.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on Pbsnagte compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Поступила в редакцию 04.10.2018

B.S. Dzundza, *cand. phys. - math. sciences*

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,
e-mail: bohdan.dzundza@pu.if.ua

AUTOMATED HARDWARE-SOFTW ARE SYSTEM FOR MEASUREMENT OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

A method of measuring Seebeck coefficient, Hall concentration of current carriers, electrical conductivity of semiconductor films has been described. An electric circuit has been presented and a computer program, which enables automation of measurement, registration and initial processing of data with the possibility of charting time dependences for preliminary analysis of experimental data in the process of measurement, has been developed. Bibl. 6, Fig. 6.

Keywords: thermoelectricity, hall measurements, automation, microcontroller, thin films.

References

1. Shperun V.M., Freik D.M., Zapukhliak R.I. Termoelektryka telurydu svyntsiu ta yoho analohiv. Ivano-Frankivsk, Plai, 2000, 250 s.
2. Kuchys E.V. Metod yssledovanyia efekta Kholla. Moskva, Sovetskoe radyo, 1974, 328 s.
3. Kovtoniuk N.F.. Yzmerenyie parametrov poluprovodnykovykh materyalov. Moskva, Metallurhyia, 1970, 429 s.
4. Saliy Y.P., Dzundza B.S., Bylina I.S., Kostyuk O.B. The influence of the technological factors of obtaining on the surface morphology and electrical properties of the PbTe films doped Bi// Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol 8, N 2, 2016, P. 02045-02051.

5. Dzundza B.S., Kostiuk O.B., Makovyshyn V.I., Perehinchuk M.Iu. Termoelektrychni vlastyvoli tonkykh plivok na osnovi chystoho i lehovanoho pliumbum telurydu // Termoelektryka. – 2016. – №6. – S. 55 – 61.
6. Ruvinskii M.A., Kostyuk O.B., Dzundza B.S., Yaremiy I.P., Mokhnatskyi M.L., Yavorsky Y.S. Kinetic phenomena and thermoelectric properties of polycrystalline thin films based on PbSnAgTe compounds // Journal of Nano - and Electronic Physics, Vol. 9, N 5, 2017, P. 05004-1 – 05004-6.

Submitted 04.10.2018

УДК 536.24



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И., *акад. НАН Украины*^{1,2}
Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина



Прибыла А.В.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ, ДВУХКАСКАДНЫМИ ТЕРМОБАТАРЕЯМИ И АККУМУЛЯТОРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*В работе выполнены расчеты динамической мощности двухкаскадного термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приводятся результаты расчетов такого генератора с каскадами, изготовленными из материалов на основе систем *Bi-Te* и *Si-Ge*. Библ. 6, рис. 2.*

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель.

Введение

Общая характеристика проблемы. Одним из факторов, ограничивающих широкое практическое применение термоэлектрических генераторов (ТЭГ), является низкая эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую, обусловленная использованием в конструкции ТЭГ однокаскадных модулей с низким значением безразмерной добротности термоэлектрических материалов $ZT = 1.0 - 1.6$ [1 – 3]. Один из способов повышения КПД термоэлектрического преобразования состоит в расширении диапазона рабочих температур модуля путем каскадирования [4]. Для создания генераторных модулей, оптимизированных на уровень рабочих температур 30 - 600 °С рационально использовать двухкаскадную схему с термоэлементами на основе *Bi-Te* *n*- и *p*- типов проводимости в низкотемпературном каскаде (до 300 °С) и, соответственно, термоэлементами на основе *Si-Ge*, обеспечивающими высокую эффективность в высокотемпературном каскаде (300 - 600 °С).

В Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины разработаны специализированные термоэлектрические модули из таких материалов для каждого из каскадов ТЭГ. Однако до сих пор не проведены расчеты параметров ТЭГ, использующего схему с термоэлементами на основе *Bi-Te* в низкотемпературном каскаде и *Si-Ge* – в высокотемпературном, в режиме, приближенном к его реальной эксплуатации. Важным остается также вопрос правильного согласования каскадов ТЭГ.

Итак, целью данной работы являются расчеты динамических рабочих характеристик двухкаскадного термоэлектрического генератора с источниками тепла переменной мощности в диапазоне температур 30-600 °С.

Физическая модель

В расчетах использована физическая модель блока термоэлектрического генератора (рис. 1). Она включает нагретую поверхность источника тепла переменной мощности 1, теплообменники 2 для подвода теплового потока к модулю 3 высокотемпературного каскада ТЭГ, изготовленного из термоэлектрического материала на основе *Si-Ge* [5], и теплообменники 7 для отвода теплового потока от двух модулей 5 низкотемпературного каскада ТЭГ, изготовленных из стандартного термоэлектрического материала на основе *Bi-Te* [5], тепловыравнивающую пластину 4, тепловую изоляцию 6, стабилизатор электрического напряжения 8 и аккумулятор электрической энергии 9.

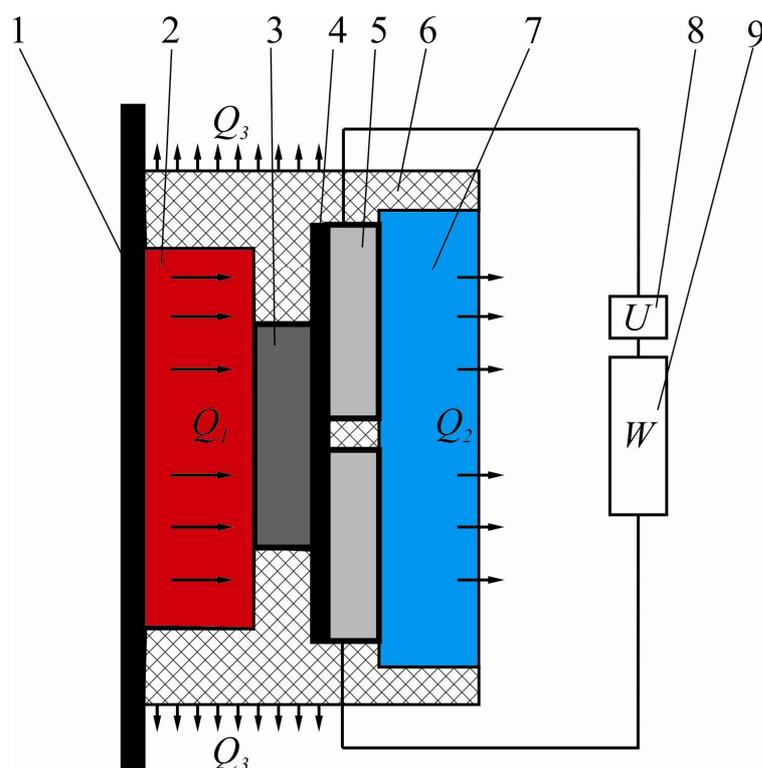


Рис. 1. Физическая модель блока термоэлектрического генератора:

1 – нагретая поверхность; 2 – горячий теплообменник; 3 – модуль высокотемпературного каскада ТЭГ; 4 – тепловыравнивающая пластина; 5 – модули низкотемпературного каскада ТЭГ; 6 – тепловая изоляция; 7 – холодный теплообменник; 8 – стабилизатор напряжения; 9 – аккумулятор электрической энергии.

Поскольку генератор установлен на нагретую поверхность, в модели не рассматриваются процессы теплопереноса от реального источника горения топлива к этой поверхности. Вместо этого, для определения температуры нагретой поверхности 1, используются экспериментальные зависимости ее температуры от времени при реальном цикле использования источника тепла на твердом топливе [2].

Математическое и компьютерное описание модели

Таким образом, для расчетов термоэлектрического генератора в соответствии с физической моделью, приведенной на рис. 1, использовано уравнение баланса теплот.

На горячей стороне размещен источник тепла переменной мощности $Q_1 [T_1(t)]$. Его тепловая мощность зависит от температуры этой поверхности T_1 , которая, в свою очередь, изменяется со временем t [3] и представляется в виде некоторой функции $f[T_1(t)]$.

$$Q_1 = f [T_1(t)]. \quad (1)$$

Подвод тепла от нагретой поверхности к горячей стороне термоэлектрического модуля и отвод тепла к холодному теплообменнику описываются уравнениями:

$$Q_1 = \chi_1 [T_1(t) - T_G], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2 [T_X - T_2], \quad (3)$$

где χ_1, χ_2 – тепловые сопротивления горячего и холодного теплообменников; T_G, T_X – температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля, соответственно; T_2 – температура внешней поверхности холодного теплообменника.

Тепловая мощность Q_2 отводится от холодного теплообменника путем принудительной конвекции воздуха в окружающую среду:

$$Q_2 = \alpha (T_2 - T_0) S_m, \quad (4)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью теплообменника и окружающей средой; S_m – площадь поверхности теплообмена; T_0 – температура окружающей среды.

Электрическая мощность, которая генерируется термоэлектрическим модулем, пропорциональна $Q_1 [T_1(t)]$ и его КПД η :

$$W = Q_1 [T_1(t)] \cdot \eta. \quad (5)$$

Основные потери тепла Q_3 происходят через тепловую изоляцию:

$$Q_3 = \chi_4 (T_M - T_0), \quad (6)$$

где χ_4 – тепловое сопротивление изоляции, T_M – температура внутренней поверхности тепловой изоляции.

Таким образом, уравнение теплового баланса для избранной модели термоэлектрического генератора можно записать в виде:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для компьютерного представления математической модели ТЭГ использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [6]. Для его использования необходимо представить наши уравнения в следующем виде.

Для описания потоков тепла и электричества воспользуемся законами сохранения энергии

$$\operatorname{div}\vec{E} = 0 \quad (8)$$

и электрического заряда

$$\operatorname{div}\vec{j} = 0, \quad (9)$$

где

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa\nabla T + \alpha T\vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma\nabla U - \sigma\alpha\nabla T. \quad (12)$$

Здесь \vec{E} – плотность потока энергии; \vec{q} – плотность теплового потока; \vec{j} – плотность электрического тока; U – электрический потенциал; T – температура; α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности.

Учитывая (10) – (12), можно получить

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T - (\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U. \quad (13)$$

Тогда законы сохранения (8), (9) приобретают вид:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T] - \nabla[(\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (15)$$

Из решения уравнения (14) - (15) мы получим распределения физических полей, а также интегральные значения эффективности и мощности ТЭГ.

Описание динамических мощностей ТЭГ

Для определения реальных температурных условий на нагретых поверхностях печей с пламенными источниками тепла на твердом топливе (дровах) проведены экспериментальные исследования и определены зависимости температур нагретых поверхностей печи от времени, на протяжении которого с равными интервалами происходило добавление одинакового количества дров [2].

Полученные данные после обработки с использованием регрессионного анализа представлены в виде функциональных зависимостей температур нагретых поверхностей печи от времени и использованы при расчетах характеристик термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла сменной мощности на твердом топливе.

Таким образом, с использованием компьютерных методов проведены расчеты динамических мощностей ТЭГ при условии его установки на поверхности печи (рис. 2).

На рис. 2 приведена зависимость мощности ТЭГ, размещенного на задней поверхности печи, от времени для температуры холодной стороны ТЭГ $T_x = 30$ °С (кривая 1 на рис. 2).

Температура горячей стороны ТЭГ описывается кривой 2 на рис. 2.

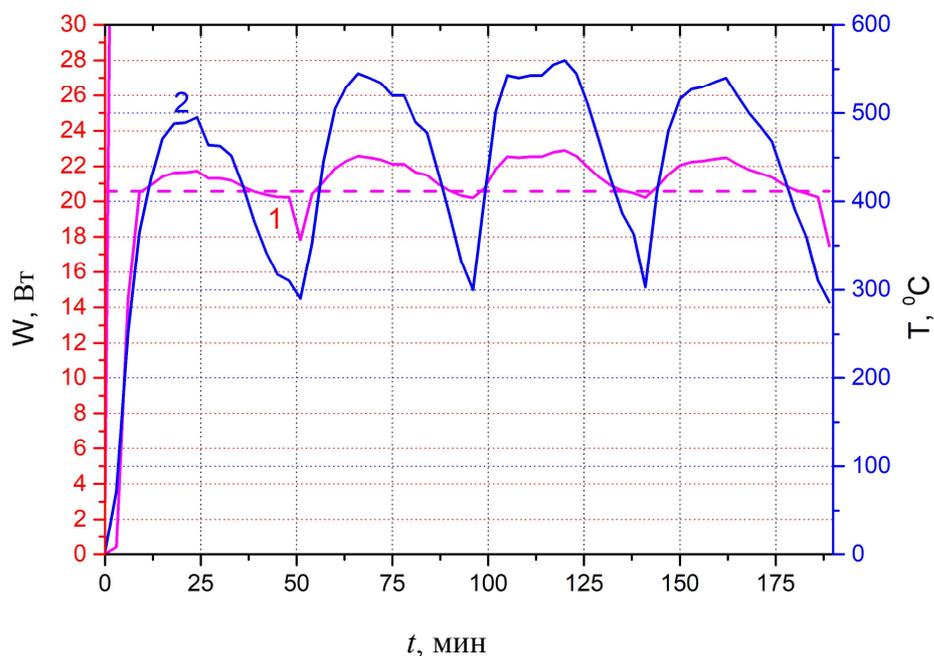


Рис. 2. Зависимость мощности ТЭГ размещенного на задней поверхности печи, от времени: 1 – мощность ТЭГ при $T_{\text{х}}=30^{\circ}$, 2 – температура поверхности печи.

Как видно из рис. 2, характер зависимости динамической мощности от времени хотя и соответствует временной зависимости температуры поверхности печи, эта зависимость от температуры является не столь резкой, как в однокаскадном варианте ТЭГ [3]. Для температуры холодной стороны $T_{\text{х}}=30^{\circ}\text{C}$ усредненное значение мощности ТЭГ, который состоит из одного термоэлектрического модуля на высокотемпературном каскаде (из *Si-Ge*) и двух на низкотемпературном (из *Bi-Te*), за выбранный отрезок времени составляет 20.56 Вт. При этом энергия, генерируемая ТЭГ в течение 1 ч, составляет ~ 70 кДж.

Итак, исследуемый вариант двухкаскадного ТЭГ из специализированных материалов на основе систем *Bi-Te* и *Si-Ge* позволяет повысить его удельную мощность на $\sim 12.5\%$ по сравнению с однокаскадным вариантом [2].

Выводы

1. На основе экспериментальных данных рассчитана динамическая мощность двухкаскадного ТЭГ с пламенными источниками тепла на твердом топливе, в котором используются термоэлементы на основе системы *Bi-Te* в низкотемпературном каскаде и системы *Si-Ge* – в высокотемпературном.
2. Усредненное значение мощности ТЭГ, состоящего из одного термоэлектрического модуля в высокотемпературном каскаде (из *Si-Ge*) и двух в низкотемпературном (из *Bi-Te*), в исследованном временном отрезке составляет 20.56 Вт (при температуре его холодной стороны $T_{\text{х}}=30^{\circ}\text{C}$). При этом энергия, генерируемая ТЭГ в течение 1 ч, составляет ~ 70 кДж.
3. Установлено, что исследуемый вариант двухкаскадного ТЭГ из специализированных материалов на основе систем *Bi-Te* и *Si-Ge* позволяет повысить его удельную мощность на \sim

12.5 % по сравнению с однокаскадным вариантом.

Литература

1. Анатычук Л.И., Мочернюк Р.М., Гаврилюк Н.В., Андрусак И.С. Термоэлектрический генератор, который использует тепло нагретых поверхностей // Термоэлектричество. – 2017. – №2. – С. 84 – 95.
2. Анатычук Л.И., Розвер Ю.Ю., Прибыла А.В., Максимук Н.В. Термоэлектрические генераторы с пламенными источниками тепла переменной мощности и стабилизаторами температуры термобатарей // Термоэлектричество.– 2018. – №2. – С. 22–29.
3. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Термоэлектрические генераторы с пламенными источниками тепла переменной мощности, однокаскадными термобатареями и аккумуляторами электрической энергии // Термоэлектричество. – 2018. – №3. – С. 46–54.
4. Михайловский В.Я. Термоэлектрические каскадные модули из материалов на основе Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS. / Михайловский В.Я., Билинский-Слотило В.Р. // Термоэлектричество. – 2012. – №4. – С. 67-74.
5. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
6. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 22.10.2018.

Anatychuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2}
Prybyla A.V., *cand. Phys.- math. Sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
e-mail: anatych@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC GENERATORS WITH FLAME HEAT SOURCES, OF VARIABLE POWER TWO-STAGE THERMOPILES AND ELECTRIC ENERGY BATTERIES

This paper presents calculations of the dynamic power of a two-stage thermoelectric generator with flame heat sources of variable power. The results of calculations of such a generator with its stages made of materials based on Bi-Te and Si-Ge are given. Bibl. 6, Fig. 2.

Key words: *thermoelectric generator, computer design, physical model.*

References

1. Anatychuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, 84 – 95.

2. Anatyчук L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V., Maksimuk M.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power and temperature stabilizers for thermopiles. *J. Thermoelectricity*, 2, P. 22–29.
3. Anatyчук L.I., Prybyla A.V. (2018). Thermoelectric generators with flame heat sources of variable power, single-stage thermopiles and electric energy batteries. *J. Thermoelectricity*, 3, P. 46–54.
7. Mykhailovsky V.Ya., Bilinsky-Slotylo V.R. (2012). Thermoelectric staged modules of materials based on Bi_2Te_3 - $PbTe$ -TAGS. *J. Thermoelectricity*, 4, P. 67-74.
4. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
5. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB, 804 p.

Submitted 22.10.2018.



Ницович О. В.

О.В. Ницович, канд. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyach@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Ю.Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ Bi_2Te_3 ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В статье представлен подход к построению компьютерной модели процесса выращивания термоэлектрических материалов методом вертикальной зонной плавки с использованием эффекта Пельтье, который возникает на границе раздела твердой и жидкой фаз выращиваемого материала при пропускании через слиток электрического тока. Приведены результаты визуализации численного решения модели. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: моделирование, вертикальная зонная плавка, термоэлектрический материал, выращивание при наличии электрического тока.

Введение

Термоэлектрические преобразователи энергии – охладители и генераторы – находят широкое использование во многих отраслях современной техники. Актуальной задачей является повышение эффективности этих устройств, в частности создание для них материалов с высокой термоэлектрической добротностью Z .

Наиболее широко используются полупроводниковые твердые растворы Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 , которые имеют максимальные значения добротности в области температур 250 – 500 К.

Для получения термоэлектрического материала (ТЭМ) на основе Bi_2Te_3 с высокими значениями термоэлектрической добротности наиболее перспективными являются методы направленной кристаллизации расплава и метод вертикальной зонной плавки. Причем, получение термоэлектрических материалов с необходимыми свойствами возможно лишь в условиях контролируемого процесса кристаллизации. Поэтому актуальным является моделирование процессов выращивания ТЭМ, которые дают возможность оптимизировать выбор технологических параметров и режимов работы установки.

В работах [1 – 5] рассматривалась возможность выращивания монокристаллов термоэлектрических материалов методом вертикальной зонной плавки при наличии электрического тока, который проходит через слиток. Известно, что граница раздела твердой и жидкой фаз одного и того же материала является тем местом где скачкообразно изменяется

величина коэффициента термоЭДС, электропроводность, теплопроводность и другие свойства. На границе раздела фаз изменяется и картина заполнения энергетических уровней электронами. Это проявляется в эффекте Пельтье, который возникает на фронте кристаллизации материала при пропускании через выращиваемый кристалл электрического тока. Но количество тепла, выделяемого или поглощаемого на границе раздела между жидкой и твердой фазами, может повлиять на ход кристаллизации.

Таким образом, целью данной работы является построение компьютерной модели процесса выращивания термоэлектрических материалов методом вертикальной зонной плавки с учетом эффекта Пельтье, возникающего на границе раздела твердой и жидкой фаз выращиваемого материала при пропускании через слиток электрического тока.

Физическая модель процесса вертикальной зонной плавки

Физическая модель процесса выращивания монокристаллов на основе Bi_2Te_3 методом вертикальной зонной плавки представлена на рис. 1.

На рисунке изображен фрагмент слитка, который включает поликристаллический материал 2, расплавленную зону 6 и монокристалл 3. Слиток помещен в кварцевую ампулу 1. С помощью нагревателя 7 и системы охладителей 8, формируется расплавленная зона 6, которая, перемещаясь вместе с нагревателем вдоль образца, обеспечивает плавление поликристалла выше границы 4 и кристаллизацию расплава ниже границы 5, которую называют фронтом кристаллизации.

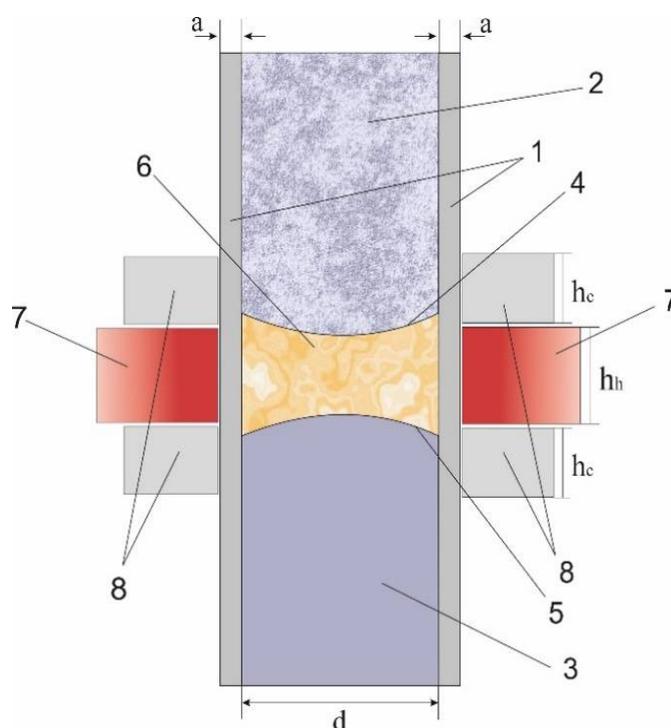


Рис. 1. Физическая модель установки выращивания ТЭМ методом вертикальной зонной плавки: 1 – кварцевая ампула, 2 – материал в твердой фазе (поликристалл), 3 – материал в твердой фазе (монокристалл), 4 – граница фронта расплава, 5 – граница фронта кристаллизации, 6 – материал в жидкой фазе (зона расплава), 7 – нагреватель, 8 – охладители.

Поскольку границы раздела твердой и жидкой фаз 4 и 5 одного и того же материала являются местом резкого изменения свойств данного материала, в частности, величины коэффициента термоЭДС α , электропроводности σ , теплопроводности k , то при прохождении через данные границы электрического тока на одной из них будет поглощаться, а на другой, соответственно, выделяться тепло Пельтье.

Математическое и компьютерное описание модели

При моделировании процесса теплопроводности в однородной среде с фазовым переходом в программной среде COMSOL Multiphysics решается классическая система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, дополненная зависимостями физических свойств исследуемого твердого тела, как функции от фазового состояния в данной точке при данной температуре:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q, \quad (1)$$

$$q = -k \nabla T, \quad (2)$$

$$q = \theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}, \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\theta \rho_{phase1} C_{p_{phase1}} + (1 - \theta) \rho_{phase2} C_{p_{phase2}} \right) + L \frac{d\alpha_m}{dT}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \rho_{phase2} - \theta \rho_{phase1}}{\theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}}, \quad (5)$$

$$k = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2}, \quad (6)$$

где ρ – плотность, $кг/м^3$; C_p – теплоемкость материала при постоянном давлении, $Дж/(кг \cdot К)$; k – теплопроводность, $Вт/(см \cdot К)$; u – скорость движения среды, $м/с$, в исследуемой задаче равная нулю; T – температура, $К$; t – время, $с$; θ – соотношение фаз при данной температуре; α_m – массовое отношение между фазами; L – скрытая теплота фазового перехода, $Дж/кг$; Q – внешний тепловой поток, $Вт$. Индексы $phase1$ и $phase2$ показывают, к какой фазе, твердой или жидкой, соответственно, относятся свойства.

Тепло Джоуля-Ленца, возникающее в материале за счет прохождения электрического тока, учитывается в правой части уравнения (1) слагаемым $Q_e = jE$.

Для учета термоэлектрических эффектов, в частности эффекта Пельтье, который возникает на границах раздела фаз, формулу (2) записываем следующим образом:

$$q = -k \nabla T + Pj, \quad (7)$$

здесь

$$j = \sigma E + j_e, \quad (8)$$

$$j_e = -\sigma \alpha \nabla T, \quad (9)$$

$$P = \alpha T,$$

$$E = -\nabla U,$$

где U – электрический потенциал, В; α – коэффициент термоЭДС, мкВ/К; σ – электропроводность, См/см.

Для моделирования влияния электрического поля на процесс выращивания, на верхней и нижней границах слитка задаются следующие предельные условия:

$$U|_{z=0} = U_0, \quad U|_{z=l} = 0.$$

На всех внешних стенках нагревателя и охладителей задавалось условие теплоизоляции:

$$-n \cdot (-\kappa \nabla T) = 0. \quad (10)$$

На внешней стенке кварцевой ампулы (на участках, которые не контактируют с нагревателем и охладителями) задается предельное условие теплового потока, в виде функции:

$$-n \cdot (-\kappa \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T), \quad (11)$$

где T_{ext} – температура окружающей среды, К; T – температура внутренней стенки ампулы, К; n – вектор, направленный по нормали к поверхности цилиндра (ампулы); h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), который выражается формулой [6]:

$$h = \begin{cases} \frac{k}{l} \left(0,68 + \frac{0,67 Ra_l^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_l \leq 10^9 \\ \frac{k}{l} \left(0,825 + \frac{0,38 Ra_l^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,462k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right), & \text{если } Ra_l > 10^9 \end{cases}$$

Здесь Ra_l – число Релея, которое определяется следующим выражением:

$$Ra_l = \frac{g \alpha_p \rho^z C_p (T - T_{exp}) l^3}{\mu \kappa},$$

где g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; α_p – температурный коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; l – длина слоя воздуха, m ; μ – его динамическая вязкость, $Pa \cdot s$.

Результаты компьютерного моделирования

Как пример использования разработанной программы, рассматривался процесс выращивания синтезированного материала Bi_2Te_3 в кварцевой ампуле, толщина стенок которой 3 мм, длина слитка 250 мм, диаметр $d = 24$ мм. Температура нагревателя изменялась в пределах $680 - 950^\circ C$, высота от 24 до 96 мм. Для моделирования влияния электрического тока на процесс выращивания, на концах слитка создавалась разница потенциалов от 0 до 4 В. На рис. 2 представлен вид смоделированной системы.

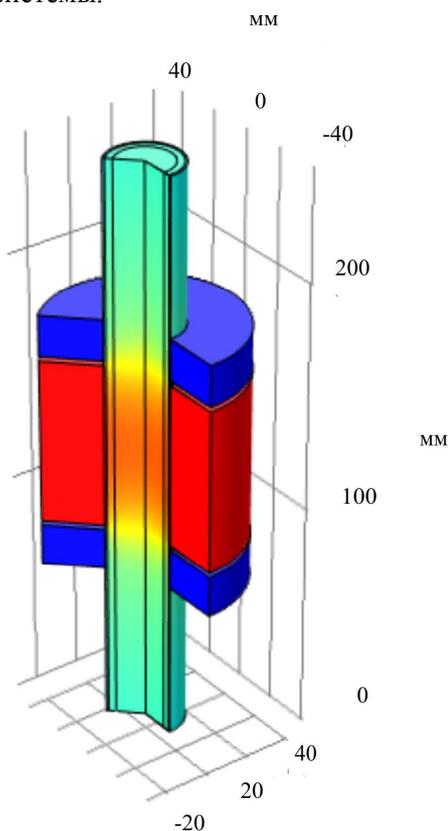
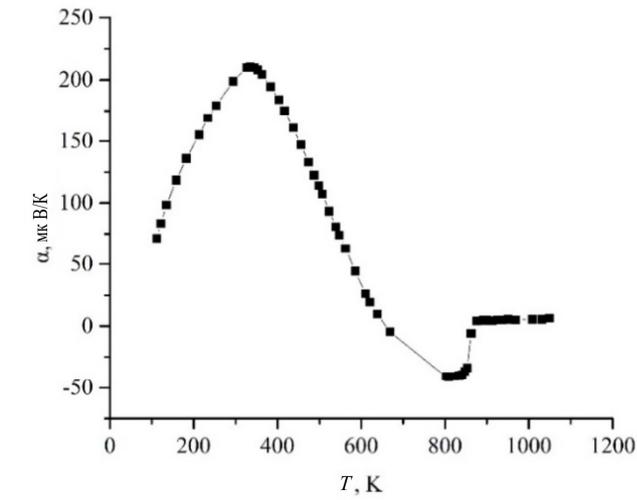


Рис. 2. Компьютерная модель установки выращивания ТЭМ методом вертикальной зонной плавки.

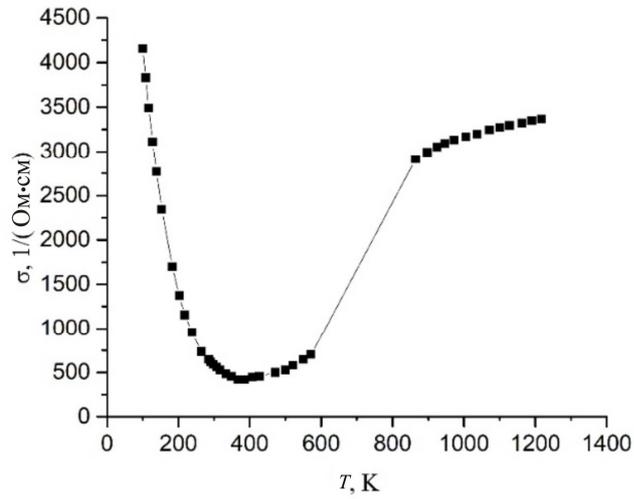
Температурные зависимости коэффициентов термоЭДС $\alpha(T)$, электропроводности $\sigma(T)$ и теплопроводности $k(T)$ для Bi_2Te_3 показаны на рисунках 3. Приведенные зависимости были построены согласно данным, полученным из литературных источников [2, 7].

За счет изменения свойств исследуемого материала, в частности, величины и знака коэффициента термоЭДС α , электропроводности σ и теплопроводности k , при пропускании через выращиваемый кристалл электрического тока на границах раздела фаз действительно возникает эффект Пельтье.

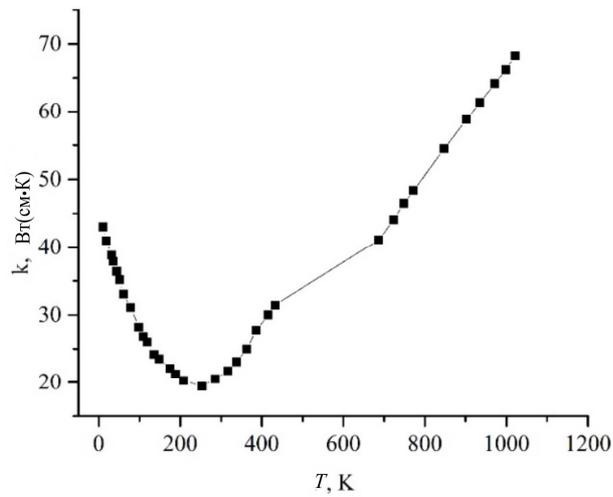
Результаты моделирования показали, что тепло Пельтье поглощается при прохождении тока из твердой фазы в жидкую, и, наоборот, выделяется при прохождении тока из жидкой фазы в твердую.



a)



б)



в)

Рис. 3. Зависимость коэффициентов термоЭДС α (а), электропроводности σ (б) и теплопроводности κ (в) теллурида висмута от температуры.

Кроме того, было установлено, что изменяя величину разности потенциалов между торцами выращиваемого слитка, возможно влиять на форму фронта кристаллизации (ФК), который, как известно, определяет устойчивость роста монокристалла и его однородность.

При заданной конфигурации установки, без учета электрического тока, плоский ФК достигался лишь при температурах 900 – 910 К. Как видно из рис. 4, при прохождении электрического тока через расплавленную зону форма фронта кристаллизации изменяется, что дает возможность оптимизировать процесс выращивания.

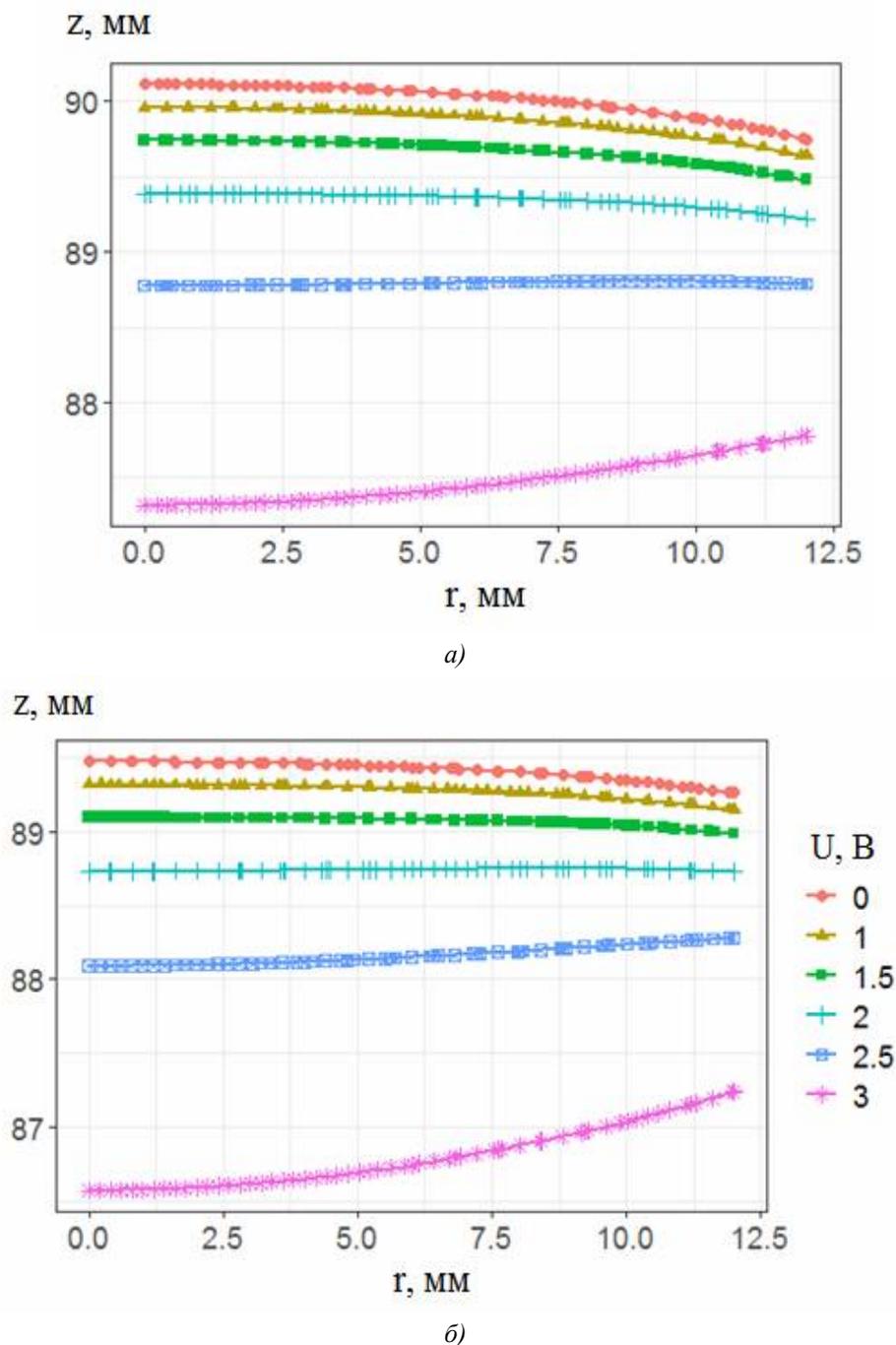


Рис. 4. Зависимость формы фронта кристаллизации от величины прилагаемой разности потенциалов при температуре нагревателя $T = 880\text{ K}$ (а) и $T = 890\text{ K}$ (б).

Авторами [8] был проведен ряд экспериментов по влиянию электрического тока на свойства материалов на основе $Bi_2(Te,Se)_3$ легированных Hg_2Cl_2 и Cd_2Br_2 , выращенных методом направленной кристаллизации. Была отмечена возможность достижения увеличения добротности выращенных материалов на 9 % за счет выращивания ТЭМ с оптимизированным распределением плотности носителей тока вдоль слитка, что достигалось программируемым изменением величины и направления тока, который протекал через фронт кристаллизации во время выращивания.

Выводы

1. Разработан компьютерный метод определения тепловых условий выращивания монокристаллов на основе Bi_2Te_3 методом направленной кристаллизации при пропускании через образец электрического тока.
2. Пример использования метода подтверждает влияние эффекта Пельтье на условия роста монокристаллов и возможность управления распределением температур в слитке во время выращивания.

Автор считает своей приятной обязанностью выразить благодарность акад. Л.И. Анатычуку за предложенную тему, постановку задачи и полезное конструктивное обсуждение полученных результатов.

Литература

1. Пфан У.Г. Зонная плавка // Под ред. В.Н.Вигдоровича. М.: Мир. – 1970. – 336 с.
2. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов // Под редакцией Б.Я. Мойжеса. М.: Наука – 1972. – 320 с.
3. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Анатычук Л.И. // – К.: Наукова думка – 1979. – 768 с.
4. Вильке К.Т. Методы выращивания кристаллов / Вильке К.Т. // Л.: Недра – 1977. – 329 с.
5. Гольцман Б.М. Кристаллизация в электрическом поле термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута / Гольцман Б.М., Лященко В.И., Стрекопытова Н.И. // Термоэлектрические источники тока: материалы, конструкция, применение. Тезисы докладов всесоюзного совещания. – Ашхабад. – 1986.
6. Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Edition / Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. // John Wiley & Sons Ltd., New York. – 2007. – 1070 p.
7. Ivanova L. D. Thermoelectric properties of Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 single crystals in the range 100–700 K / Ivanova L. D., Granatkina Yu.V. // Inorganic Materials. – 2000. – Vol. 36, Issue 7. – P. 672-677.
8. Liaschenok V.I. Influence of electric current flow during crystallization process on thermoelectric properties of materials / Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. //

Proc. of XIV International Conference of Thermoelectrics St.Petersburg, Russia, June 27-30. – 1995. – P.112-114.

Поступила в редакцию 19.09.2018

O.V.Nitsovych, cand. phys.-math. sciences^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

COMPUTER SIMULATION OF Bi_2Te_3 CRYSTALLIZATION PROCESS IN THE PRESENCE OF ELECTRICAL CURRENT

This paper presents an approach to constructing a computer model of the process of growing thermoelectric materials by the method of vertical zone melting taking into account the Peltiereffect which occurs at the interface between the solid and liquid phases of material being grown when passing electrical current through the ingot. The results of visualization of numerical model solution are presented. Bibl. 8, Fig 4.

Keywords: simulation, vertical zone melting, thermoelectric material, growing in electrical field

References

1. Pfan U.G. (1970). *Zonnaia plavka [Zone melting]*. V.N.Vigdorovich (Ed.). Moscow: Mir [in Russian].
2. Goltsman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I.A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskie materialy na osnove Bi_2Te_3 [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi_2Te_3]*. B.Ya.Moizhes (Ed.). Moscow: Nauka [in Russian].
3. Anatykhuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
4. Vilke K.T. (1977). *Metody vyrashchivaniia kristallov [Methods of crystal growth]*. Leningrad: Nedra [in Russian].
5. Goltsman B.M., Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. (1986). *Kristallizatsiia v elektricheskom pole termoelektricheskikh materialov na osnove telluride vismuta [Crysallization in the electrical field of thermoelectric materials based on bismuth telluride]*. Termoelektricheskiye istochniki toka: materialy, konstruktsiia, primeneniie. *Tezisy dokladov vsesoiuznogo soveshchaniia–Thermoelectric current sources: materials, construction, application. Abstracts of All-Union conference reports*]. Ashgabad [in Russian].

6. Incropera F.P. , DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.(2007). *Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed.* New York: John Wiley & Sons Ltd.
7. Ivanova L. D., Granatkina Yu.V. (2000). Thermoelectric properties of $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ single crystals in the range 100–700 K. *Inorganic Materials*, 36, 7.
8. Liaschenok V.I., Strekopytova N.I. (1995). Influence of electric current flow during crystallization process on thermoelectric properties of materials. *Proc. of XIV International Conference of Thermoelectrics* (St.Petersburg, Russia, June 27-30, 1995) (pp.112-114).

Submitted 19.09.2018.



Горский П.В.

Горский П. В., докт. физ.-мат. наук^{1,2}
Разиньков В. В., канд. физ.-мат. наук^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы,
58029, Украина, e-mail: anatyuch@gmail.com;
²Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина



Разиньков В.В.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНТЕЙНЕРА НА ОРИЕНТАЦИЮ И СТЕПЕНЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ПЛОСКОСТЕЙ СПАЙНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА

В статье путем решения уравнения теплопроводности для цилиндрического и щелевого контейнеров показано, что при одной и той же удельной мощности нагревателя и одной и той же температуры внешних стенок контейнера поперечный градиент температуры в расплаве тем больше, чем больше диаметр цилиндрического или ширина щелевого контейнера. Кроме того показано, что в идеализированном случае фронт кристаллизации при применении цилиндрического контейнера имеет форму параболоида вращения, а в случае применения щелевого контейнера - форму параболического цилиндра с образующими, параллельными длинной стороне поперечного сечения контейнера, которая существенно ближе к плоской. Но диаметр цилиндрического контейнера резко уменьшить нельзя, в то время как ширину щели щелевого контейнера можно уменьшить до минимальной величины, технологически приемлемой для дальнейшего разрезания полученной монокристаллической пластины в виде прямоугольного параллелепипеда на ветви. Это обстоятельство вместе с возможностью вращения печи Бриджмена вокруг вертикальной оси с оптимальной угловой скоростью с целью сглаживания поперечного градиента температуры дает возможность, при условии применения щелевых контейнеров, максимально приблизить форму фронта кристаллизации к плоской, и, следовательно, добиться максимальной параллельности плоскостей спайности монокристалла широким граням контейнера и максимальной однородности распределения легирующих примесей в полученном монокристалле. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: щелевой контейнер, цилиндрический контейнер, удельная мощность нагревателя, форма фронта кристаллизации, параболоид вращения, параболический цилиндр, максимальный градиент температуры, степень параллельности плоскостей спайности широким граням щелевого контейнера, степень однородности распределения примесей в монокристалле.

Введение

Известно, что на качество термоэлектрического материала существенным образом влияют концентрационные неоднородности, возникающие в процессе направленной кристаллизации из расплава [1]. Как отмечалось ранее, на возникновение этих

концентрационных неоднородностей существенным образом влияет соотношение между продольным градиентом температуры вблизи фронта кристаллизации и скоростью роста. В соответствии с приближенной оценкой Тиллера [2] концентрационное переохлаждение возникает, если отношение (G/v) продольного градиента температуры G к скорости роста v монокристалла в направлении этого градиента меньше некоторой критической величины

$$(G/v) < (G/v)_{cr} = \frac{mC_0(1-K_0)}{K_0D_0}. \quad (1)$$

В этой формуле m – наклон линии ликвидуса, C_0 – концентрация примесей в основной массе расплава, K_0 – коэффициент распределения примеси, D_0 – коэффициент диффузии примеси в расплаве.

Неравномерное распределение примесей и концентрации свободных носителей заряда является основным фактором влияния условий роста на свойства термоэлектрических материалов. В [1] отмечается, что при прочих равных условиях безразмерная термоэлектрическая эффективность материала тем больше, чем больше отношение (G/v) .

Считается, что существуют две группы неоднородностей, которые отличаются по протяженности и причинами их возникновения: макронеоднородности с масштабами, сравнимыми с размерами образца, и микронеоднородности с масштабами, существенно меньшими размеров образца. К макронеоднородностям относится, в частности, монотонное изменение состава материала по сечению и длине слитков, выращенных из расплава путем направленной кристаллизации. Изменение состава материала по сечению связано с неплоской (обычно вогнутой в сторону твердой фазы) формой фронта кристаллизации, искаженной выделением теплоты кристаллизации и действием поперечных тепловых потоков в слитке. Скорость роста и условия конвекции в различных участках неплоского фронта кристаллизации различаются, и это приводит к изменению эффективного коэффициента распределения и к изменению состава по сечению слитка. А на поперечный градиент температуры и возможность управления им, а, следовательно, и фронтом кристаллизации, существенно влияет геометрия поперечного сечения контейнера (щелевая или цилиндрическая). Именно анализ различных аспектов этого влияния и является целью данной статьи.

Описание физической модели процесса выращивания монокристаллов теллурида висмута в щелевом контейнере

Физическая модель процесса роста монокристаллов теллурида висмута в щелевом контейнере изображена на рис. 1.

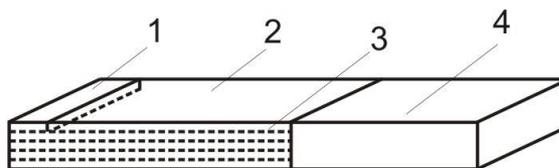


Рис. 1. Физическая модель роста монокристаллов теллурида висмута в щелевом контейнере:

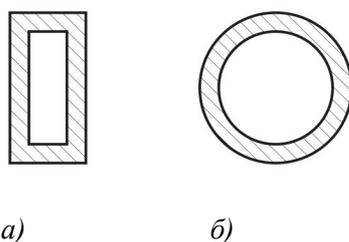
- 1) нарастающий слой, параллельный плоскости спайности;
- 2) предыдущий слой; 3) плоскости спайности затвердевшего объема; 4) расплав.

В соответствии с этой моделью рост монокристалла теллурида висмута наиболее интенсивно происходит по плоскостям спайности. При этом каждый новый слой 1 состоит из ориентированных гексагональных «столбиков». Этот слой постепенно нарастает поверх предыдущего слоя 2. При этом единственным бесконкурентным зародышем служит отвердевший объем со своими плоскостями спайности 3, который и растет, поглощая вещество из расплава 4. Из модели понятно, что при выращивании в щелевом контейнере фронт кристаллизации был бы идеально плоским, если бы отсутствовал поперечный градиент температуры в сечении контейнера, а имел бы место лишь осевой (продольный) градиент, и, кроме того, коэффициент распределения легирующих примесей был бы как можно ближе к единице. Тогда все слои монокристалла росли бы одновременно с одинаковой скоростью и их ориентация относительно широких граней щелевого контейнера была бы близкой к идеальной. Однако в действительности поперечный градиент температуры существует. Кроме того, вследствие большей или меньшей неоднородности распределения легирующих примесей в кристалле от координат в плоскости поперечного сечения контейнера оказываются зависящими температура плавления, коэффициенты диффузии составляющих твердой фазы и расплава, теплопроводность и удельная теплоемкость их, теплота фазового перехода, коэффициент поверхностного натяжения на границе «твердая фаза-расплав». В результате фронт кристаллизации не только не является плоским и даже не представляет собой какой-то гладкой, хотя и неплоской, поверхности, но и имеет своеобразную «ступенчатую» структуру [1, 2].

Из всего сказанного ясно, что форма фронта кристаллизации и характер распределения легирующих примесей в выращенном монокристалле существенным образом зависят от геометрии контейнера, то есть от формы его поперечного сечения. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

Влияние геометрии контейнера на распределение температуры в процессе выращивания монокристаллов теллурида висмута и на форму фронта кристаллизации

На рис. 2 изображены поперечные сечения щелевого и традиционного цилиндрического контейнеров.



*Рис. 2. Поперечные сечения контейнеров:
а) щелевого, б) традиционного цилиндрического.*

Рассмотрим задачу о стационарном распределении температуры в этих контейнерах в максимально упрощенной постановке, которая, однако, даст возможность правильно представить форму фронта кристаллизации. Будем считать, что тепло поступает в вещество, содержащееся в контейнерах, со стороны внешних стенок. Мощность теплового потока,

поступающего в единицу объема вещества, будем считать в обоих случаях одинаковой. В случае щелевого контейнера (рис. 2а) стационарное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{q}{\kappa} (q > 0), \quad (2)$$

где q – тепловая мощность, поступающая в единицу объема вещества в контейнере; κ – ее теплопроводность.

Решение этого уравнения при граничных условиях $T(l/2) = T(-l/2) = T_0$, где l – ширина щели, будет иметь вид:

$$T = \frac{q}{2\kappa} \left(x^2 - \frac{l^2}{4} \right) + T_0. \quad (3)$$

В соответствии с (3) максимальное значение поперечного градиента температуры при применении щелевого контейнера равно:

$$G_{t\max} = ql/2\kappa. \quad (4)$$

В случае цилиндрического контейнера уравнение (2) принимает вид:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{q}{\kappa}. \quad (5)$$

Его несингулярное решение при граничном условии $T(R) = T_0$, где R – внутренний радиус контейнера, имеет вид:

$$T = T_0 + \frac{q}{4\kappa} (r^2 - R^2). \quad (6)$$

В этом случае максимальное значение поперечного градиента температуры равно:

$$G_{t\max} = qR/2\kappa = qD/4\kappa, \quad (7)$$

где D – внутренний диаметр цилиндрического контейнера.

Фронты кристаллизации в приближении однородного распределения примесей для рассмотренных случаев изображены на рис. 3. и 4.

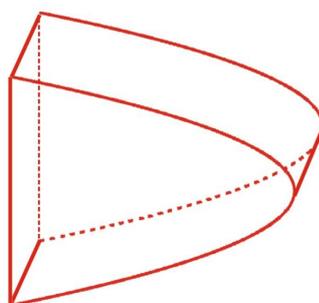


Рис. 3. Форма фронта кристаллизации в случае щелевого контейнера.

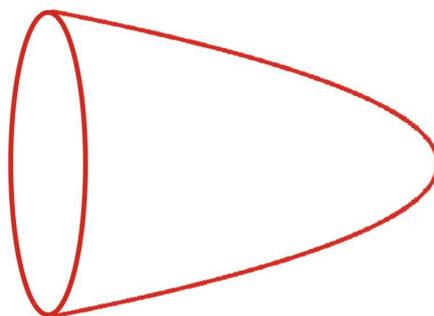


Рис. 4. Форма фронта кристаллизации в случае традиционного цилиндрического контейнера.

Из рис. 3 и 4 видно, что в случае щелевого контейнера фронт кристаллизации имеет форму параболического цилиндра, а в случае традиционного цилиндрического контейнера - форму параболоида вращения. Именно это различие создает принципиально разные условия роста монокристалла теллурида висмута при его выращивании в этих контейнерах методом Бриджмена. В случае щелевого контейнера монокристалл, растущий в результате совместного действия затравки и силы тяжести, представляет собой совокупность слоев, параллельных широким граням контейнера. Вследствие наличия поперечного градиента температуры эти слои растут с несколько различной скоростью, вследствие чего поверхность параболического цилиндра является их огибающей. Но из формулы (3) следует, что сделав ширину контейнера малой, и, следовательно, отношение длинной стороны прямоугольного поперечного сечения контейнера к короткой достаточно большим, можно сделать максимум поперечного градиента температуры малым, и, следовательно, добиться почти идеальной параллельности плоскостей спайности широким граням контейнера. Таким образом, короткую сторону поперечного сечения щелевого контейнера следует делать минимально допустимой технологическим процессом, в то время, как длинную сторону этого сечения, наоборот, следует делать максимально допустимой технологическим процессом, то есть такой, чтобы из полученной монокристаллической пластины можно было получить максимальное количество термоэлектрических ветвей с заданными размерами. Дополнительным средством компенсации поперечного градиента температуры может служить вращение печи Бриджмена вокруг вертикальной оси с оптимальной угловой скоростью. Но при этом в соответствии с соотношением (1), которое является верным не только для продольного (осевого), но и для поперечного градиента температуры, следует уменьшать скорость, и, следовательно, увеличивать время кристаллизации.

В случае выращивания монокристаллов теллурида висмута методом Бриджмена, в традиционном цилиндрическом контейнере имеет место принципиально иная ситуация. Монокристалл в этом случае представляет собой не совокупность широких плоскостей, а совокупность параллельных вектору силы тяжести брусков со сравнительно малым поперечным сечением, огибающей которых является поверхность параболоида вращения. В этом случае бесконкурентный рост монокристалла из единого сверхкритического зародыша уже не имеет места, поскольку такого единого зародыша, если не учитывать затравки, не существует. Более того, наличие поперечного градиента температуры и вызванная этим зависимость коэффициента поверхностного натяжения на границе «расплав-твердая фаза» от расстояния до оси цилиндра может вызвать образование дендритной структуры, тем более, что

при использовании традиционного цилиндрического контейнера не существует преимущественных направлений роста монокристалла в поперечном сечении. Таким образом, плоскости спайности, как это указано, например, в описании к патенту [3] и в статье [4], могут иметь произвольную ориентацию. Это и вызывает необходимость получения термоэлектрических ветвей из неполных дисков или их участков.

Из формулы (6) на первый взгляд может показаться, что в случае цилиндрического контейнера можно компенсировать поперечный градиент температуры путем уменьшения диаметра контейнера. Но резкое уменьшение этого диаметра вынудило бы получать цилиндрические термоэлектрические ветви, что не является технологичным. С другой стороны, большой диаметр слитка привел бы, наоборот, к резкому увеличению поперечного градиента температуры, что вследствие температурной зависимости коэффициента диффузии примесей в кристалле привело бы к резкой неоднородности их радиального распределения, а, следовательно, не только к существенному разбросу термоэлектрических параметров получаемых ветвей, но и к появлению механических напряжений, которые привели бы к возникновению в слитке продольных трещин, и, следовательно, к разрушению ветвей, а тем самым - и к снижению выхода годных изделий. Таким образом, при выращивании монокристаллов теллурида висмута и сплавов на его основе в традиционных цилиндрических контейнерах возникает необходимость подбора оптимального диаметра контейнера.

Сопоставим наши теоретические результаты с результатами экспериментов других авторов, исследовавших термоэлектрические и прочностные свойства сплавов на основе теллурида висмута, в том числе выращенных в плоских щелях [5 – 7].

В работе [5] исследовалась прочность термоэлектрических ветвей из сплавов на основе теллурида висмута *p*- и *n*-типов, изготовленных тремя способами. По первому способу ветви вырезались из выращенных в плоских щелях сплошных пластин размером $41 \times 49 \times 1.4$ мм. При этом размер 1.4 мм соответствовал размеру сечения ветви. По второму способу ветви изготавливались сборными из пластин размером $41 \times 49 \times 0.27$ мм. Пластины соединялись путем пайки с торцов. По третьему способом пластины размером $4 \times 49 \times 0.27$ мм соединялись путем прессования. Каждым способом изготовлялось 20 образцов. Оказалось, что ветви, изготовленные по первому способу (при стандартной толщине пластины), имели средний модуль упругости для *p*- и *n*-типов соответственно равный 68.9 и 52.3 МПа при среднеквадратичном отклонении 27.7 и 14.5 МПа, соответственно. Предел прочности этих ветвей при изгибе составила 14.0 и 16.6 МПа, соответственно, при среднеквадратичном отклонении 3.76 и 4.92 МПа, соответственно.

Сборные ветви *p*- и *n*-типов, изготовленные по второму способу, имели средний модуль упругости соответственно равный 78.4 и 70.2 МПа при среднеквадратичном отклонении 18.0 и 9.7 МПа, соответственно. Предел прочности этих ветвей при изгибе составил 15.8 и 19.8 МПа, соответственно, при среднеквадратичном отклонении 3.2 и 1.86 МПа, соответственно. Прессованные ветви, изготовленные по третьему способу, имели средний модуль упругости соответственно равный 72.9 и 82.8 МПа при среднеквадратичном отклонении 27.0 и 12.1 МПа, соответственно. Предел прочности этих ветвей при изгибе составил 12.5 и 17.8 МПа, соответственно, при среднеквадратичном отклонении 2.82 и 3.97 МПа, соответственно. Таким образом, мы видим, что уменьшение ширины щели способствует как улучшению механических характеристик ветвей, так и улучшению воспроизводимости этих характеристик.

В работе [6] исследовалось влияние условий выращивания слитков твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ на анизотропию их физических свойств. Оказалось, что в случае выращивания в плоских щелях (один из вариантов метода Бриджмена), наблюдается такая структура слитка, в

которой плоскости спайности не только параллельны направлению роста кристалла, что характерно и для традиционной зонной плавки, но и практически параллельны друг другу и плоскости пластины, то есть широкой грани щелевого контейнера. Это позволяет избежать термоупругих напряжений, возникающих при сопряжении зерен с различными коэффициентами термического расширения. Слиток получался в виде пластины толщиной, равной стороне сечения «ветви». Такая пластина является наиболее удобным объектом как для контроля характеристик, так и для последующей резки на ветви. Исследование влияния скорости кристаллизации на текстуру начинали с пластины толщиной 0.5 мм. Далее при избранном времени кристаллизации исследовали влияние толщины пластины на текстуру. Оказалось, что при быстрой кристаллизации нормали к плоскостям $(11\bar{2}0)$ отклоняются на углы от 0 до 25° от оси роста. При этом наблюдается дендритная структура слитка, которая характеризуется случайным кристаллографическим ориентированием кристалла относительно оси роста. Текстура по длине слитка принципиально не менялась. Увеличение времени кристаллизации пластины до 120 мин привело к подавлению дендритного типа кристаллизации. Результаты исследования текстуры показали, что к середине пластины нормали к плоскостям $(11\bar{2}0)$ ориентированы вдоль оси роста с незначительным разбросом текстуры до $3 - 4^{\circ}$ в центре и на периферии пластины. По характеру изменения ориентации зерен по сечению пластины был сделан вывод, что фронт кристаллизации является практически плоским. К середине пластины характер текстуры и ее распределение по сечению практически не менялись. На расстоянии 30 мм от начала пластины в центральной части ориентация зерна сохранялась, но на краях пластины появились небольшие зерна с отличной от основного объема ориентацией. Далее отклонение плоскостей спайности от оси слитка на краях пластины увеличивается и составляет с одного края 8° , а с другого – до 10° . Такое изменение структуры свидетельствует об искривлении фронта кристаллизации.

При увеличении времени кристаллизации до 420 мин нормали к плоскостям спайности (0001) параллельны нормали к плоскости пластины или отклонены от нее на 3° от плоскости, перпендикулярной к оси роста, с незначительным рассеянием $\pm 2^{\circ}$. Такая ориентация положительно влияет на прочностные характеристики материала.

Четкая текстура материала, при которой плоскости спайности ориентированы параллельно оси роста, наблюдалась лишь для толщины пластины, равной 0.5 мм. При толщине пластины 1 мм нормали к плоскостям $(11\bar{2}0)$ для различных зерен отклонялись от оси пластины на $2, 4, 7$ и 9° . Наблюдался изгиб фронта кристаллизации. По длине пластины толщиной 1 мм текстура принципиально не менялась. При толщине пластины 1.4 мм нормали к плоскостям $(11\bar{2}0)$ отклонялись от оси роста на углы до 10° . Исследование текстуры по длине пластины толщиной 1.4 мм показало, что после середины пластины отклонение нормалей к плоскостям $(11\bar{2}0)$ от оси пластины увеличивалось и достигало 15° .

Контроль положения кристаллографических плоскостей (0001) относительно плоскости пластины показал, что с увеличением толщины пластины растет разориентация плоскостей спайности друг относительно друга и относительно плоскости пластины. Таким образом, и эти данные подтверждают наш вывод о том, что уменьшение ширины щели увеличивает степень параллельности плоскостей спайности друг другу и широким граням щелевого контейнера.

В работах [7, 8] показано, что на пластинах толщиной 1 мм подавить дендритный рост и получить четкую ориентацию плоскостей спайности относительно плоскости пластины с

рассеянием, которое не превышало 5^0 , удалось лишь при временах кристаллизации в интервале 210 - 420 мин. Это подтверждает вывод об увеличении времени кристаллизации при уменьшении градиента температуры.

Выводы

1. Путем решения уравнения теплопроводности установлено, что вследствие существования поперечного градиента температуры в приближении однородного распределения легирующих примесей в кристалле фронт кристаллизации в случае щелевого контейнера имеет форму параболического цилиндра с образующими, параллельными широкой стороне щели, а в случае традиционного цилиндрического контейнера - форму параболоида вращения.
2. Вследствие таких особенностей фронта кристаллизации монокристалл в случае щелевого контейнера представляет собой совокупность слоев, параллельных широким граням контейнера, которые растут с разной скоростью. Поэтому в целях достижения близкой к идеальной параллельности плоскостей спайности монокристалла широким граням контейнера предлагается узкую сторону щели делать минимально допустимой, а широкую, наоборот - максимально допустимой технологическим процессом.
3. При выращивании монокристаллов теллурида висмута и сплавов на его основе методом Бриджмена в традиционном цилиндрическом контейнере компенсировать негативное влияние поперечного градиента температуры на форму фронта кристаллизации путем уменьшения диаметра контейнера нельзя, поскольку это привело бы к необходимости изготавливать термоэлектрические ветви цилиндрической формы, что не технологично. С другой стороны, увеличение диаметра контейнера привело бы к росту максимума поперечного градиента температуры, что вследствие резкой неоднородности распределения примесей в кристалле, а также зависимости коэффициента поверхностного натяжения на границе «жидкость-твердая фаза» от расстояния до оси контейнера, вызвало бы образование в слитке дендритной структуры, резкий разброс термоэлектрических параметров получаемых ветвей, а также снижение механической прочности ветвей вследствие образования в слитке продольных трещин из-за роста механических напряжений. Следовательно, существует необходимость выбора оптимального диаметра цилиндрического контейнера.

Литература

1. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов // Под редакцией Б.Я. Мойжеса. М.: Наука – 1972. – 320 с.
2. Струтинская Л.Т. Моделирование процесса роста термоэлектрического материала на основе Bi_2Te_3 методом вертикальной зонной плавки / Л.Т. Струтинская, В.В. Жихаревич // Термоэлектричество. – 2012. – №2. – С.79-87.
3. Белов Ю.М., Маекава Н. Литая пластина, изготовленная из термоэлектрического материала. – Патент РФ и Японии. – Оpubл.10.12.2000, заявка от 01.08.1998. – Патентообладатели: Кристалл Ltd., Мацушита Электрик Уорк.
4. Belov Ju. M. Review of methods of thermoelectric materials mass production / Ju. M. Belov, S.M. Maniakin, I. V. Morgunov // In book: Thermoelectric handbook. Macro to nano. Edited by D. M.

- Rowe, Ph.D., D.Sc. – P.20-1 – 20.12. –Taylor & Francis group, LLC CRC Press. – Boca Raton (FL) – 2006.
5. Воронин А.И. Механическая прочность ветвей термоэлементов на основе Bi_2Te_3 при различных методах их получения / А.И. Воронин, А.С. Осипков, Т.А. Горбатовская // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – №2 (115) – С.17-21.
 6. Бублик В.Т. Влияние условий выращивания слитков твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ на анизотропию физических свойств / В.Т. Бублик, А.И. Воронин, Е.А. Выговская [и др.] // Материалы электронной техники. – 2010. – №1. – С.58-62.
 7. Аленков В.В. Влияние условий кристаллизации на структуру пластин твердых растворов термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 , выращенных из расплава / В.В. Аленков, Ю.М. Белов, В.Т. Бублик [и др.] // Материалы электронной техники. – 2008. – №2. – С.22-25.
 8. Voronin A.I. Structure of profiled crystals based on solid solutions of Bi_2Te_3 and their X-ray diagnostics / A.I. Voronin, V.T. Bublik, N.Yu. Tabachkova, Yu.M. Belov // Journal of electronic materials. – 2011. – Vol.40. – No5. – P.794-800 (doi: 10.1007/s11664-011-1573-5).

Поступила в редакцию 01.11.2018.

P.V. Gorskyi, *doctor Phys.-math. Science*^{1,2}
V.V.Razinkov, *cand Phys-math . Science*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

INFLUENCE OF CONTAINER GEOMETRY ON THE ORIENTATION AND THE DEGREE OF PARALLELISM OF CLEAVAGE PLANES OF BISMUTH TELLURIDE SINGLE CRYSTALS

In the paper, by solving the heat conduction equation for a cylindrical and slotted container, it is shown that, with the same specific power of the heater and the same temperature of container exterior walls, the transverse temperature gradient in the melt is the greater, the larger the diameter of the cylindrical or the width of the slotted container. In addition, it is shown that in the idealized case, the crystallization front when using a cylindrical container has the shape of a paraboloid of revolution, and in the case of using a slotted container, the shape of a parabolic cylinder with generators parallel to the long side of the container cross section, which is significantly closer to flat. But the diameter of the cylindrical container cannot be drastically reduced, while the slot width of the slotted container can be reduced to the minimum value technologically acceptable for further cutting the resulting single-crystal plate in the shape of a rectangular parallelepiped into legs. This circumstance, together with the ability to rotate the Bridgman furnace around the vertical axis with the optimal angular velocity in order to smooth the transverse temperature gradient, makes it possible, under the condition of using slotted containers, to bring the crystallization front as close as possible to the flat one, and therefore to

achieve maximum parallelism of the single crystal cleavage planes and maximum homogeneity of the distribution of dopants in the resulting single crystal. *Bibl. 8, Fig. 4.*

Key words: slotted container, cylinder container, specific power of the heater, crystallization front shape, paraboloid of revolution, parabolic cylinder, maximum temperature gradient, the degree of parallelism of cleavage planes to the wide edges of the slotted container, the degree of homogeneity of the distribution of impurities in a single crystal.

References

1. Goltsman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I. A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskiye materialy na osnove Bi_2Te_3* [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi_2Te_3]. B.Ya.Moizhes (Ed.). Moscow: Nauka [in Russian].
2. Strutynska L.T., Zhikharevich V.V. (2012). Simulation of Bi_2Te_3 thermoelectric material growth by vertical zone melting method. *J. Thermoelectricity*, 2, 79-87.
3. *Patent of RF and Japan* (2000). Belov Yu.M., Maekawa H. Cast plate made of thermoelectric material.
4. Belov Ju. M., Maniakin S.M., Morgunov I.V. (2006). Review of methods of thermoelectric materials mass production. In: *Thermoelectric handbook. Macro to nano*. D. M. Rowe (Ed.). Boca Raton (Fl): –Taylor & Francis group, LLC CRC Press.
5. Voronin A.I., Osipkov A.S., Gorbatovskaia T.A. (2010). Mekhanicheskaya prochnost vetvei termoelementov na osnove Bi_2Te_3 pri razlichnykh metodakh ikh polucheniia [Mechanical strength of thermoelement legs based on Bi_2Te_3 with different methods of their production]. *Nano-i mikrosistemnaia tekhnika – Nano- and Microsystems Technology*, 2 (115), 17-21.
6. Bublik V.T., Voronin A.I., Vygovskaya E.A., et al. (2010). Vliianiye uslovii vyrashchivaniia slitkov tverdykh rastvorov $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ na anisotropiiu fizicheskikh svoystv [Influence of conditions for growing $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ solid solutions on the anisotropy of physical properties]. *Materialy elektronnoi tekhniki – Electronic Materials*, 1, 58-62 [in Russian].
7. Alenkov V.V., Belov Yu.M., Bublik V.T., et al. (2008). Vliianiye uslovii kristallizatsii na strukturu plastin tverdykh rastvorov termoelektricheskikh materialov na osnove Bi_2Te_3 , vyrashchennykh iz rasplava [Influence of crystallization conditions on the structure of plates of solid solutions of Bi_2Te_3 based thermoelectric materials]. *Materialy elektronnoi tekhniki – Electronic Materials*, 2, 22-25 [in Russian].
8. Voronin A.I., Bublik V.T., Tabachkova N.Yu., Belov Yu.M. (2011). Structure of profiled crystals based on solid solutions of Bi_2Te_3 and their X-ray diagnostics. *J. Electronic Materials*, 40, 5, P.794-800 (doi: 10.1007/s11664-011-1573-5).

Submitted 01.11.2018.



Закордонец В.С.

Закордонец В.С., канд. физ.-мат. наук, доцент
Кутузова Н.В.

Тернопольский национальный технический
университет, ул. Русская, 56, Тернополь, 46001,
Украина, e-mail: wladim21@gmail.com



Кутузова Н.В.

РАСЧЕТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ

В работе построены физическая и математическая тепловые модели термоэлектрической системы охлаждения. Решена система уравнений, включающая стационарное уравнение теплопроводности, уравнение термогенерации и уравнение генерации холода. Рассчитана температура гетероперехода светодиода (СД) в зависимости от его мощности, полного теплового сопротивления системы охлаждения, температуры окружающей среды и холодопроизводительности термоэлектрического охлаждающего модуля (ТЭОМ). Получены аналитические зависимости температуры гетероперехода от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД и значениях теплового сопротивления системы охлаждения. При заданной тепловой мощности СД и тепловом сопротивлении системы охлаждения найдена оптимальная величина тока питания ТЭОМ, при котором температура гетероперехода СД достигает минимума. Показано, что использование ТЭОМ дает возможность уменьшить температуру гетероперехода СД до значений более низких, чем температура окружающей среды. Это особенно актуально в условиях, при которых температура среды близка к критической температуре гетероперехода. Показано, что эффективность использования ТЭОМ снижается при увеличении мощности СД, температуры окружающей среды и полного теплового сопротивления системы охлаждения. Библ. 11, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: светодиод, гетеропереход, тепловой режим, тепловое сопротивление, термостабилизация, термоэлектрический охлаждающий модуль, радиатор.

Введение

Современные полупроводниковые источники света имеют КПД преобразования электрической энергии в световую близкий к 30 % [1, 2]. Таким образом, почти 70 % подведенной энергии превращается в тепло. В условиях увеличения мощности СД традиционные системы термостабилизации не всегда обеспечивают адекватные тепловые режимы. Если тепловую энергию не отводить, то чрезмерный нагрев СД приведет к деградации его световых характеристик и уменьшит срок его службы. Кроме того, увеличение температуры уменьшит яркость свечения и световой поток.

Для повышения эффективности термостабилизации мощных СД применяются активные способы теплоотвода: вентиляторы, жидкостное охлаждение, термоэлектрическое охлаждение и др. Термоэлектрические системы охлаждения обладают рядом преимуществ в сравнении с другими системами, а именно: высокой надежностью и отсутствием подвижных частей, компактностью и небольшой массой, малой инерционностью и бесшумностью работы.

Применение ТЭОМ наделяет систему теплоотвода функцией охлаждения, т.е. дает возможность достичь температуры гетероперехода СД более низкой, чем температура окружающей среды. Особенно актуальным это становится в условиях, при которых температура среды становится равной либо превышает температуру гетероперехода СД.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что проблема стабилизации теплового режима СД уже освещалась в ряде работ. В частности, в [3, 4] рассмотрены вопросы обеспечения теплового режима СД. Особое внимание уделено проблеме минимизации теплового сопротивления при использовании различных моделей радиаторов. Рассмотрены инновационные технологии охлаждения СД с применением струйного обдува. Однако расчет теплового режима в этих работах не проводился. В [5] с использованием известных формул теплотехники и данных наблюдений за реальными температурными режимами разработана методика выбора эффективного радиатора. При этом для интенсификации теплообмена радиатора с окружающей средой использовался вентиляторный обдув. В [6] проведен теоретический анализ теплового режима СД с выносным радиатором и традиционным охлаждением. Рассчитана температура перегрева гетероперехода СД в зависимости от его мощности и параметров теплопровода и радиатора. Термоэлектрическое охлаждение СД при этом не рассматривалось.

В силу сказанного выше, целью работы является построение физической и математической тепловых моделей термоэлектрической системы охлаждения СД и расчет на их основе температуры перегрева гетероперехода в зависимости от мощности СД, теплового сопротивления системы охлаждения и холодопроизводительности ТЭОМ.

Для достижения цели путем теоретического анализа устанавливались аналитические соотношения между мощностью СД, тепловым сопротивлением системы охлаждения, холодопроизводительностью ТЭОМ и температурой гетероперехода СД. Эти соотношения дают возможность рационально выбрать схему охлаждения СД с целью обеспечения максимального светового потока при минимальной температуре гетероперехода.

Результаты исследований и их обсуждение.

Известно, что СД генерирует тепловую мощность

$$P_t = (1 - \eta_e) U_f I_f, \quad (1)$$

где I_f и U_f прямой ток и прямое напряжение СД, η_e – его квантовая эффективность.

Очевидно, что ТЭОМ должен поглощать мощность не меньшую, чем тепловая мощность СД, поскольку в противном случае стабилизация теплового режима будет невозможной. Если же ТЭОМ будет поглощать избыточную мощность, то на его холодной поверхности будет образовываться конденсат, что может привести к короткому замыканию. Единственным возможным способом сделать использование ТЭОМ эффективным является включение в схему охлаждения электронного блока регулировки мощности и холодопроизводительности ТЭОМ в зависимости от температуры гетероперехода СД.

Будем считать, что тепловая мощность СД полностью поглощается холодной поверхностью ТЭОМ.

$$P_t = P_c, \quad (2)$$

а от горячей поверхности при помощи радиатора отводится тепловая мощность P_h .

Для расчета теплового режима СД воспользуемся методом электротепловой аналогии [7]. Физическая модель и тепловая схема термоэлектрической системы охлаждения СД приведены на рис. 1.

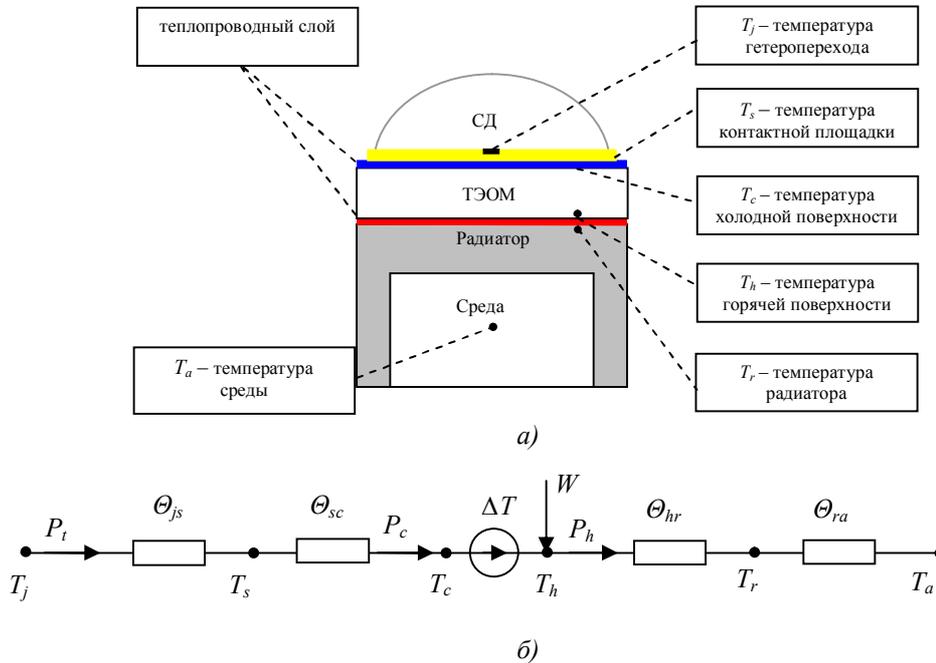


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрической системы охлаждения светодиода с ТЭОМ и радиатором (а) и ее тепловая схема (б). Здесь T_j – температура гетероперехода СД; T_s – температура контактной площадки; T_c и T_h – температура холодной и горячей поверхностей ТЭОМ, соответственно; T_r – температура радиатора; T_a – температура среды; ΔT – перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ.

На схеме каждый элемент характеризуется своим тепловым сопротивлением. А именно: Θ_{js} – тепловое сопротивление между гетеропереходом и контактной площадкой; Θ_{sc} и Θ_{hr} – соответственно тепловые сопротивления между контактной площадкой и холодной поверхностью ТЭОМ и между горячей поверхностью ТЭОМ и радиатором; Θ_{ra} – тепловое сопротивление между радиатором и средой; $\Delta T = T_h - T_c$ – перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ, обусловленный эффектом Пельтье.

Тепловой схеме отвечает уравнение термического равновесия:

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T. \quad (3)$$

Тепловая мощность, поглощаемая ТЭОМ (холодопроизводительность), определяется соотношением [8, 9]:

$$P_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (4)$$

а от горячей поверхности при помощи радиатора отводится тепловая мощность P_h , равная

$$P_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - \kappa \Delta T, \quad (5)$$

где α , κ , и R – коэффициент дифференциальной термоЭДС, теплопроводность и сопротивление полупроводникового материала ветвей термоэлементов ТЭОМ; T_c и T_h – температуры холодной и горячей поверхностей ТЭОМ; I – ток источника питания ТЭОМ.

Мощность, выделяемая на горячей поверхности ТЭОМ, превышает мощность, поглощаемую холодной поверхностью, на величину затрат электроэнергии источника питания:

$$P_h = P_c + W. \quad (6)$$

Мощность W затрачивается на выполнение работы по перемещению зарядов против разности электрических потенциалов, возникающей в соответствии с законом Зеебека в термоэлектрической цепи, и на тепловые потери Джоуля:

$$W = P_h - P_c = \alpha I \Delta T + I^2 R. \quad (7)$$

Из уравнения термического равновесия для температуры перегрева гетероперехода СД получим:

$$\Delta T_j = T_j - T_a = P_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha I \Delta T + I^2 R) \cdot \Theta_h - \Delta T, \quad (8)$$

где $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$ и $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ – полные тепловые сопротивления со стороны холодной и горячей поверхностей ТЭОМ.

Перепад температуры ΔT при этом определяется так:

$$\Delta T = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - P_c \right). \quad (9)$$

В формуле (8) первое слагаемое описывает увеличение температуры гетероперехода при передаче тепловой мощности, выделяемой СД и самим ТЭОМ. Два последних слагаемых определяют влияние ТЭОМ на температуру гетероперехода СД. Охлаждение обеспечивается за счет перепада температур между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ. В итоге, именно от соотношения величин этих слагаемых зависит эффективность работы термоэлектрической системы охлаждения.

Температура гетероперехода СД определяется его мощностью, тепловым сопротивлением системы охлаждения, температурой окружающей среды и режимом работы ТЭОМ. Управление режимом работы ТЭОМ осуществляется путем изменения величины тока питания. При разработке и эксплуатации термоэлектрической системы охлаждения важным вопросом является выбор оптимального тока, при котором происходит эффективное охлаждение.

С целью анализа полученных результатов рассмотрим влияние тока питания ТЭОМ на эффективность охлаждения СД при заданных значениях мощности и теплового сопротивления последнего. В качестве источника света, т.е. СД, выберем современную светодиодную матрицу *XLamp CMA1516*, параметры которой, взятые из [10], приведены в таблице.

Таблица

Параметры СД XLamp CMA1516

Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная мощность, Вт	Световой поток, лм	Тепловое сопротивление СД θ_{j-s} , К/Вт
1.05	39	41	1400 - 4800	0.4

Мощностью СД можно управлять в широких пределах, изменяя напряжение или ток питания. Очевидно, что максимальная мощность СД не должна превышать максимальной холодопроизводительности ТЭОМ. Для данной светодиодной матрицы максимальная тепловая мощность равна

$$P_{I \max} = (1 - \eta_e) U_{f \max} I_{f \max} = 30 \text{ Вт.} \quad (10)$$

Типономинал ТЭОМ выбирался, исходя из тепловой мощности, габаритных размеров и требований к температурному режиму эксплуатации СД. При проведении численных расчетов были использованы характеристики серийных ТЭОМ *TB-161* [11] с параметрами: максимальный ток $I_{\max} = 5.7 \text{ А}$, максимальное напряжение $U_{\max} = 18.3 \text{ В}$, максимальная холодопроизводительность при нулевой разности температур $P_{c, \max} = 66.3 \text{ Вт}$, максимальный перепад температуры при нулевой холодопроизводительности $\Delta T_{\max} = 70 \text{ К}$.

Применение ТЭОМ всегда связано с использованием того или иного радиатора, который должен рассеять не только тепло, выделяемое СД, но и тепло Джоуля, выделяющееся в термоэлементе при прохождении через него электрического тока. Тепловое сопротивление современных радиаторов, оснащенных вентиляторами, составляет $\theta_{ra} = 0.3 \div 0.6 \text{ К/Вт}$. Наилучшие образцы с использованием тепловых трубок достигают значений $\theta_{ra} = 0.1 \text{ К/Вт}$. Жидкостные теплоотводящие системы еще более эффективны. Их тепловое сопротивление составляет $\theta_{ra} = 0.1 \div 0.01 \text{ К/Вт}$, но при этом они громоздки и с трудом сочетаются с осветительной системой.

В результате численного анализа полученных соотношений был получен ряд зависимостей, которые представлены на приведенных ниже рисунках. В частности, на рис. 2 представлена зависимость величины перегрева гетероперехода СД от тока питания ТЭОМ при различных величинах тепловой мощности СД.

Минимумы на зависимостях $\Delta T_j(I)$ соответствуют режимам работы с максимальной эффективностью системы охлаждения, при которой достигается наименьшая температура гетероперехода. Очевидно, что при токах питания, близких к оптимальному, термоэлектрическая система охлаждения позволяет получить более низкие значения температуры гетероперехода в сравнении с традиционной. Штриховыми линиями на рисунке показаны величины перегрева, обеспечиваемые системой охлаждения без ТЭОМ, рассчитанные по формуле (7) для таких же значений тепловых сопротивлений.

Зависимость величины перегрева гетероперехода от тока питания ТЭОМ при различных значениях теплового сопротивления с горячей стороны ТЭОМ представлена на рис. 3.

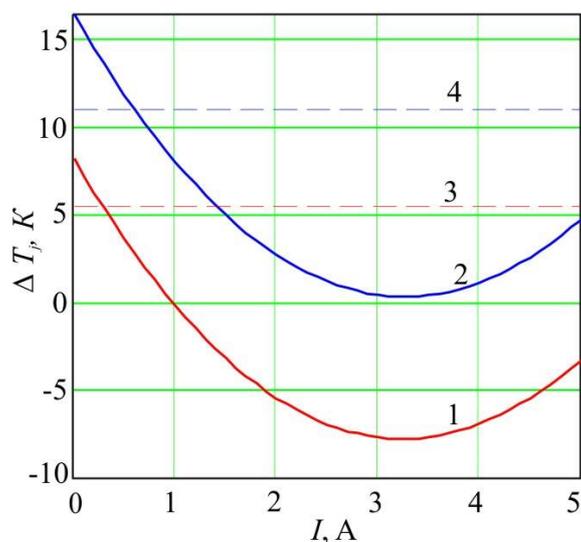


Рис. 2. Зависимость величины перегрева гетероперехода СД от тока питания ТЭОМ при различных величинах мощности СД и при тепловых сопротивлениях $\Theta_c=0.6$ К/Вт, $\Theta_h=0.2$ К/Вт. Сплошные линии 1 и 2 при $P_c=10$ Вт и $P_c=20$ Вт, соответственно. Штриховые линии 3 и 4 соответствуют тем же мощностям и тепловым сопротивлениям, но при отсутствии ТЭОМ.

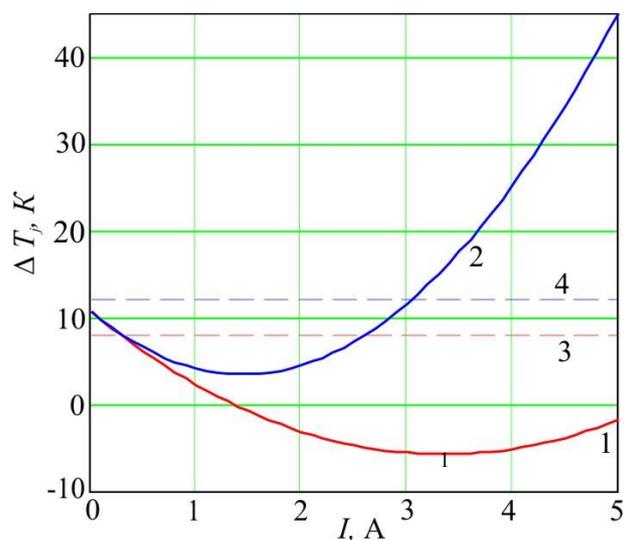


Рис. 3. Зависимость величины перегрева гетероперехода от тока питания ТЭОМ при мощности СД $P_c=10$ Вт и при различных значениях теплового сопротивления с горячей стороны ТЭОМ. Сплошные линии 1 и 2 построены при $\Theta_h=0.2$ К/Вт и $\Theta_h=0.6$ К/Вт, соответственно. Штриховые линии 3 и 4 – при той же мощности и тепловых сопротивлениях, но при отсутствии ТЭОМ.

Очевидно, что с ростом величины Θ_h эффективность охлаждения снижается, а минимумы зависимостей $\Delta T_j(I)$ сдвигаются в область меньших значений тока питания. При определенных соотношениях между мощностями ТЭОМ и СД возможно снижение температуры гетероперехода до температуры среды, а иногда и до температуры более низкой, чем температура среды. Это особенно актуально в случае близости температуры среды к критической температуре гетероперехода СД.

Зависимость перепада температуры от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД представлена на рис. 4.

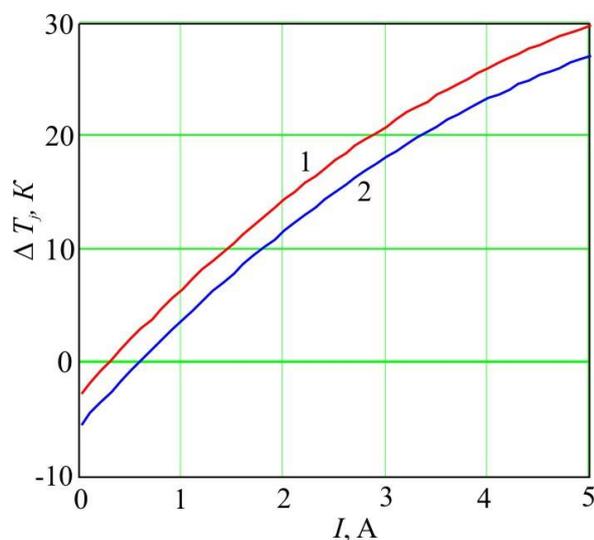


Рис. 4. Зависимость перепада температуры от тока питания ТЭОМ при различных мощностях СД. Кривая 1 при $P_c=10$ В, кривая 2 при $P_c=20$ В.

Из рисунка видно, что с увеличением тока перепад температуры между горячей и холодной поверхностями ТЭОМ возрастает. Кроме того, он зависит от тепловой нагрузки. В частности, с ростом тепловой мощности СД перепад температуры уменьшается, и, наоборот, при уменьшении мощности – возрастает.

На величину теплового сопротивления системы охлаждения существенно влияет режим работы ТЭОМ и мощность тепловой нагрузки. Если температура гетероперехода СД сравняется с температурой среды либо станет ниже этой температуры, тепловое сопротивление системы станет нулевым, либо даже отрицательным.

Выводы

В условиях близости температуры среды к критической температуре гетероперехода СД для стабилизации его теплового режима целесообразно применять термоэлектрические модули охлаждения.

При данной тепловой мощности СД и тепловом сопротивлении системы охлаждения существует оптимальная величина тока питания ТЭОМ, при которой температура гетероперехода СД достигает минимума. При токах, близких к оптимальному, термоэлектрическая система охлаждения позволяет получать более низкие значения температуры гетероперехода в сравнении с традиционной.

При оптимальном соотношении между мощностями ТЭОМ и СД термоэлектрическая система охлаждения позволяет снижать температуру гетероперехода СД до температур более низких, чем температура окружающей среды. Эффективность применения ТЭОМ снижается при увеличении тепловой мощности СД и суммарного теплового сопротивления системы охлаждения.

При анализе эффективности работы системы охлаждения следует руководствоваться не только параметрами ТЭОМ, но и параметрами системы охлаждения СД в целом: суммарным

тепловым сопротивлением системы охлаждения, тепловой нагрузкой и режимом работы ТЭОМ.

Литература

1. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 140-146.
2. Гонин М. Спасительная прохлада или теплоотвод для мощных светодиодных матриц / М. Гонин // Новости электроники+светотехника. – 2013. – № 2.
3. Полищук А.А. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств /А.А Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.
4. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов / К. Староверов // Новости электроники. – 2008. – № 17. – С. 21-23.
5. Лотар Ноэль. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов / Лотар Ноэль // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 3. – С. 13-15.
6. Zakordonets V. Theoretical analysis of thermal conditions and ways of led temperature stabilization / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2016. — № 4 (84). — С. 105–112.
7. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. Ч.1. / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1982. –327 с.
8. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
9. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 12. – С. 40-46.
10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.
11. <http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>.

Поступила в редакцию 08.10.2018

Volodymyr Zakordonets, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)
Natalija Kutuzova

Ternopil National Technical University,
56, Russian st., Ternopol, 46001, Ukraine,
e-mail: wladim21@gmail.com

CALCULATION OF THERMOELECTRIC SYSTEM FOR COOLING LEDS

In this paper, the thermal mathematical model of thermoelectric cooling system is constructed. The system of equations which includes the stationary thermal conductivity equation, the

thermogenesis equation and cold generation equation is solved. The temperature of LED heterojunction is calculated, depending on its power, total thermal resistance of cooling system, ambient temperature and cold productivity of TCM. The analytical dependences of heterojunction temperature on TCM supply current were obtained at different LED powers and at different values of thermal resistance of cooling system. With the given thermal power of LED and thermal resistance of cooling system, an optimal value of the TCM supply current is found, whereby the temperature of LED heterojunction reaches the minimum. It is shown that the use of TCM allows reducing the temperature of LED heterojunction to values lower than ambient temperature. This is particularly relevant under conditions when ambient temperature is close to the critical temperature of heterojunction. It was shown that the efficiency of using TCM decreases with increasing LED power, ambient temperature and total thermal resistance of cooling system. Bibl. 11, Fig. 4, Tabl. 1.

Key words: LED, heterojunction, thermal mode, thermal resistance, thermal stabilization, thermoelectric cooling module, radiator.

References

1. Nikiforov S. (2005). Temperatura v zhizni i rabote svetodiodov [Temperature in the life and work of LEDs]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 9, 140-146 [in Russian].
2. Gonin M. (2013). Spasitelnaia prokhlada, ili teplootvod dlia moshchnykh svetodiodnykh matrits [Saving coolness, or heat sink for high-power LED arrays]. Novosti elektroniki + svetotekhnika – Electronics News and Illumination Engineering, 2 [in Russian].
3. Polishchuk A.A. (2006). Obespecheniie teplovogo rezhima svetodiodnykh lamp pri razrabotke svetotekhnicheskikh ustroystv [Providing thermal mode of LED lamps in the development of lighting devices]. Sovremennaiia elektronika – Modern Electronics, 3, 42-45 [in Russian].
4. Staroverov K. (2008). Sistemy okhlazhnediia dlia svedodiodov [Cooling systems for LEDs]. Novosti elektroniki – Electronics News, 17, 21-23 [in Russian].
5. Lotar Noel (2010). Okhlazhediie i regulirovanie temperaturnykh rezhimov svetodiodov [Cooling and control of temperature modes of LEDs]. Poluprovodnikovaia svetotekhnika – Semiconductor Illumination Engineering, 3, 13-15 [in Russian].
6. Zakordonets V., Natalija Kutuzova (2016). Teoretychnyi analiz teplovykh umov i shliakhy stabilizatsii temperatury svitlodiodiv. [Theoretical analysis of thermal conditions and ways of LED temperature stabilization. Bulletin of TNTU]. Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU, 4 (84), 105–112 [in Ukrainian].
7. Beliaiev N.M., Riadno A.A. (1982). Metody teorii teploprovodnosti. Chast1. [Methods of thermal conductivity theory. P.1] – Moscow: Vysschaia shkola [in Russian].
8. Anatyshuk L.I. (1979). Termoelementy i termoelektricheskiie ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
9. Shostakovskii P. (2009). Sovremennyye resheniia termoelektricheskogo okhlazhdeniia [Modern solutions of thermoelectric cooling]. Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies, 12, 40-46 in Russian].
10. <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-CMA1516.pdf>.
11. <http://kryothermtec.com/ru/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>.

Submitted 08.10.2018

УДК 62-69



Максимук Н.В.

Максимук Н.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatykh@gmail.com

**ОБ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРЕДПУСКОВОГО ОТОПИТЕЛЯ С
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА**

Приведены результаты исследований экономических показателей систем предпускового разогрева двигателя внутреннего сгорания, в которых источниками электроэнергии являются термоэлектрические генераторы. На основе технико-экономического анализа определено, что система с совместимым источником тепла является самым эффективным вариантом применения термоэлектрических источников электричества для предпусковой тепловой подготовки двигателей транспортных средств к эксплуатации. Установлена взаимосвязь между удельной стоимостью электрической энергии и полезной тепловой мощностью системы "предпусковой отопитель – термоэлектрический генератор" с совместимым источником тепла. Определено, что особенность использования такой системы заключается в снижении удельной стоимости полученной электроэнергии при повышении тепловой мощности предпусковых нагревателей. Библ. 11, табл. 3.

Ключевые слова: предпусковой отопитель, термоэлектрический генератор, эффективность.

Введение

Одним из перспективных методов решения проблемы разряда аккумуляторов при тепловой подготовке двигателей транспортных средств к запуску является использование термоэлектрических генераторов (ТЭГ) в качестве источников электрической энергии для предпусковых нагревателей [1 – 7].

В работе [8] показано, что варианты использования предпусковых нагревателей с термогенератором сводятся к трем основным системам по способу подвода и отвода тепловых потоков:

- с индивидуальными источниками тепла;
- с индивидуальными источниками тепла и совместимым гидравлическим контуром;
- с совместимым источником тепла.

Выбор эффективной для применений системы требует комплексной оценки ее энергетических характеристик и стоимостных показателей. На основе проведенных в [8] исследований по определению термодинамических особенностей таких систем установлено, что наивысшим коэффициентом полезного действия (КПД) характеризуется система "термоэлектрический генератор – предпусковой отопитель" с совместимым источником тепла, и система, в которой предпусковой отопитель и ТЭГ объединены гидравлическим контуром.

Целью данной работы является дальнейший анализ моделей предпусковых нагревателей с термоэлектрическими источниками электричества и определение наиболее эффективного по экономическим показателям варианта использования термоэлектрических генераторов в системах предпускового разогрева двигателей транспортных средств.

Технико-экономический анализ использования предпусковых нагревателей с термоэлектрическими источниками электричества

Оценку стоимости C систем предпускового разогрева двигателей проведем с использованием следующего соотношения:

$$C = C_1 + C_2, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 – стоимость предпускового отопителя и термоэлектрического генератора, соответственно. Для системы с совместимым источником тепла C_1 – стоимость компонент предпускового отопителя.

Основным фактором, определяющим ценовые характеристики термоэлектрического генератора, является стоимость C_3 термоэлектрической батареи генератора:

$$C_3 = n \cdot C_4, \quad (2)$$

где C_4 – стоимость термоэлектрического модуля, из которых состоит термобатарея; n – количество модулей в термобатареи.

Количество модулей n , которое необходимо использовать для обеспечения заданного уровня электрической мощности W ТЭГ, можно определить по соотношению:

$$n = \frac{W}{w}, \quad (3)$$

где w – электрическая мощность модуля.

Оценку стоимости систем проведем на примере жидкостного предпускового отопителя Webasto Thermo Top EVO 4, ценовые характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Стоимость жидкостного предпускового отопителя
Webasto Thermo Top EVO 4 и его функциональных компонент [9]*

№	Наименование	Стоимость C_1 , \$
1	Предпусковой отопитель	850
2	Горелка	155
3	Вентилятор	200
4	Топливный насос	110
5	Циркуляционный насос	135

В качестве термобатареи для ТЭГ используем термоэлектрические генераторные модули "Алтек-1061" выходной электрической мощностью $w = 10$ Вт, которые изготавливаются в Институте термоэлектричества [10]. Стоимость одного такого модуля равна ~ 20 \$. Кроме того, для упрощения расчетов, будем считать, что стоимость термоэлектрических модулей составляет около 30% от общей стоимости термоэлектрического генератора.

Поскольку уровень выходной электрической мощности, позволяющий обеспечить функционирование рассмотренных систем, составляет около 50 Вт [8], в конструкции термогенераторов необходимо использовать шесть генераторных модулей "Алтек-1061". Таким образом, общая стоимость системы с индивидуальными источниками тепла и системы с совместимым гидравлическим контуром составит 1250 \$ при стоимости ТЭГ 400 \$. Соответственно стоимость системы с совместимым источником тепла будет ниже на 250 \$.

Ориентировочная стоимость систем предпускового разогрева двигателя приведена в табл. 2. Для комплексной оценки эффективности рассматриваемых систем в таблице приводятся ранее полученные значения их суммарного теплового и электрического КПД.

Из приведенных данных следует, что рациональной для предпускового разогрева двигателя является система "предпусковой отопитель – термоэлектрический генератор" с совместимым источником тепла, поскольку, при равных значениях КПД, ее стоимость ниже по сравнению со стоимостью системы, объединенной единым гидравлическим контуром.

Таблица 2

Эффективность термоэлектрических систем предпускового разогрева двигателя

№	Тип системы	КПД η , %	Стоимость C , \$
1	С индивидуальными источниками тепла	60	1250
2	С индивидуальными источниками тепла и совместимым гидравлическим контуром	75	1250
3	С совместимым источником тепла	75	1000

Проведем оценку удельной стоимости электроэнергии c , полученной от применения системы предпускового разогрева двигателя с совместимым источником тепла:

$$c = \frac{C}{W} = \frac{C_1 + C_2}{nw}. \quad (4)$$

Расчеты выполним, основываясь на проведенной в [11] классификации предпускового оборудования по уровню тепловой мощности и потребляемой электрической мощности, для трех типов жидкостных предпусковых нагревателей: Thermo Top Evo 4, Thermo Pro 90, Thermo E200, ориентированных на использование в транспортных средствах с объемом двигателя (> 2.5) л, (4 - 10) л и (< 10) л [9]. Кроме того, установим зависимость удельной стоимости электрической энергии от тепловой мощности предпусковых нагревателей Q и коэффициента полезного действия ТЭГ η_{TEG} , определенного из следующего соотношения:

$$\eta_{TEG} = \frac{W}{Q}. \quad (5)$$

Затраченная для работы термогенератора тепловая мощность Q в системе с совместимым источником тепла равна тепловой мощности горелки предпускового отопителя:

$$Q = \eta \cdot A \cdot m, \quad (6)$$

где η – КПД горелки предпускового отопителя; A и m – теплотворная способность и расход топлива, используемого для работы предпускового отопителя.

Расчеты проведем с использованием информации о технических характеристиках указанных моделей нагревателей [9].

Полученные результаты приведены табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов удельной стоимости электрической энергии для системы "предпусковой отопитель-термоэлектрический генератор" с совместимым источником тепла

Характеристики	Thermo Top Evo 4	Thermo Pro 90	Thermo E200
* Стоимость функциональных компонент C_1 , \$	600	700	670
** Стоимость термоэлектрического генератора C_2 , \$	670	770	870
Стоимость системы C , \$	1270	1470	1540
*** Выходная электрическая мощность ТЭГ W , Вт	100	150	200
Удельная стоимость электрической энергии c , \$ / Вт	13	10	8
Теплопроизводительность Q , кВт	4	9	20
Эффективность термоэлектрического преобразования η_{TEG} , %	2	1.3	1

* При расчете стоимости функциональных компонент жидкостных предпусковых нагревателей использованы данные, приведенные в прайс-листах компании Webasto [9].

** В связи с тем, что конструкция термоэлектрических генераторов выполнена согласно одной физической модели, стоимость термогенераторов, ориентированных на высокие значения электрической мощности, определена как сумма стоимости ТЭГ наименьшей электрической мощности и стоимости соответствующего количества термоэлектрических модулей.

*** Выходная электрическая мощность термоэлектрического генератора определена с учетом возможности подзарядки аккумуляторной батареи [11].

Как следует из приведенных данных, особенностью системы с совместимым источником тепла является снижение удельной стоимости полученной электрической энергии, имеющее место при повышении тепловой мощности предпусковых нагревателей. Причиной этого является связь, существующая между удельной стоимостью и η_{TEG} , причем уменьшение термоэлектрического КПД приводит к снижению удельной стоимости полученной электроэнергии от 13 \$/Вт для тепловой мощности 4 кВт до 8 \$/Вт для мощностей уровня 20 кВт, что является еще одним преимуществом данной системы.

Выводы

1. Показано, что рациональной для предпускового разогрева двигателя как по энергетическим характеристикам, так и с учетом стоимостных показателей, является система "предпусковой отопитель – термоэлектрический генератор" с совместимым источником тепла.

2. Установлено, что система с единым гидравлическим контуром менее эффективна, поскольку при равных значениях КПД, ее стоимость ориентировочно в 1.2 раза выше по сравнению со стоимостью системы с совместимым источником тепла.

3. Показано, что система с индивидуальными источниками тепла является наименее эффективной для предпускового разогрева двигателя как по уровню КПД, так и с позиций общей стоимости. Однако такая система имеет ряд преимуществ, которые заключаются в возможности использования термоэлектрического генератора в качестве резервного источника электроэнергии на автомобиле.

4. Определено, что высокими значениями термоэлектрического КПД в системе с совместимым источником тепла, должны характеризоваться предпусковые нагреватели наименьшей тепловой мощности. Установлено, что с ростом тепловой мощности, эффективность термоэлектрического преобразования энергии достигает значения 1 % для тепловых мощностей уровня 20 кВт. Последнее важно, поскольку существует связь между удельной стоимостью полученной электроэнергии и КПД термогенератора, причем уменьшение КПД приводит к уменьшению удельной стоимости от 13 \$/Вт до 8 \$/Вт.

Автор выражает благодарность акад. Анатычуку Л.И. за тему и идею научного исследования, а также за ценные советы при написании работы.

Литература

1. Михайловский В.Я., Максимук Н.В. Режимы работы автомобилей при пониженных температурах. Необходимость использования нагревателей и рациональность применения термогенераторов для их работы // Термоэлектричество. - 2014.- №3.- С. 20-31.
2. Пат. (UA) на изобретение № 102303; МПК: F01N 5/00; H01L 35/00. Термоэлектрический источник питания для автомобиля / Анатычук Л.И., Михайловский В.Я. - Оpubл. 25.06.2013, бюл. №12, заявка u2011 13957 от 28.11.2011.
3. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобильный обогреватель с термоэлектрическим источником питания / Анатычук Л.И., Михайловский В.Я. - Оpubл. 10.08.2012, бюл. №15, заявка u2012 02055 от 23.02.2012.
4. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобильный обогреватель с термоэлектрическим источником питания / Максимук Н.В. - Оpubл. 25.04.2018, бюл. №8, заявка u2017 11819 от 04.12.2017.

5. Pat. US6527548B1. Int.Cl. F24H 1/00. Self powered electric generating space heater / Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen - Date of patent 4.03.2003, App.No 10 / 176,312, Filed 20.06.2002.
6. Pat. US2010 / 0115968A1. Int.Cl. F25B 21/02. Heating apparatus comprising a thermoelectric devise / Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter - Date of patent 13.05.2010, App.No 11 / 993,608, Filed 23.06.2006.
7. Пат. (RU) 2268393С1.МПК: F02N 17/04. Устройство для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания / Прилепо Ю.П. - Опубл. 20.01.2006, бюл. №02, заявка 2005101942/06 от 27.01.2005.
8. Анатычук Л.И., Максимук Н.В. Эффективность предпусковых нагревателей с термоэлектрическими источниками электричества. // Термоэлектричество. - 2018.- №3.
9. Электронный ресурс <http://www.webasto.com//>
10. Электронный ресурс <http://www.inst.cv.ua>
11. Михайловский В.Я., Максимук Н.В. Рациональные мощности термогенераторов для предпусковых нагревателей транспортных средств // Термоэлектричество. – 2015.– №4. – С. 65-74.

Поступила в редакцию 19.11.2018.

M.V.Maksimuk

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatyuch@gmail.com

ECONOMIC ASPECTS OF USING STARTING PREHEATERS WITH THERMOELECTRIC HEAT SOURCES

This paper presents the results of research on the economic indicators of systems for preheating of the internal combustion engine with thermoelectric generators as the sources of electric power. Based on the feasibility study, it was determined that a system with a common heat source is the most efficient option of using thermoelectric power sources for pre-start thermal preparation of vehicle engines for work. The relationship between the unit cost of electric energy and the useful thermal power of the "starting preheater-thermoelectric generator" system with a common heat source is established. It is determined that the peculiarity of using such a system lies in reducing the specific cost of electric energy generation when increasing the thermal output of starting preheaters. Bibl. 11, Table. 3.

Keywords: starting preheater, thermoelectric generator, efficiency.

References

1. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2014). Automobile operating conditions at low temperatures. The necessity of applying heaters and the rationality of using thermal generators for their work. *J.Thermoelectricity*, 3, 20-31.
2. Patent of Ukraine №102303 (2013). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya.. Thermoelectric power source for automobile [in Ukrainian].
3. Patent of Ukraine №72304 (2012). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya.. Automobile heater with thermoelectric power source [in Ukrainian].
4. Patent of Ukraine №124999 (2018). Maksimuk M.V. Automobile heater with thermoelectric power source [in Ukrainian].
5. Patent of US6527548B1 (2003). Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen. Self-powered electric generating space heater.
6. Patent of US2010/0115968A1 (2010). Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter. Heating apparatus comprising a thermoelectric device.
7. Patent of RF 2268393C1 (2006). Prilepo Yu.P. A device to facilitate the start of internal combustion engine.
8. Anatyshuk L.I., Maksimuk M.V. (2018). Efficiency of starting pre-heaters with thermoelectric power sources. *J.Thermoelectricity*, 3.
9. Retrieved from <http://www.webasto.com/>
10. Retrieved from <http://www.inst.cv.ua>
11. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of vehicles. *J.Thermoelectricity*, 4, P. 65-74.

Submitted 19.11.2018.

УДК 537.32

Анатычук Л.И., *акад. НАН Украины*^{1,2}
Пасечникова Н.В., *док. мед. наук, профессор,*
*член – корреспондент НАМН Украины*³
Науменко В.О., *док. мед. наук, профессор*³
Задорожный О.С., *канд. мед. наук*³
Гаврилюк Н.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}
Кобылянский Р.Р., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина, *e-mail: anatyuch@gmail.com*;

²Черновицкий национальный университет им. Ю.Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина;

³ГУ "Институт глазных болезней и тканевой терапии
им. В.П. Филатова НАМН Украины", Французский бульвар,
49/51, Одесса, 65000, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТИ ГЛАЗ

В работе приведены конструкция и технические характеристики впервые разработанного термоэлектрического прибора для определения теплового потока с поверхности глаз. Прибор является перспективным для диагностики и мониторинга офтальмологических заболеваний, дающий возможность повысить эффективность ранней диагностики патологии органа зрения, наблюдать в динамике за развитием патологического процесса в структурах глаза, а также повысить эффективность лечения острых и хронических заболеваний глаза. Разработанный термоэлектрический прибор позволяет осуществлять мониторинг теплового и температурного состояний поверхности глаз в режиме реального времени, является оригинальным и не имеет мировых аналогов. Библ. 30, рис. 8, табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический прибор, тепловой поток, офтальмология.

Введение

Общая характеристика проблемы. Организм человека, приспосабливаясь к изменяющимся условиям окружающей среды, способен поддерживать относительное постоянство своей внутренней среды (гомеостаз). Терморегуляция организма человека является одним из важнейших аспектов поддержки гомеостаза. Для обеспечения постоянства температуры тела необходимо, чтобы количество тепловой энергии, образующейся в организме (теплопродукция), равнялось количеству тепловой энергии, отдаваемой в окружающую среду (теплоотдача). Генерация тепловой энергии в организме человека происходит непрерывно в процессе метаболических экзотермических реакций окисления сложных веществ (глюкоза, белки, липиды и тому подобное), либо их распада на более простые [1]. Уровень теплопродукции, в свою очередь, зависит от активности метаболизма [2]. Отдача тепла в

окружающую среду осуществляется с помощью четырех основных механизмов: излучение, теплопередача, конвекция и испарение [3].

Оценка процессов теплообмена организма человека базируется на измерениях температуры и теплового потока. Температура характеризует качественную сторону теплового явления, а тепловой поток – количественную [4, 5]. Область измерения температуры, в том числе в офтальмологии, традиционно хорошо обеспечена аппаратурой и метрологией. Температура в разных отделах глаза может быть определена бесконтактными или контактными методами. Эти методы термометрии имеют как преимущества, так и определенные недостатки [6]. Что касается локального измерения теплового потока с поверхности тела человека, то в последнее время достигнут ощутимый успех в разработке современных средств его измерения [7 – 14]. Для исследования локального тепловыделения организма человека перспективными являются термоэлектрические сенсоры теплового потока, совмещающие в себе высокую чувствительность, точность, быстродействие, стабильность параметров в широком интервале рабочих температур, и согласовываются с современной регистрационной аппаратурой [15 – 17]. Использование таких сенсоров позволяет достигать высокой точности теплотрических измерений [18]. Однако следует отметить, что в мире до сих пор не существует ни одного термоэлектрического прибора для измерения теплового потока с поверхности глаз.

В глазу животного и человека кровообращение в сосудистой оболочке является основным источником тепла. Кровь, поступающая в глаз с температурой, которая практически равняется температуре тела, формирует тепловой градиент, который индуцирует переход тепла от крови к тканям глаза. Чем более интенсивно кровообращение, тем большее количество тепла передается тканям глаза. Тепло, распределенное по глазным тканям, переходит в окружающую среду через внешние оболочки глаза [6, 19, 20]. На сегодняшний день в офтальмологии существует проблема ранней и дифференциальной медицинской диагностики разнообразных заболеваний, которые характеризуются изменениями внутриглазного кровообращения (воспалительные процессы, опухоли сосудистой оболочки, глаукома и тому подобное). Очевидно, что нарушения кровообращения глаза должны сопровождаться динамикой показателей теплообмена [20, 21]. Следовательно, разработка новых высокочувствительных методов регистрации изменений теплообмена глаза, в том числе на основе применения термоэлектрических сенсоров теплового потока, позволит повысить эффективность ранней диагностики данной патологии.

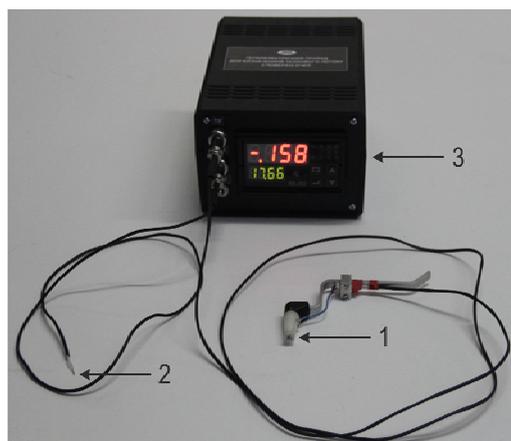
Известно, что ряд офтальмологических острых и хронических заболеваний сопровождается изменением внутриглазных тепловых процессов. В частности, в некоторых исследованиях была продемонстрирована взаимосвязь температуры внешней поверхности глаза с состоянием кровообращения глаз, внутриглазным давлением, наличием воспалительного процесса [22, 23]. Изменение тепловых характеристик тканей глаза может происходить в ранней фазе заболевания до появления выраженной клинической симптоматики. Регистрация этих изменений является перспективным направлением ранней диагностики разной офтальмопатологии. Диагностика патологического процесса на раннем этапе развития приведет к повышению эффективности лечения и снижению риска осложнений.

Поэтому целью данной работы является разработка термоэлектрического прибора для определения теплового потока с поверхности глаз, которая дает возможность повысить эффективность ранней диагностики офтальмологических заболеваний.

Конструкция и технические характеристики прибора

Термоэлектрический прибор для определения теплового потока с поверхности глаз был разработан в Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины в рамках договора о сотрудничестве с ГУ "Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В.П. Филатова НАМН Украины". Прибор предназначен для диагностики и мониторинга офтальмологических заболеваний, который дает возможность повысить эффективность ранней диагностики патологии органа зрения, наблюдать в динамике за развитием патологического процесса в структурах глаза, а также повысить эффективность лечения острых и хронических заболеваний глаза. Разработанный термоэлектрический прибор является оригинальным и не имеет мировых аналогов [24]. Внешний вид прибора и технические характеристики приведены на рис. 1 и в табл. 1.

На передней панели прибора размещен программируемый терморегулятор типа RE - 202, разъем для подключения термоэлектрического сенсора теплового потока, разъем для подключения термоэлектрического датчика термопары температуры и тумблер включения прибора (рис. 1). На задней панели размещен разъем для подключения зарядного устройства. Следует отметить, что категорически запрещается проводить измерения теплового потока и температуры живых биологических объектов при подключенном внешнем сетевом зарядном устройстве. Работать с прибором можно только при отключенном зарядном устройстве.



*Рис. 1. Термоэлектрический прибор для определения теплового потока с поверхности глаз:
1 – термоэлектрический сенсор теплового потока, 2 – термоэлектрический датчик
термопары температуры, 3 – электронный блок управления.*

Таблица 1

Технические характеристики прибора

№	Технические характеристики прибора	Значение параметров
1.	Количество каналов измерения	4
2.	Количество термоэлектрических датчиков температуры	1
3.	Диапазон измерения плотности теплового потока	0.01-50 мВт/см ²
4.	Точность измерения плотности теплового потока	± 5 %
5.	Диапазон измерения температур	0-50 °С
6.	Дискретность измерения температур	± 0.01 °С
7.	Диапазон измерения комнатной температуры	0-50 °С
8.	Дискретность измерения комнатной температуры	± 0.01 °С
9.	Диапазон измерения напряжения аккумулятора	3.7-4.5 В
10.	Время непрерывной работы прибора от заряженного аккумулятора	12 час
11.	Габаритные размеры термоэлектрического сенсора теплового потока	0.3-0.7 мм
12.	Габаритные размеры электронного блока управления	180 × 140 × 90 мм
13.	Вес прибора	0.6 кг

Многоканальный термоэлектрический прибор (рис. 1) представляет собой автономное устройство с аккумуляторным источником питания, которое дает возможность проводить высокоточные измерения тепловых потоков и температур биологических объектов контактным способом. Блок-схема такого прибора приведена на рис. 2.

Прибор состоит из следующих функциональных узлов: канала измерения теплового потока 1, канала измерения температуры 2, канала измерения напряжения на аккумуляторном источнике питания 3, канала измерения комнатной температуры 4, цифрового микроконтроллера 5, аккумуляторного блока питания с зарядным устройством 6 и цифрового дисплея 7.

Канал измерения теплового потока 1 предназначен для точного измерения генерируемого напряжения термоэлектрического сенсора теплового потока и последующего его превращения в физическую величину в единицах плотности теплового потока (мВт/см²). Дискретность измерения напряжения канала составляет ± 1мкВ, что позволяет проводить измерение теплового потока с максимальной точностью.

Канал измерения температуры 2 предназначен для высокоточного измерения температуры термоэлектрическим датчиком-термопарой. Особенностью разработанного прибора является то, что впервые у врача появилась возможность с помощью простого переносного автономного прибора проводить измерение температуры биологического объекта с дискретностью ± 0.01°С. Поскольку в качестве датчика температуры используется термопара хромель - копель, которая может быть изготовлена с минимальными геометрическими

размерами, это дает возможность измерять температуру миниатюрных биологических объектов с высоким быстродействием.

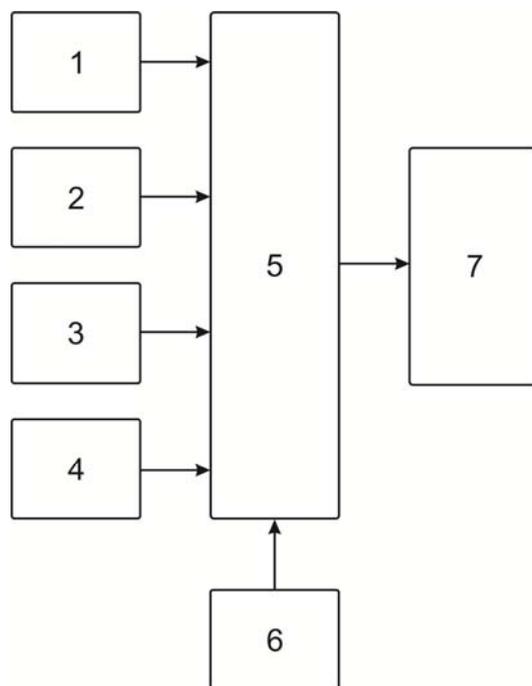


Рис. 2. Блок-схема термоэлектрического прибора для определения теплового потока с поверхности глаз: 1 – канал измерения теплового потока, 2 – канал измерения температуры, 3 – канал измерения напряжения на аккумуляторном источнике питания, 4 – канал измерения комнатной температуры, 5 – цифровой микроконтроллер, 6 – аккумуляторный блок питания с зарядным устройством, 7 – цифровой дисплей.

Канал 3 предназначен для измерения и контроля напряжения на аккумуляторном источнике питания. Поскольку прибор питается от аккумулятора, то длительность его непрерывной работы зависит от уровня зарядки аккумулятора, который, в свою очередь, зависит от остаточного напряжения на нем. Если напряжение на аккумуляторе станет меньше, чем 3.7 В, то его следует зарядить согласно инструкции по эксплуатации прибора.

Канал измерения комнатной температуры 4 предназначен для точного измерения температуры окружающей среды. Датчик температуры расположен на лицевой панели прибора около разъемов. Измерение комнатной температуры проводится с дискретностью ± 0.01 °С и этот сигнал используется для компенсации температуры холодного спая термопары хромель-копель.

Цифровой микроконтроллер 5 предназначен для управления измерительными каналами, нормирования и превращения генерирующих сигналов в физические величины. Цифровой микроконтроллер можно программировать с помощью кнопок, расположенных на передней панели прибора, выбирать тип датчика и пределы измерения.

Аккумуляторный блок питания с зарядным устройством 6 предназначен для гальванической развязки прибора и исследуемого биологического объекта с целью возможного предотвращения поражения его электрическим током. Благодаря гальванической развязке прибора от электросети создано безопасное и эффективное использование прибора в

офтальмологической практике. Низкое напряжение автономного питания прибора (не больше 4.5 В) не представляет угрозы поражения электрическим током любого исследуемого биологического объекта. Зарядное устройство предотвращает выход из строя литий-ионного аккумулятора в случае критических режимов его работы.

Цифровой дисплей 7 отображает результаты измерений (значение плотности теплового потока – в мВт/см² и температуры – в °С) на передней панели прибора. Цифровой дисплей является светодиодным, большим и ярким, что позволяет проводить измерения в затемненных помещениях с больших расстояний.

Прибор простой, компактный, переносной, автономный и надежный в эксплуатации. Эти особенности дают возможность врачу или медицинскому работнику пользоваться прибором без специальной подготовки. К техническим преимуществам такого прибора следует отнести: наличие высокочувствительного специфического термоэлектрического сенсора теплового потока, возможность измерения температуры с дискретностью ± 0.01 °С, безопасность использования прибора благодаря его гальванической развязке от электросети и возможность мониторинга теплового и температурного состояний поверхности глаз человека в режиме реального времени.

Изготовление и градуировка термоэлектрического сенсора теплового потока

Для указанного термоэлектрического прибора был разработан и изготовлен миниатюрный термоэлектрический сенсор теплового потока по специальной запатентованной технологии Института термоэлектричества НАН и МОН Украины [25 – 27]. Термоэлектрический микромодуль размерами (2 × 2 × 0.5) мм содержит 100 шт. кристаллов n- и p-типов проводимости размерами (0.17 × 0.17 × 0.4) мм из высокоэффективного термоэлектрического материала на основе *Bi - Te*. Такой термоэлектрический микромодуль помещается между двумя керамическими пластинами на основе Al_2O_3 диаметром 3 мм и толщиной 0.1 мм каждая, а боковая поверхность герметизируется с помощью специального герметика. Таким образом, диаметр и высота изготовленного термоэлектрического сенсора теплового потока составляет 3 мм и 0.7 мм, соответственно (рис. 3). Значение диаметра разработанного сенсора теплового потока было определено согласно медицинским требованиям [28]. Электрическое сопротивление такого термоэлектрического сенсора составляет $R = 14$ Ом.

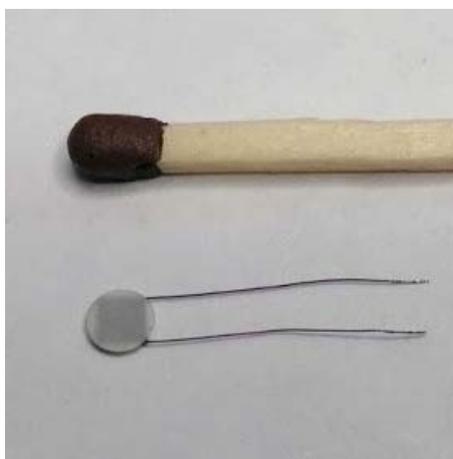


Рис. 3. Термоэлектрический сенсор теплового потока диаметром 3 мм и высотой 0.7 мм.

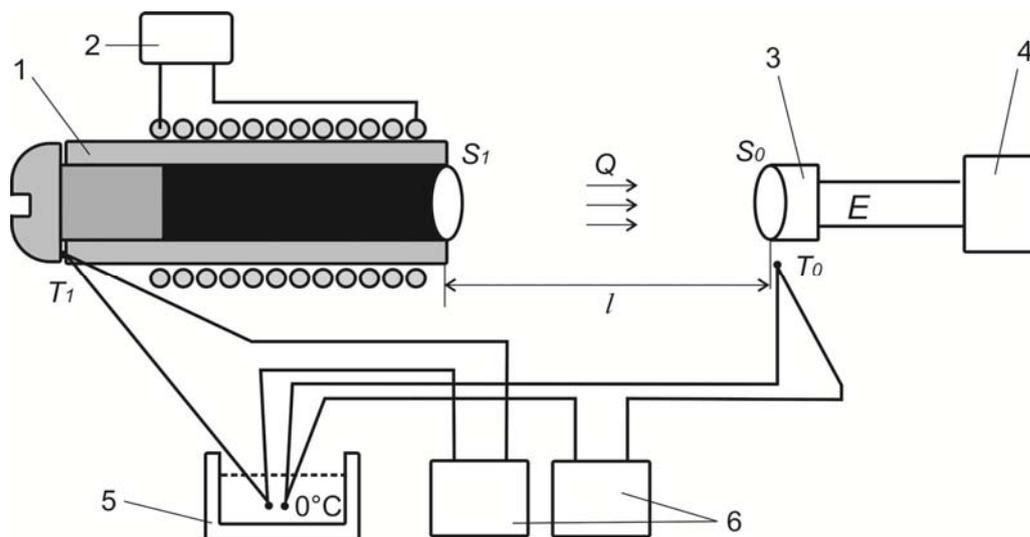


Рис. 4. Схема стенда для определения вольт-ваттной чувствительности термоэлектрического сенсора теплового потока: 1 – АЧТ, 2 – блок питания нагревателя АЧТ, 3 – термоэлектрический сенсор теплового потока, 4 – милливольтметр, 5 – нуль-термостат термоэлектрических термопар, 6 – измерители температуры.

Вольт-ваттная чувствительность термоэлектрического сенсора теплового потока определяется из следующего выражения:

$$v = \frac{E}{Q}, \quad (1)$$

где v – вольт-ваттная чувствительность термоэлектрического сенсора теплового потока (В/Вт), E – термоЭДС термоэлектрического сенсора теплового потока (В), Q – величина теплового потока (Вт).

Величина теплового потока, который излучается АЧТ и поглощается приемной площадкой термоэлектрического сенсора теплового потока, определяется следующим образом:

$$Q = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_0^4) \cdot S_1 \cdot S_0}{\pi \cdot l^2}, \quad (2)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_1 = 1$ для излучателя АЧТ; $\varepsilon_2 = 0.82$ для приемной площадки – шлифованной керамики на основе Al_2O_3 ; T_1 , К – температура корпуса АЧТ; T_0 , К – температура приемной площадки, что фактически близкая к температуре окружающей среды; S_1 , см² – площадь излучательного отверстия АЧТ; S_0 , см² – площадь приемной площадки; l , см – расстояние между выходным отверстием излучательного АЧТ и приемной площадкой, которые между собой параллельные и их центры находятся на одной оси.

Для данного стенда (рис. 4) имеем следующие значения: $S_1 = 0.059$ см², $S_0 = 0.07065$ см², $l = 0.9$ см.

Результаты определения вольт-ваттной чувствительности термоэлектрического сенсора теплового потока приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения вольт-ваттной чувствительности термоэлектрического сенсора теплового потока

$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ мВ}$	$Q, \text{ мВт}$	$\nu, \text{ В/Вт}$
18.5	50	0.096	27.9	3.43
18.5	58	0.124	36.44	3.40

Таким образом, была проведена градуировка термоэлектрического сенсора теплового потока и определен коэффициент превращения ($\kappa = 4.163 \text{ мВт/мВ}\cdot\text{см}^2$) значения генерирующего напряжения термоэлектрического сенсора в физическую величину в единицах плотности теплового потока (мВт/см^2).

Порядок работы с прибором

Разработанный термоэлектрический сенсор теплового потока указанного прибора закреплен на контактной призме и штативе, который является аналогичным имеющимся в стандартном апланационном тонометре Гольдмана (медицинское устройство, которое применяется для измерения внутриглазного давления) [28]. Указанные контактная призма и штатив универсальны и могут крепиться к биомикроскопам различных производителей (рис. 5 – 8).

Особенностью конструкции контактной призмы является то, что она имеет возможность сниматься со штатива для обработки после обследования каждого пациента. Термоэлектрический сенсор теплового потока, закрепленный в центре контактной призмы, непосредственно контактирует с внешней поверхностью глаза человека (с центром роговицы). Также следует отметить, что контактная поверхность термоэлектрического сенсора теплового потока сделана атрауматической (со сглаженными краями) и предусмотрена возможность обработки и дезинфекции этой поверхности.

Термоэлектрический сенсор теплового потока (диаметр 3 мм) размещен в центре рабочей поверхности контактной призмы (диаметр 7 мм) и конструктивно предусмотрена небольшая оптическая зона контроля между ними для того, чтобы врач, глядя в биомикроскоп, имел возможность точно установить указанный термоэлектрический сенсор на центр роговицы глаза (рис. 8).



Рис. 5. Штатив тонометра Гольдмана, закрепленный на биомикроскопе.



Рис. 6. Контактная призма и штатив тонометра Гольдмана, закрепленные на биомикроскопе (на рисунке указано направление взгляда врача).



Рис. 7. Положение контактной призмы, закрепленной в штативе тонометра Гольдмана, в процессе исследования с помощью термоэлектрического сенсора теплового потока.

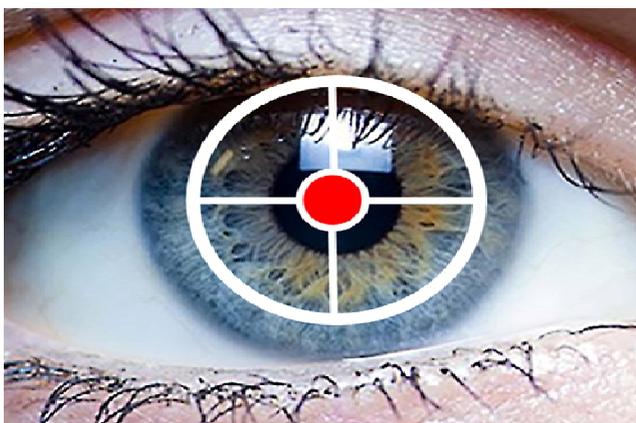


Рис. 8. Схематическое изображение области измерения теплового потока с поверхности роговицы глаза человека с помощью разработанного прибора.

Выводы

1. Впервые разработан и изготовлен термоэлектрический прибор для определения теплового потока с поверхности глаз. Прибор предназначен для диагностики и мониторинга офтальмологических заболеваний и дает возможность повысить эффективность ранней диагностики патологии органа зрения, наблюдать в динамике за развитием патологического процесса в структурах глаза, а также повысить эффективность лечения острых и хронических заболеваний глаза. Разработанный термоэлектрический прибор является оригинальным и не имеет мировых аналогов.

2. Разработанный термоэлектрический прибор дает возможность осуществлять мониторинг теплового и температурного состояний поверхности глаз человека в режиме

реального времени, которые являются крайне важными для диагностики офтальмологических заболеваний на ранних стадиях.

3. Внедрение разработанного термоэлектрического прибора в медицинскую практику будет иметь чрезвычайно важную социальную и экономическую значимость, поскольку позволит уменьшить риск возникновения офтальмологических осложнений, сохранить жизнеспособность структур глаз пациентов и обеспечить предоставление высококвалифицированной помощи как в специализированных медицинских заведениях, так и в экстремальных условиях.

Литература

1. Чебышев Н.В. Биология. Справочник. - 2-ое изд., испр. и доп. / Н.В. Чебышев, Г.С. Гузикова, Ю.Б. Лазарева, С.Н. Ларина – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2011. – 608 с.
2. Царев А. В. Целевой температурный менеджмент в клинической практике интенсивной терапии критических состояний / А. В. Царев // Медицина неотложных состояний. – 2014. – № 7. – С.186-191.
3. Кубарко А.И. Нормальная физиология : учебник. В 2 ч. Ч. 2 / А.И. Кубарко [и др.]; под редакцией А.И. Кубарко. - Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 604 с.
4. Декуша Л. В. Средства теплотрии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока : дис . докт. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Леонид Васильевич. Львов, 2016. – 495 с.
5. Грищенко Т. Г. Теплотрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.]; под редакцией докт. техн. наук Т. Г. Грищенко. Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока - К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. - 438 с.
6. Анатычук Л.И., Пасечникова Н.В., Задорожный О.С., Назаретян Р.Э., Мирненко В.В., Кобылянский Р.Р., Гаврилюк Н.В. Оригинальное устройство и подходы к изучению распределения температуры в различных отделах глаза // Офтальмологический журнал. – 2015. – № 6.– С. 50-53.
7. Гишук В.С. Электронный регистратор сигналов сенсоров теплового потока человека // Термоэлектричество. – 2012. – № 4. – С. 105-108.
8. Гишук В.С. Электронный регистратор с обработкой сигналов термоэлектрического сенсора теплового потока // Термоэлектричество. – 2013. – № 1.– С. 82-86.
9. Гишук В.С. Модернизируемый прибор для измерения тепловых потоков человека // Термоэлектричество. – 2013. – № 2.– С. 91-95.
10. Гишук В.С., Кобылянский Р.Р., Черкез Р.Г. Многоканальный прибор для измерения температуры и плотности тепловых потоков // Научный вестник Черновицкого университета: сборник науч. трудов. Физика. Электроника. – Т. 3, Вып. 1. – Черновцы: Черновицкий национальный университет, 2014. – С. 96-100.
11. Кобылянский Р.Р., Бойчук В.В. Использование термоэлектрических тепломеров в медицинской диагностике // Научный вестник Черновицкого университета: сборник науч. трудов. Физика. Электроника. – Т. 4, Вып. 1. – Черновцы: Черновицкий национальный университет. – 2015. – С. 90-96.

12. Анатычук Л.И., Ивашук О.И., Кобилянский Р.Р., Постевка И.Д., Бодяка В.Ю., Гушул И.Я. Термоэлектрический прибор для измерения температуры и плотности теплового потока "АЛТЕК-10008" // Термоэлектричество. – 2016. – № 1. – С.76-84.
13. Анатычук Л.И., Юрик О.Е., Кобилянский Р.Р., Рой И.В., Фищенко Я.В., Слободянюк Н.П., Юрик Н.Е., Дуда Б.С. Термоэлектрический прибор для диагностики воспалительных процессов и неврологических проявлений остеохондроза позвоночника человека // Термоэлектричество. – 2017. – № 3. – С. 54-67.
14. L.I. Anatyshuk, R.R. Kobylanskyi, R.G. Cherkez, I.A. Konstantynovych, V.I. Hoshovskyi, V.A. Tiumentsev. Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. – 2017. – № 6, P. 44-48.
15. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И. Анатычук – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
16. Геращенко О.А. Основы теплотриии / О.А. Геращенко – К.: Наукова думка, 1971. – 192 с.
17. Ладька Р.Б. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении / Р.Б. Ладька, О.Н. Дакалюк, Л.П. Булат [и др.] // Медицинская техника. – 1996. – №6. – С. 36 – 37.
18. Анатычук Л.И. О влиянии температуры окружающей среды на показания термоэлектрических сенсоров медицинского назначения / Л.И. Анатычук, О.И. Ивашук, Р.Р. Кобилянский, И.Д. Постевка, В.Ю. Бодяка, И.Я. Гушул, Ю.Я. Чупровская // Сенсорная электроника и микросистемные технологии. - 2018. - Т. 15. – № 1. - С. 17-29.
19. Mapstone R. Determinants of corneal temperature / R. Mapstone // Brit. J. Ophthalmol. – 1968. – Vol. 52. – P. 729-741.
20. Tan J.H. Infrared thermography on ocular surface temperature: A review / J.H. Tan, E.Y.K Ng, U. R. Acharya, C. Chee // Infrared Phys. Techn., 2009. – Vol. 52. – P. 97–108.
21. Zadorozhnyy O.S. Infrared thermography of external ocular surface in patients with absolute glaucoma in transscleral cyclophotocoagulation: a pilot study / O. S. Zadorozhnyy, O. V. Guzun, A. Iu. Bratishko, [et al.] // J. Ophthalmol. (Ukraine) – 2018. – Vol.2. – P. 23-28.
22. Galassi F. Evaluation of ocular surface temperature and retrobulbar haemodynamics by infrared thermography and colour Doppler imaging in patients with glaucoma / F.Galassi, B.Giambene, A.Corvi [et al.] // British Journal of Ophthalmology, 2007. – № 91. – P. 878–881.
23. Sodi A.A. Ocular surface temperature in central retinal vein occlusion: preliminary data/ A.A. Sodi, B.A.D. Giambene, G.B. Falaschi [et al.] // European Journal of Ophthalmology, 2007. – №17. – P. 755–759.
24. Заявка на корисну модель № u201901535 від 15.02.2019 р. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і теплового потоку з поверхні очей // Анатичук Л.И., Кобилянський Р.Р., Бухараєва Н.Р., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А. – 2019.
25. Патент UA 93217. Способ изготовления термоэлектрической микробатареи // Анатычук Л.И., Константинович И.А. – 2014.
26. Патент UA 117719. Способ изготовления термоэлектрической микробатареи // Анатычук Л.И., Кобилянский Р.Р. – 2017.
27. Анатычук Л.И., Кобилянский Р.Р., Константинович И.А., Кузь Р.В., Маник О.Н., Ницович О.В., Черкез Р.Г. Технология изготовления термоэлектрических микробатарей // Термоэлектричество. – 2016. – № 6. – С. 49-54.

28. Kim N.R. Comparison of Goldmann applanation tonometer, noncontact tonometer, and TonoPen XL for intraocular pressure measurement in different types of glaucomatous, ocular hypertensive, and normal eyes / N.R. Kim, C.Y. Kim, H. Kim [et al.] // *Curr. Eye Res.*, 2011. – № 36. – P. 295-300.
29. Анатычук Л.И., Кобилянский Р.Р., Константинович И.А. Градуирование термоэлектрических сенсоров теплового потока // Труды XV Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» 26-30 мая 2014 года. – Т. 2. – Одесса, Украина. – 2014. – С. 30-31.
30. Анатычук Л.И., Кобилянский Р.Р., Константинович И.А., Лысько В.В., Пуганцева О.В., Розвер Ю.Ю., Тюменцев В.А. Стенд для градуирования термоэлектрических преобразователей теплового потока // *Термоэлектричество*. – 2016. – № 5. – С. 71-79.

Поступила в редакцию 16.10.2018.

L.I. Anatyчук^{1,2}, *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*

N.V. Pasechnikova³, *doctor Medical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National
Academy of Sciences of Ukraine*

V.O. Naumenko³, *doctor medical sciences, professor*

O.S. Zadorozhnyi³, *cand. Medical. of Sciences*

M.V. Havryliuk, *cand. Phys. - math. Sciences*

R.R. Kobylianskyi^{1,2}, *cand. Phys. - math. Sciences*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³State Institution “The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue
Therapy of the NAMS of Ukraine”, 49/51, Frantsuzskyi Boulevard,
Odesa, 65000, Ukraine

THERMOELECTRIC DEVICE FOR DETERMINING HEAT FLUX FROM THE SURFACE OF THE EYES

The paper presents the design and technical characteristics of a newly developed thermoelectric device for determining heat flux from the surface of the eyes. The device is

promising for the diagnosis and monitoring of ophthalmic diseases, which makes it possible to increase the efficiency of the early diagnosis of the pathology of the organ of vision, to observe the dynamics of the development of the pathological process in the structures of the eye, as well as to increase the effectiveness of treatment of acute and chronic eye diseases. The developed thermoelectric device allows real-time monitoring of the thermal and temperature state of eye surface, is original and has no world analogues. Bibl. 30, Fig. 8, Tabl. 2.

Key words: thermoelectric device, heat flux, ophthalmology.

References

1. Chebyshev N.V., Guzikova G.S., Lazareva Yu.B., Larina S.N. (2011). *Biologiya. Spravochnik.- 2 izdaniie, ispravlennoie i dopolnennoie [Biology. Handbook. 2nd ed., revised and enlarged]*. Moscow: GEOTAR-Media [in Russian].
2. Tsarev A.V. (2014). Tselevoi temperaturnyi menedzhment v klinicheskoi praktike intensivnoi terapii kriticheskikh sostoianii [Special-purpose temperature management in the clinical practice of intensive care of critical states]. *Meditsina neotlozhnykh sostoianii – Medicine of Emergencies*, 7, P. 186-191.
3. Kubarko A.I. (2014). *Normalnaia fiziologiya: Uchebnik. V 2 chastiakh. Chast 2. [Normal physiology:textbook. In 2 parts. Part 2]*. A.I.Kubarko (Ed.). Minsk: Vysheishaiia shkola [in Russian].
4. Dekusha L.V. (2016). Sredstva teplometrii na base termoelektricheskikh preobrazovatelei teplovogo potoka [Heat metering means based on thermoelectric heat flux converters]. *Doctor's thesis (Engineering)*.
5. Grishchenko T.G., Dekusha L.V., Vorobiov L.I. (2017). *Teplometriia: teoriia, metrologiia, praktika. Monografiia v 3 knigakh [Heat flow metering: theory, metrology, practice. Monograph in three books]*. T.G.Grishchenko (Ed.). *Kniga 1: Metody i sredstva izmereniia teplovogo potoka [Book 1: Methods and facilities of heat flow measurement]*. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics [in Russian].
6. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Zadorizhnyi O.S., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V., Kobylianskyi R.R., Havryliuk N.V. (2015). Originalnoie ustroistvo i podkhody k izucheniiu raspredeleniia temperatury v razlichnykh otdelakh glaza [Original device and approaches to studying temperature distribution in different sections of eye]. *Ophthalmologicheskii zhurnal - J. Ophthalmology*, 6, P. 50-53 [in Russian].
7. Gischuk V.S. (2012). Electronic recorder of signals from human heat flux sensors. *J.Thermoelectricity*, 4, P. 105-108.
8. Gischuk V.S. (2013). Electronic recorder with processing signals from heat flux thermoelectric sensor. *J.Thermoelectricity*, 1, P. 82-86.
9. Gischuk V.S. (2013). Modernized device for human heat flux measurement. *J.Thermoelectricity*, 2,P. 91-95.
10. Gischuk V.S., Kobylianskyi R.R., Cherkez R.G. (2014). Bahatokanalnyi prylad dlia vymiriuvannia temperatury i hustyny teplovykh potokiv [Multichannel device for temperature and heat flux density measurement]. *Naukovy visnyk Chernivetskoho Universytetu. Fyzyka.Elektronika – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Physics. Electronics*, 3 (1), 96-100 [in Ukrainian].

11. Kobylanskyi R.R., Boichuk V.V. (2015). Vykorystannia termoelektrychnykh teplomiriv u medychnii diagnostytsi [The use of thermoelectric heat flow meters in medical diagnostics]. *Naukovy visnyk Chernivetskoho Universytetu. Fyzyka.Elektronika – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Physics. Electronics*, 4 (1), 90-96 [in Ukrainian].
12. Anatyhuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylanskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Hushul I.Ya. (2016). Thermoelectric device for temperature and heat flux density measurement “Altec-10008”. *J.Thermoelectricity*, 1, 76-84.
13. Anatyhuk L.I., Yuryk O.Ye., Kobylanskyi R.R., Roi I.V., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., Yuryk N.Ye., Duda B.S. (2017). Thermoelectric device for the diagnosis of inflammatory processes and neurological manifestations of vertebral osteochondrosis. *J.Thermoelectricity*, 3, P. 54-67.
14. Anatyhuk L.I., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Termoelektricheskoe ustroistvo s elektronnyim blokom upravleniia dlia diagnostiki vospalitelnykh protsessov v organizme cheloveka [Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in human organism]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 6, 44-48 [in Russian].
15. Anatyhuk L.I. (1979). Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
16. Gerashchenko O.A. (1971). *Osnovy teplometrii [Fundamentals of heat flow metering]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
17. Ladyka R.B., Dakaliuk O.N., Bulat L.P., et al. (1996). Primeneniye poluprovodnikovyykh teplomerov v diagnostike i lechenii [The use of semiconductor heat flow meters in diagnostics and treatment]. *Meditssinskaia tekhnika – Biomedical Engineering*, 6, 36 – 37 [in Russian].
18. Anatyhuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylanskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya., Chuprovska Yu.Ya. (2018). Pro vplyv temperatury navkolyshniho seredovyscha na pokazy termoelektrychnykh sensoriv medychnoho pryznachennia [On the effect of ambient temperature on the readings of medical purpose thermoelectric sensors]. *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnologii – Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15 (1), 17-29 [in Ukrainian].
19. Mapstone R. (1968). Determinants of corneal temperature. *Brit. J. Ophthalmol.*, 52, 729-741.
20. Tan J.H., Ng E.Y.K., Acharya U.R., Chee C. (2009). Infrared thermography on ocular surface temperature: A review. *Infrared Phys. Techn.*, 52, 97–108.
21. Zadorozhnyy O.S., Guzun O.V., Bratishko A.Iu., et al. (2018). Infrared thermography of external ocular surface in patients with absolute glaucoma in transscleral cyclophotocoagulation: a pilot study. *J. Ophthalmol.*, 2, 23-28.
22. Galassi F., Giambene B., Corvi A., et al. (2007). Evaluation of ocular surface temperature and retrobulbar haemodynamics by infrared thermography and colour Doppler imaging in patients with glaucoma. *British Journal of Ophthalmology*, 91, 878–881.
23. Sodi A.A., Giambene B.A.D., Falaschi G.B., et al. (2007). Ocular surface temperature in central retinal vein occlusion: preliminary data. *European Journal of Ophthalmology*, 17, 755–759.
24. *Application for utility model № u201901535 of 15.02.2019.* (2019). Anatyhuk L.I., Kobylanskyi R.R., Bukharaieva N.R., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. Termoelektrychnyi

- prylad dlia vymiriuvannia temperatury i teplovoho potoku z poverhni ochei [Thermoelectric device for measurement of temperature and heat flux from the surface of eyes] [in Ukrainian].
25. *Patent of Ukraine № 93217* (2014). Anatyчук L.I., Konstantynovych I.A. Method for manufacturing thermoelectric microthermopile [in Ukrainian].
 26. *Patent of Ukraine № 117719* (2017). Anatyчук L.I., Kobylianskyi R.R. (2017). Method for manufacturing thermoelectric microthermopile [in Ukrainian].
 27. Anatyчук L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Manik O.M., Nitsovych O.V., Cherkez R.G. (2016). Technology for manufacturing thermoelectric microthermopiles. *J.Thermoelectricity*, 6, 49-54.
 28. Kim N.R. (2011). Comparison of Goldmann applanation tonometer, noncontact tonometer, and TonoPen XL for intraocular pressure measurement in different types of glaucomatous, ocular hypertensive, and normal eyes. *Curr. Eye Res.*, 36, 295-300.
 29. Anatyчук L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A. (2014). Hraduiuvannia termoelektrychnykh sensoriv teplovoho potoku [Calibration of thermoelectric heat flow sensors]. *Trudy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasni informatsiini ta elektronni tekhnologii" – Proc. of International scientific and practical conference "Modern Information and Electronic Technologies"* (Ukraine, Odessa, May 26-30, 2014). (Vol.2, pp.30-31) [in Ukrainian].
 30. Anatyчук L.I., Kobylianskyi R.R., Konstantynovych I.A., Lysko V.V., Pugantseva O.V., Rozver Yu.Yu., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *J.Thermoelectricity*, 5, 71-79.

Submitted 16.10.2018.



Микитюк П.Д.

Микитюк П.Д., канд. физ.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О.Ю., канд. физ.-мат. наук, доцент³

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyck@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет имени
Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина;

³Высшее государственное учебное заведение Украины
«Буковинский государственный медицинский университет»,
Театральная площадь, 2, Черновцы, 58002, Украина



Микитюк О.Ю.

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛА ТЕРМОПАРЫ ДЛЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены особенности применения термоэлектрического материала (ТЭМ) при конструировании термоэлектрических преобразователей (ТП) метрологического назначения. Сравнение математических выражений для основных параметров разных термоэлектрических устройств показало, что существуют существенные отличия в выборе ТЭМ для термопары ТП. В частности, максимальная термоэлектрическая эффективность ТЭМ z для ТП не всегда является определяющей с точки зрения обеспечения наилучших параметров ТП. Для ТП, помимо высоких значений z , важны максимальные значения термоЭДС ТЭМ и рациональное использование тепла, выделяемого нагревателем ТП (так называемый "конструктивный фактор"). Библиография: 12, рис. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, нагреватель, термопара, чувствительность, термоэлектрический материал.

Введение

Создание высокоточных приборов для измерения величин переменного тока является важной задачей современного термоэлектрического приборостроения. Повышение чувствительности таких приборов непосредственно связано с повышением чувствительности термоэлектрического преобразователя (ТП) метрологического назначения [1].

Увеличение чувствительности ТП в основном достигается за счет улучшения параметров термоэлектрического материала (ТЭМ). Однако, наряду с поиском новых ТЭМ и улучшением качества известных материалов, возможности увеличения добротности z которых на данном этапе практически исчерпаны, существуют возможности повышения параметров ТП за счет их конструктивного усовершенствования, в том числе оптимизации тепловых режимов работы с целью увеличения эффективности использования тепла, которое выделяется нагревателем ТП. Актуальной остается задача оптимального выбора ТЭМ именно для ТП, поскольку в этом

случае имеет место существенное отличие от использования ТЭМ для других термоэлектрических устройств, например, термогенераторов (ТЭГ), приемников излучения, охладителей и др.

Поэтому важной задачей и целью данной работы является установление и анализ особенностей применения ТЭМ именно при разработке ТП.

Отличия в выборе ТЭМ для разных типов термоэлектрических устройств

Известно [2], что применение полупроводникового материала для преобразователей тепловой энергии в электрическую привело к резкому улучшению их коэффициента полезного действия (КПД) и создало хорошие предпосылки для широкого использования таких преобразователей. В значительно меньшей мере изучены возможности улучшения параметров ТП метрологического назначения. Часто попытки использования ТЭМ, разработанных для применения в энергетике, не имели ожидаемого успеха. Это обусловлено тем, что ТЭМ, предназначенные для измерительной техники и метрологии, должны отвечать ряду дополнительных требований, которые не учитываются при разработке ТЭМ для других применений, в частности для термоэлектрических холодильников (ТЭХ) и устройств термоэлектрического нагрева.

При выборе ТЭМ для термопары ТП видоизменяются критерии оптимизации ТЭМ. Например, одним из основных параметров, определяющих качество термоэлектрических генераторов, является КПД. Для ТЭГ КПД η_{\max} в режиме максимальной мощности определяется выражением [3]:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{2}{z} - \frac{1}{4}(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – температуры горячих и холодных спаев, соответственно; z – термоэлектрическая добротность ТЭМ, определяемая по формуле:

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{x}, \quad (2)$$

где α – коэффициент термоЭДС, σ – электропроводность, x – теплопроводность.

Для характеристики ТЭХ используют холодильный коэффициент ε_{\max} , определяемый соотношением [4]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.5z(T_1 + T_2)} - T_1/T_2}{\sqrt{1 + 0.5z(T_1 + T_2)} + T_1/T_2}. \quad (3)$$

Отопительный коэффициент K_T для устройств термоэлектрического нагрева определяется так [5]:

$$K_T = \frac{z}{4} \left(\frac{T_2}{2} - \frac{T_1 - T_2}{zT_2} \right). \quad (4)$$

Формулы (1), (2), (3), (4) остаются корректными независимо от того, какой из вышеупомянутых типов устройства рассматривается. В этих формулах основным параметром, характеризующим эффективность устройств, является термоэлектрическая добротность z . Поэтому основным требованием, которое выдвигается к ТЭМ, является достижение максимально возможного значения z . Другим, не менее важным, требованием является сохранение добротности ТЭМ в широком интервале температур.

Лишь для небольшой группы измерительных приборов – приемников излучения, микрокалориметров, термопар найдены соотношения, из которых определяется связь между параметрами ТЭМ и основными характеристиками устройств с учетом возможности достижения ими предельных значений, ограниченных лишь тепловыми и температурными шумами [5].

Основными параметрами, которые описывают приемники излучения, являются способность к выявлению сигнала и вольт-ваттная чувствительность. Для микрокалориметров вводятся аналогичные параметры. Эти параметры давно исследованы и описаны в работах [3, 4]. Математические выражения для определения этих параметров не учитывают целый ряд дополнительных особенностей, присущих разным термоэлектрическим устройствам. Соответствующие выражения для реальных конструкций значительно сложнее [5]. В них в различных комбинациях входят параметры ТЭМ: α , σ , χ . Кроме требований достижения максимальной чувствительности, к ТЭМ для ТП предъявляется ряд дополнительных требований: стабильность в заданном диапазоне температуры, высокая временная стабильность и др.

Из приведенного видно, что требования, предъявляемые к ТЭМ, предназначенным для применения в ТЭГ, ТЭХ и тепловых насосах, существенно отличаются от требований к ТЭМ, предназначенным для конструирования ТП как измерительных приборов. Например, добротность ТЭМ является определяющей для ТЭГ, и его КПД при малых значениях zT зависит от добротности по закону, близкому к линейному. В то же время для измерительных приборов выражения, в которые входит z , определяются степенной зависимостью [6] от нее и другими коэффициентами. По этой причине условия оптимизации ТЭМ для достижения максимального значения чувствительности, быстродействия и др., будут различаться между собой. Кроме того, имеют место отличия в требованиях к ТЭМ для различных измерительных приборов [7]. Из-за этого не может быть создан универсальный ТЭМ, в равной степени пригодный для различных термоэлектрических изделий.

В измерительной системе с использованием ТП точность измерения величины переменного тока полностью зависит от качества ТП, которое в значительной степени определяется свойствами ТЭМ. Однако требования, выдвигаемые к ТЭМ для достижения предельно возможных параметров ТП, либо не в полной мере исследованы и определены, либо выбираются из соображений, которые не всегда следуют из физических принципов работы ТП, а обусловлены эксплуатационными подходами. В связи с этим часто возникают трудности с выбором оптимального варианта ТЭМ для ТП.

Связь основных параметров ТП со свойствами ТЭМ

Для определения методики выбора и оптимизации ТЭМ для ТП рассмотрим основные параметры ТП.

Наиболее важными параметрами, описывающими свойства ТП, являются те, которые определяют связь между входными (сила тока, напряжение) и выходными (термоЭДС

термопары, термоэлектрический ток, мощность в цепи термопары) величинами. Для описания этой связи в литературе [8] приняты:

а) чувствительность $S_I = \partial E_T / \partial I_H$, как отношение приращения термоЭДС термопары E_T к приращению тока I_H через нагреватель;

б) чувствительность $S_U = \partial E_T / \partial U_H$, как отношение приращения термоЭДС термопары E_T к приращению напряжения U_H ;

в) чувствительность $S_W = \partial E_T / \partial P_H$, как отношение E_T к мощности P_H , рассеиваемой нагревателем.

Для определения S_I и S_U используют формулы:

$$S_I = 2K_1 I_H, \quad (5)$$

$$S_U = 2K_2 U_H. \quad (6)$$

Коэффициенты преобразования K_1 и K_2 связаны соотношением:

$$K_1 = K_2 R_H^2, \quad (7)$$

где R_H – сопротивление нагревателя.

Коэффициент преобразования K_1 приблизительно можно записать в виде:

$$K_1 = \frac{\alpha R_H}{S \lambda}, \quad (8)$$

где S – поверхность теплообмена, λ – коэффициент теплоотдачи.

Выражения (5) и (6) для чувствительности S_I и S_U включают лишь один параметр ТЭМ – α . Формулы (5) и (7) верны лишь для некоторых типов ТП, в которых отвод тепла нагревателем значительно больше отвода тепла термопарой.

В большинстве конструкций ТП термопара и нагреватель подобны как по геометрическим размерам, так и по теплофизическим параметрам материалов. При этом, как показано в [8], теплопроводность термопары влияет на распределение температуры вдоль нагревателя. Поэтому выражения (5) и (6) не полностью учитывают физические процессы, имеющие место в ТП.

Вольт-ваттная чувствительность при малых перепадах температуры равна [8]:

$$S_W = \frac{\alpha r_T}{S \lambda}, \quad (9)$$

где r_T – тепловое сопротивление термопары, определяемое по формуле:

$$r_T = \frac{l_T}{\kappa S_T}, \quad (10)$$

где l_T и S_T – длина и сечение ветви термопары.

Вольт-ваттная чувствительность связана с коэффициентом преобразования K_1 соотношением:

$$S_W = \frac{K_1}{R_H}. \quad (11)$$

С учетом (11) общее выражение для чувствительности ТП можно записать в виде:

$$S_I = \frac{\alpha r_T R_H I_H}{S \lambda}. \quad (12)$$

Таким образом, выражение (12) определяет связь между основными параметрами термопары. Из формулы (12) видно, что S_I позволяет с большей определенностью установить зависимость свойств ТП от параметров ТЭМ, однако и чувствительность S_I не характеризует их в полной мере.

Для наиболее полного определения зависимости параметров ТП от свойств ТЭМ введем параметр чувствительности

$$S_\eta = \frac{P}{P_H}, \quad (13)$$

являющийся отношением мощности, полученной на электрической нагрузке термоэлемента к подводенной к ТП электрической мощности переменного тока. Для нахождения S_η рассмотрим эквивалентную схему бесконтактного ТП с нагрузкой r_H , приведенную на рис. 1.

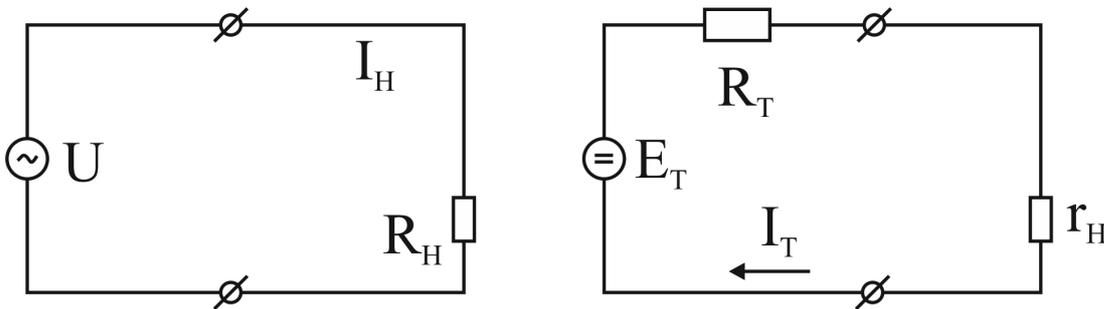


Рис. 1. Схема бесконтактного ТП с нагрузкой.

Если сопротивление нагрузки согласовано с сопротивлением термопары ($r_H = R_T$), то ТП работает в режиме, близком к режиму максимального КПД и тогда

$$S_\eta = \frac{E_T^2}{4R_T R_H I_H^2}. \quad (14)$$

С другой стороны, вольт-ваттная чувствительность S_η может быть записана через теплофизические параметры ТЭМ термопары в виде:

$$S_\eta = \frac{z(T_1 - T_2)}{4F_p}, \quad (15)$$

где F_p – коэффициент, характеризующий рациональность использования тепла, выделяемого нагревателем в ТП и равный:

$$F_p = \frac{2P_H r_T}{T_1 - T_2} \quad (16)$$

Формула (15) согласно [3] соответствует выражению для КПД ТЭГ при малых перепадах температуры в термопаре и условии, что параметры ТЭМ для термопары не зависят от температуры. Более того, выражение для S_η может быть записано [5] в виде:

$$S_\eta = \eta = \frac{(T_1 - T_2)\sqrt{1 + zT} - 1}{(T_1\sqrt{1 + zT} - T/T_1)F_p} \quad (17)$$

Из анализа (15) и (17) вытекает, что основные эксплуатационные параметры ТП задаются термоэлектрической добротностью ТЭМ z , рабочим перепадом $\Delta T = T_1 - T_2$ и коэффициентом F_p , зависящим от конструкции ТП.

Итак, увеличение чувствительности ТП может достигаться как увеличением z и ΔT , так и уменьшением коэффициента F_p . Однако увеличение ΔT однозначно ухудшает параметры ТП: квадратичность преобразования (коэффициент K_1 в формуле (5) становится зависимым от температуры), способность к перегрузкам по току, стабильность во времени вследствие старения металла нагревателя и ускорения процессов диффузии на сляках термопары. Поэтому существенное увеличение ΔT нецелесообразно.

Оценка рациональности конструкции ТП, учитывающая возможность уменьшения тепловых потерь за счет вакууммирования корпуса ТП или наполнения его инертными газами с малой теплопроводностью (например, ксеноном) [9, 10, 11], оптимальное соотношение геометрических размеров нагревателя и термопары, использование нагревателя с переменным сечением [12], оптимизирующее использование тепла от нагревателя, и др., существенно улучшают параметры ТП. Но основное увеличение чувствительности, тем не менее, обеспечивается путем использованием ТЭМ с максимальным значением z и коэффициентом термоЭДС α .

Вывод

Объединение различных вариантов повышения параметров ТП с использованием эффективных материалов на основе теллурида висмута создает благоприятные возможности для разработки ТП с предельными значениями чувствительности.

Литература

1. Анатычук Л.И. Дифференциальный термоэлектрический преобразователь переменного тока в режиме разновременного компарирования / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Д.Д. Ташук // Термоэлектричество. – 2015. – №4. – С. 77-82.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатычук - Киев: Наукова думка, 1979. – 768 с.
3. Охотин А.С. Термоэлектрические генераторы / А.С. Охотин, А.А. Ефремова, В.С. Охотин – М.: Атомиздат, 1971. – 288 с.
4. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы / Е.А. Коленко – Л.: Наука, 1967. – 282 с.
5. Анатычук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии. Том II / Л.И. Анатычук – Киев - Черновцы: Институт термоэлектричества. – 2003. – 376 с.
6. Шоль Ж., Марфон И., Монш М и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969. –

269 с.

7. Ando E. Radiation Thermocouples with $(BiSb)_2(TeSe)_3$. Jap. J. Appl. Phys. 13, N5, 1974, P. 363-369.
8. Рождественская Т.Б. Метрологические работы в области измерения тока, напряжения и мощности при повышенных частотах/ Т.Б.Рождественская // Тр. ин-тов Госкомитета.- 1964. – Вып.76 (136). – С.65-75.
9. Микитюк П.Д. О влиянии термопары на распределение температуры в нагревателе измерительного термопреобразователя / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк // Термоэлектричество. – 2018. – №1. – С. 64-59.
10. Анатычук Л.И. Монография. Физика термоэлектричества. Том I. – 2008. – 388 с.
11. Микитюк П.Д. О факторах влияния на точность термопреобразователей / П.Д. Микитюк // Термоэлектричество. – 2017. – №5. – С. 76-83.
12. Микитюк П.Д. Распределение температуры в нагревателе переменным поперечным сечением в термоэлектрическом преобразователе / П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк // Термоэлектричество. – 2018. – №2. – С. 79-74.

Поступила в редакцию 08.11.2018.

P.D. Mykytiuk, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)^{1,2}

O.Yu. Mykytiuk, Cand.Sc. (Physics and Mathematics),

Assistant Professor³

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine,

e-mail: anatyck@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³Higher State Educational Institution of Ukraine “Bukovinian State Medical University”, 2, Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

IN REFERENCE TO THE CHOICE OF THERMOCOUPLE MATERIAL FOR METROLOGICAL-PURPOSE THERMAL CONVERTERS

Peculiarities of application of thermoelectric material (TEM) in the design of metrological-purpose thermoelectric converters (TC) are considered. Comparison of mathematical expressions for the basic parameters of various thermoelectric devices showed that there are significant differences in the choice of TEM for the TC thermocouple. In particular, the maximum thermoelectric figure of merit Z for TC TEM is not always decisive in providing the best TC parameters. For TC, in addition to the high values of Z, the maximum values of thermoelectric material thermoEMF and the rational use of heat released by the TC heater (so-called "constructive factor") are important. Bibl. 12, Fig. 1.

Key words: *thermoelectric converter, heater, thermocouple, sensitivity, thermoelectric material.*

References

1. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Tashuk D.D. (2015). Differential thermoelectric AC converter in the non-simultaneous comparison mode. *J. Thermoelectricity*, 4, P.77 - 82.
2. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Okhotin A.S., Yefremov A.A., Okhotin V.S. (1971). *Termoelektricheskiye generatory [Thermoelectric generators]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].
4. Kolenko E.A. (1967). *Termoelektricheskiye okhlazhdaiushchie pribory [Thermoelectric cooling devices]*. Leningrad: Nauka [in Russian].
5. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektricheskiye preobrazovateli energii. Tom II. [Thermoelectric power converters. Vol.II]* Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
6. Shol J., Marfon I., Monsh M., et al. (1969). *Priiomyki infrakrasnogo izlucheniia [Infrared radiation receivers]*. Moscow: Mir [Russian transl].
7. Ando E. (1974). Radiation thermocouples with $(\text{BiSb})_2(\text{TeSe})_3$. *Jap. J. Appl. Phys.* 13 (5), P. 363 - 369.
8. Rozhdestvenskaia T.B. (1964). Metrologicheskiye raboty v oblasti izmereniia toka, napriazheniia i moshchnosti pri povyshennykh chastotakh [Metrological works in the field of measuring current, voltage and power at elevated frequencies]. *Trudy Institutov Goskomiteta - Proceedings of State Committee Institutes*, 76 (136), 65-75 [in Russian].
9. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, P.64 - 59.
10. Anatyshuk L.I. (2008). *Fizika termoelektrichestva. Tom I [Physics of thermoelectricity. Vol.I]* [in Russian].
11. Mykytiuk P.D. (2017). Factors of influence on the accuracy of thermal converters. *J. Thermoelectricity*, 5, P. 76 - 83.
12. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Temperature distribution in a heater with a resistance variable along its length in a thermoelectric converter. *J. Thermoelectricity*, 2, P. 79 - 74.

Submitted 08.11.2018.

Запаров С.Ф.¹, Захарчук Т.В.^{1,2}



Запаров С.Ф.

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы,
58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина



Захарчук Т.В.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

В настоящей работе приведены методы и оборудование для механического разрезания термоэлектрического материала с применением свободного абразива и струнами с закрепленными алмазными зернами. Пробныерезы показали, что точность и наиболее щадящий режим при обработке термоэлектрического материала достигают режущим инструментом с использованием вольфрамовой проволоки диаметром 0.11 - 0.14 мм. Библ. 3, рис. 9, табл. 2.

Ключевые слова: устройство для резки, инструмент для резки свободным абразивом, инструмент для резки связанным абразивом.

Введение

Процесс резки термоэлектрического материала имеет свои специфические особенности, поэтому прямое использование современного серийного оборудования для резки полупроводников не всегда оправдано применительно к термоэлектрическому материалу.

Технология резки является важной частью при обработке термоэлектрических материалов, качество резки существенно влияет на результаты и параметры термоэлектрических устройств.

Цель работы – исследования в лабораторных условиях разрезание термоэлектрического материала на малогабаритном настольном станке «Алтек – 13009» для случая, когда производительность не играет большой роли и есть возможность использовать два метода разрезания термоэлектрического материала инструментом со свободным и связанным абразивом.

Резка свободным абразивом

Перед началом резки заготовку необходимо прочно закрепить на неподвижном основании (рабочем столике). Наиболее распространенным способом является наклейка при помощи различных материалов, например, воска, канифоли, шеллака, глифталевой смазки.

После механической обработки разрезанные образцы отмывают от пициина с небольшим подогревом в специально подобранных растворителях.

Разрушение хрупкого термоэлектрического материала при обработке свободным абразивом заключается в следующем. Частицы абразива, в виде суспензии (карбид бора B_4C_3 , карбид кремния SiC , электрокорунд Al_2O_3), подают в зону резки, вдавливаясь в поверхность обрабатываемого термоэлектрического материала, они вызывают образование в ней микротрещин. В процессе обработки эти микротрещины увеличиваются и распространяются вглубь от поверхности. Дальнейшая обработка приводит к созданию сети трещин, которые, смыкаясь, вызывают сколы отдельных участков термоэлектрического материала. Отколовшиеся части удаляют с поверхности исходного образца. Таким образом, происходит послойное удаление материала и осуществляется механическая обработка исходного образца. Наличие жидкости способствует процессу обработки, так как абразивный порошок находится в жидкости во взвешенном состоянии и равномерно распределяется в ней. Это, в свою очередь, дает возможность распределения абразивных зерен по всей обрабатываемой поверхности. Абразивная суспензия достаточно хорошо отводит тепло из зоны резания и специального охлаждения не требует (рис. 1).

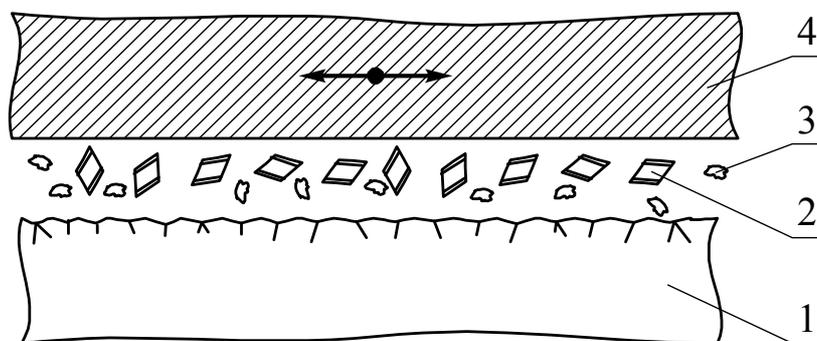


Рис. 1. Схема резки свободным абразивом.

1 – термоэлектрический материал; 2 – зёрна абразива;
3 – отделившиеся части термоэлектрического материала; 4 – инструмент.

Сменная проволочная пила, которая является режущим инструментом, представляет собой набор вольфрамовых струн, которые наматывают на рамку с максимальным натяжением, шаг задается пазами размерных планок (рис. 2).

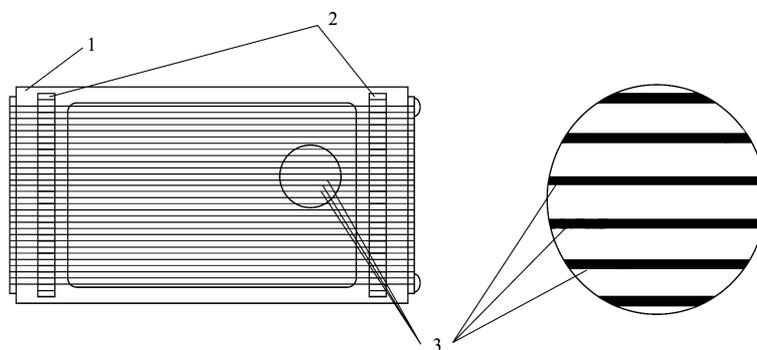


Рис. 2. Инструмент для резки струнами с использованием свободного абразива.

1 – инструмент; 2 – размерные планки; 3 – струны.

Режущий инструмент с использованием свободного абразива позволяет выполнять одновременно разрезку по всей плоскости пластины с точностью ± 0.01 мм. Но основное достоинство проволочной резки заключается в том, что при этом методе можно получить обработанные образцы с минимальными нарушениями структуры кристалла, возникающие в зоне контакта инструмента с обрабатываемыми образцами термоэлектрического материала (толщина нарушенного приповерхностного слоя $5 \div 15$ мкм). Однако ему присущи и ограничения (высота пластин не более 0.5 мм), которые не позволяют широко и эффективно использовать его при разрезании крупных заготовок. Поэтому рассмотренный способ применяется при резке на небольшую глубину в лабораторных условиях (рис. 3).

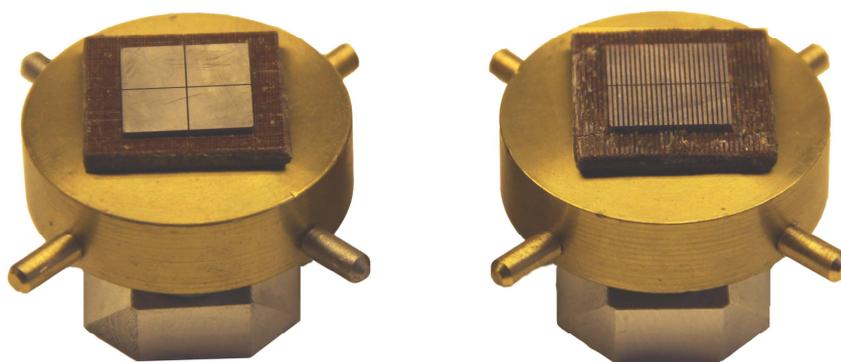


Рис. 3. Резка термоэлектрического материала свободным абразивом.

Резка связанным абразивом

Механизм резки проволочной пилой со связанным абразивом несколько отличается от обработки свободным абразивом. При обработке связанным абразивом к разрушению под действием нормальной силы, направленной перпендикулярно поверхности (случай обработки свободным абразивом), добавляется разрушения обрабатываемой поверхности за счет срезания микро-выступов, закрепленными в режущей кромке алмазными зернами. Нормальные усилия, передаваемые от рабочей кромки через зерна алмаза на заготовку термоэлектрического материала, вызывают появление микротрещин, которые, увеличиваясь в процессе обработки, распространяются вглубь, смыкаются, образуя выколотки. Затем эти выколотки выкрошиваются и удаляются из зоны обработки. Удаление продуктов резания и охлаждение режущей кромки струн осуществляется водой или 3.5 % водным раствором, который под давлением подается в зону обработки (рис. 4).

Сменная проволочная пила для резки термоэлектрического материала изготавливается по принципу, описанному выше, но для обработки связанным абразивом на поверхность проволоки наносят гальваническим методом алмазный микропорошок АСН 40/28 и закрепляют осаждением металлов переходной группы (кобальт, никель, хром) (рис. 5).

В настоящее время способ резания связанным абразивом является наиболее перспективным и прогрессивным из всех существующих. К преимуществам относится хорошее качество обработки поверхности, точность реза составляет ± 0.02 мм.

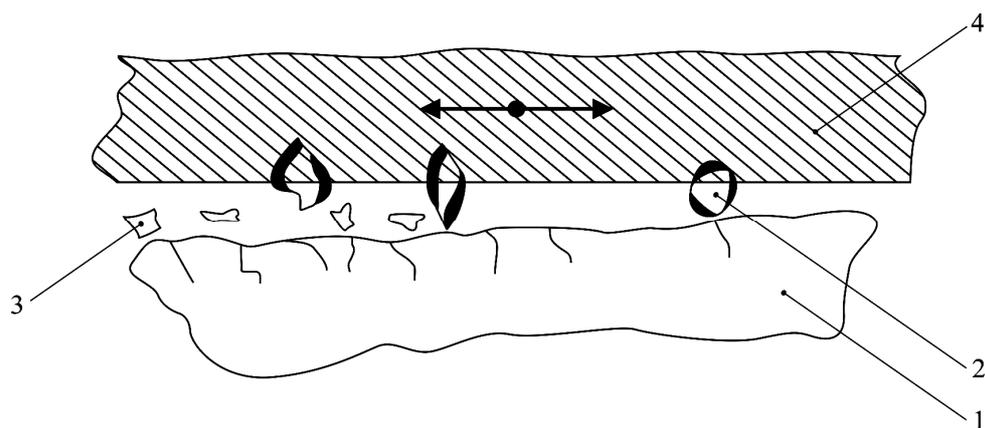


Рис. 4. Схема резки образца связанным абразивом.
1 – термоэлектрический материал; 2 – закрепленные зёрна абразива; 3 – отделённые части термоэлектрического материала; 4 – инструмент.

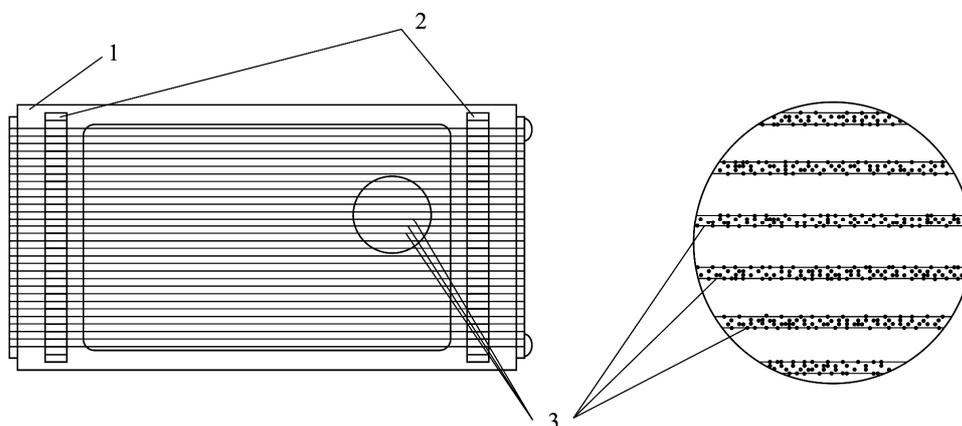


Рис. 5. Инструмент для резки струнами с закрепленными алмазными зёрнами.
1 – инструмент; 2 – размерные планки;
3 – струны с закрепленными алмазными зёрнами.

После механических операций на поверхности полупроводника остается нарушенный слой, который существенным образом влияет как на дальнейшую технологическую обработку (травление, окисление), так, в конечном счете, на параметры полупроводниковых приборов (рис. 6).

При перечисленных методах обработки (табл. 1), нарушенные приповерхностные слои обладают пониженными механическими свойствами, в результате чего прочность сцепления понижена, что снижает механическую прочность.

Таблица 1

Метод разрезания	Толщина нарушенного слоя, мкм
Струнная резка свободным абразивом	5 ÷ 15
Струнная резка с закреплёнными алмазными зёрнами	10 ÷ 25

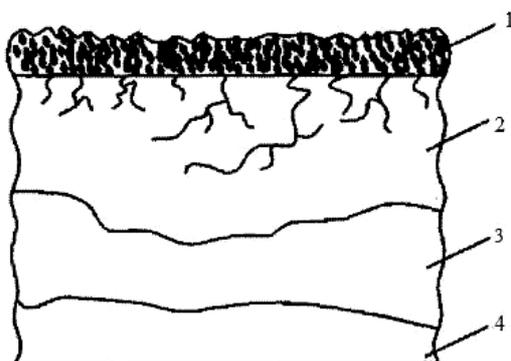


Рис. 6. Структура нарушенного при механической обработке поверхностного слоя.

1 – рельефный слой; 2 – микротрещины;
3 – область скопления дислокаций; 4 – монокристалл.

Малогабаритный настольный станок «Алтек-13009» предназначен для получения в лабораторных условиях образцов прямоугольной формы из термоэлектрического материала. На процесс резания существенное влияние оказывает скорость подачи заготовки (сила прижатия к рабочей кромки инструмента). При малых скоростях подачи заготовки ($0.1 \div 0.3$ мм /мин) производительность резки слишком мала. С увеличением скорости подачи ($0.4 \div 0.6$ мм/мин) производительность повышается, а точность обработки снижается за счет прогиба струн. Отрезаемая пластина будет иметь искривленную поверхность. При малой толщине пластины это может привести к ее разлому в процессе резки. Поэтому рекомендуется более низкая скорость подачи для тонких пластин и более высокая скорость подачи для более толстых пластин, нарушение приповерхностного слоя при этом составляет 10-25 мкм (рис. 7).



Рис. 7. Резка термоэлектрического материала связанным абразивом.

Рабочим инструментом станка является рамка с параллельно расположенными на ней проволоками. Станок позволяет производить разрезание в условиях малых деформирующих воздействий. Крепление рамки на движущейся каретке выполняется двумя прижимными гайками. Этими же гайками режущие струны выставляются параллельно к направлению

движения инструмента. Подшипниковое скольжение направляющих каретки обеспечивает точность и легкость их возвратно-поступательного движения. На малогабаритном настольном станке начало и конец процесса разрезания термоэлектрического материала контролируется индикатором ИЧ-10; устройство регулировки стола позволяет регулировать в горизонтальной плоскости по осям X , Y . Общий вид станка (рис. 8).

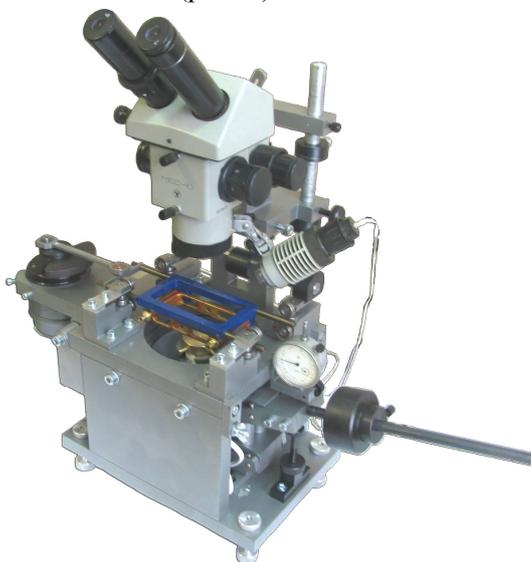


Рис. 8. Станок «Алтек – 13009».

Станок состоит из каретки с режущим инструментом 7, поступательно-возвратное движение которой осуществляется посредством шатуна 2; от электродвигателя 3 (СЛ-329 24В); узлов крепления каретки 4; механизма подъема-опускания стола 5, с противовесом регулировки давления на кромку режущего инструмента; системы регулировки глубины реза 8; индикатора 9 (ИЧ-10) для контроля глубины разрезания; приспособления подачи охлаждающей жидкости 11 (рис. 9).

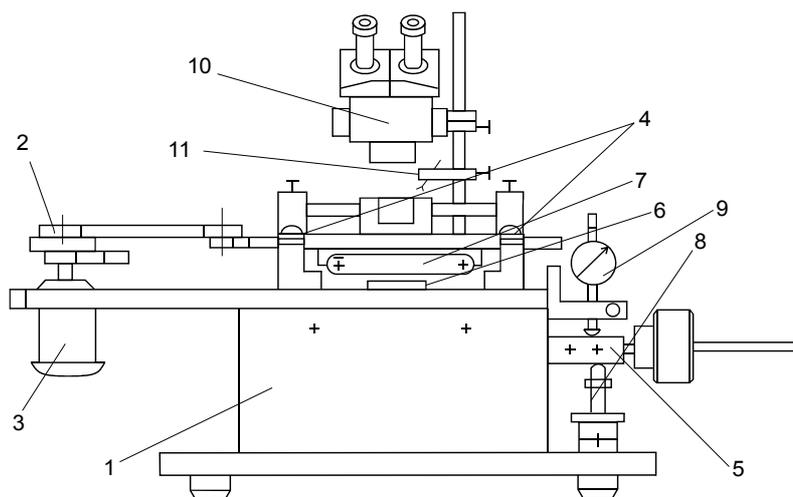


Рис. 9. Схема малогабаритного настольного станка.

- 1-станина; 2- блок привода; 3- электродвигатель СЛ-329 24В;
 4- узел крепления каретки; 5- механизм подъёма-опускания стола;
 6- материал; 7-режущий инструмент; 8-система регулировки и контроля глубины реза;
 9-индикатор ИЧ-10; 10- микроскоп МБС-10; 11- подача охлаждающей жидкости.

Основные технические данные и характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

№п/п	Характеристики	
1	Максимальные размеры заготовки для разрезания, мм	40 × 40 × 15
2	Число струн Ø 0.14 на рамке, минимальное, шт.	1
3	Число струн Ø 0.14 на рамке, максимальное, шт.	95
4	Ширина реза с алмазным покрытием, мм	0.22
5	Ширина реза со свободным абразивом, мм	0.15
6	Вес, кг, не более	30
7	Потребляемая электрическая мощность, Вт	60
8	Блок питания, CODEGEN 300W, шт	1
9	Габариты, мм	340 × 690 × 630

Выводы

1. Малогабаритный настольный станок экономичен по потреблению электроэнергии (60 Вт), не требует больших материальных затрат. Нарушение приповерхностного слоя при использовании свободного абразива составляет (5-15 мкм), а со связанным абразивом (10-25 мкм).
2. Станок для резки «Алтек-13009» удобен в эксплуатации для проведения исследовательской работы в лабораторных условиях.

Литература

1. Готра З.Ю. Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Львов: Каменяр, 1986.–287 с.
2. Сатыго А.В., Запаров С.Ф. О влиянии различных методов резания Bi_2Te_3 на свойства термоэлектрических модулей охлаждения // Термоэлектричество. – 2002. – №4.– С. 57–60.
3. Малогабаритный настольный станок для резки термоэлектрических материалов «Алтек – 13009». Рекламный проспект.

Поступила в редакцию 20.11.2018.

S.F. Zaparov, T.V. Zakharchuk

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

DEVICE FOR PRODUCING RECTANGULAR SAMPLES OF THERMOELECTRIC MATERIAL

This paper presents methods and equipment for mechanical cutting of thermoelectric material with the use of free abrasive and by the wires with fixed diamond grains. Trial cuts have shown that the accuracy and most sparing mode of thermoelectric material processing is achieved by cutting tool with the use of tungsten wire of diameter 0.11- 0.14 mm. Bibl. 3, Fig. 9, Table. 2.

Key words: cutting device, free abrasive cutting tool, bound abrasive cutting tool

References

1. Gotra Z.Yu. Spravochnik po tehnologii mikroelektronnyih ustroystv. – Lvov: Kamenyar. – 1986.–287c [in Russian].
2. Satigo A.V., Zaporov S.F.(2002) On the effect of various Bi_2Te_3 cutting methods on the properties of thermoelectric cooling modules. // J. Thermoelectricity, 4, P. 57-60.
3. Malogabaritnyiy nastolnyiy stanok dlya rezki termoelektricheskikh materialov «Altek – 13009». Reklamnyiy prospekt [in Russian].

Submitted 20.11.2018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

К опубликованию в профессиональном журнале принимаются научные работы, которые никогда не печатались раньше. Статья должна быть написана на актуальную тему, содержать результаты глубокого научного исследования, новизну и обоснование научных выводов согласно цели статьи (поставленной задачи).

Материалы, которые публикуются в журнале, подлежат внутреннему и внешнему рецензированию, которое осуществляют члены редакционной коллегии и международного редакционного совета журнала или специалисты соответствующей области. Рецензирование проводится конфиденциально. В случае негативной рецензии или наличия существенных замечаний статья может быть отклонена или возвращена автору (авторам) на доработку. В случае, когда автор (авторы) не соглашается(ются) с мнением рецензента, за решение редакционной коллегии может быть проведено дополнительное независимое рецензирование. После внесения автором изменений согласно замечаниям рецензента статьи подписывается в печать.

Редакционная коллегия имеет право на отказ в публикации рукописей, которые содержат опубликованные раньше данные, а также материалов, которые не отвечают профилю журнала или материалов исследований, которые были проведены с нарушением этических норм (например, конфликты между авторами или между авторами и организацией, плагиат и т.д.). Редакционная коллегия журнала оставляет за собой право редактировать и сокращать рукописи без нарушения авторского содержания. Отклонены рукописи авторам не возвращаются.

Представление рукописи к журналу

Рукопись статьи подается в редакцию журнала в бумажном варианте в двух экземплярах и в электронном виде на электронном носителе (диск, флешка). Электронный вариант статьи должен полностью отвечать бумажному варианту. Рукопис должен быть подписан всеми соавторами или ответственным представителем.

В отдельных случаях допускается вместо электронного носителя (диск, флешка) направлять статью по электронной почте.

Рукописи подаются на английском языке для англоязычных авторов. Для русскоязычных и украиноязычных авторов - на английском языке и, соответственно, российской или украинской. Формат страниц А4. Количество страниц – не больше 15 (вместе с литературой и расширенными аннотациями). По согласованию с редакцией число страниц может быть увеличено.

К рукописи добавляется:

1.Официальное письмо-направление, подписанный руководителем учреждения, где выполнялась работа.

2. Лицензионный договор о передаче авторского права (форму договора можно получить в редакции журнала или загрузить из сайта журнала – Договор.pdf). Лицензионный договор приобретает силу после принятия статьи в печать. Подписание лицензионного договора автором(ами) означает, что они ознакомлены и согласны с условиями договора.

3. Сведения о каждом с авторов – фамилия, имя, отчество полностью, должность, место работы, ученое звание, ученая степень, контактная информация (телефон, адрес электронной почты), код ORCID (при наличии). Сведения об авторах подаются:

авторами из Украины тремя языками – украинской, российской и английской;

авторами из стран СНГ двумя языками – российской и английской;

авторами с далекого зарубежья – на английском языке.

4. Носитель информации с текстом статьи, рисунками, таблицами, сведениями об авторах в электронном виде.

5. Цветная фотография автора(ив). Черно-белые фотографии редакция журнала не принимает. При числе авторов больше двух их фотографии не приводятся.

Требования к оформлению статьи

Статья должна быть структурирована за такими разделами:

- *Введение*. Содержит постановку проблемы, актуальность избранной темы, анализ последних исследований и публикаций, цель и задачи.

- *Изложение основного материала* исследования и полученных результатов.

- *Выводы*, где подведенные итоги работы и перспективы дальнейших исследований в этом направлении.

- *Список использованной литературы*.

Первая страница статьи содержит информацию:

1. в верхнем левому углу – индекс УДК (для авторов из Украины и стран СНГ);
2. фамилия и инициалы, ученая степень и ученое звание автора(ив);
3. название учреждения, где работает автор(ы); почтовый адрес, номер телефона, адрес электронной почты автора(ив);
4. название статьи;
5. аннотация к статье – не больше 1 800 знаков. Аннотация должна отображать последовательную логику описания результатов и описывать основные цели исследования, суммировать наиболее значимые результаты;
6. ключевые слова – не больше 8-ми слов.

Текст статьи печатается шрифтом Times New Roman размером 11 пт, междустрочный интервал 1.2 на бумаге формата А4, выравнивание по ширине. В статье не должно быть переносов слов.

Параметры страницы: «зеркальные поля» верхнее поле – 2.5 см, нижнее поле – 2.0 см, внутри – 2,0 см, извне – 3,0 см, от края до колонтитула верхнего и нижнего – 1.27 см.

Графические материалы, фотографии подаются цветными, в порядке исключения черно – белыми, в форматах .eps или .cdr, допускается в форматах .jpg или .tif. По желанию автора таблицы и часть текста также могут быть цветными.

Рисунки печатаются на отдельных страницах. Текст на рисунках должен быть выполнен шрифтом 10 пт. На графиках единицы измерения указываются через кому. Рисунки нумеруются в порядке их расположения в тексте, части рисунков нумеруются буквами – а, б, .. На обороте рисунка карандашом пишется название статьи, автор(авторы), номер рисунка. Сканированные рисунки и графики вставлять не допускается.

Таблицы подаются на отдельных страницах и должны быть выполнены с использованием табличного редактора Msword. Использование символов псевдографики для оформления таблиц недопустимо.

Формулы необходимо набирать в редакторах формул Equation или Mathtype. Статьи с формулами, вписанными от руки, в печать не принимаются. Необходимо давать определение (дефиницию) величин, которые впервые упоминаются в тексте, а дальше пользоваться соответствующим сроком.

Подписи к рисункам и таблицам печатаются в рукописи после списка литературы.

Список использованных литературных источников приводится в конце статьи. Ссылка на литературные источники нумеруются последовательно в порядке их цитирования в тексте статьи. Ссылка на неопубликованные и незавершенные работы недопустимы.

Внимание! В связи с включением журнала к международным библиографическим - реферативным баз данных, список литературы должны составляться с двух блоков: ЛИТЕРАТУРА

и REFERENCES (это требование действует и для англоязычных статей):

ЛИТЕРАТУРА – источника языком оригинала, оформленные согласно украинскому стандарту библиографического описания ДСТУ 8302:2015. С помощью VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>). Вы можете автоматически, быстро и легко оформить Ваш «Список использованных источников» согласно требованиям Государственной аттестационной комиссии (ДАК) Украины и оформить ссылку на научные источники в Украине понятно и унифицировано. В этом портале облегчено процедуры оформления научных источников при написании Ваших публикаций, диссертаций и других научных работ.

REFERENCES – тот же список литературы, транслитерированный в романском алфавите (рекомендации за международным библиографическим стандартом APA-2010, правила к оформлению транслитерированного списка литературы References на сайте <http://www.dse.org.ua>, раздел для авторов).

Для ускорения публикации статьи просим соблюдать следующих правил:

- В верхнем левому углу первой страницы статьи – индекс УДК;
 - инициалы и фамилия авторов;
 - научная степень, ученое звание;
- с красной строки шрифтом Times New Roman размером 12 пт, междустрочный интервал 1.2 выравнивание по центру;
- название организации, адрес (улица, город, индекс, страна), электронный адрес авторов; с новой строки на 1 см ниже инициалов и фамилии авторов шрифтом Times New Roman размером 11 пт, междустрочный интервал 1.2 выравнивание по центру;
 - название статьи размещается на 1 см ниже названия организации, заглавными буквами полужирным шрифтом New Roman размер 12 пт, междустрочный интервал 1.2 выравнивание по центру. Название статьи должно быть конкретной и по возможности короткой;
 - аннотация размещается на 1 см ниже названия статьи шрифтом Times New Roman размером 10 пт, курсивом, междустрочный интервал 1.2 выравнивание по ширине украинской или российской (для украиноязычных и русскоязычных авторов соответственно) и английской языками;
 - ключевые слова размещаются ниже аннотации шрифтом Times New Roman размером 10 пт, междустрочный интервал 1.2 выравнивание по ширине. Язык ключевых слов отвечает языку аннотации. Заголовок «Ключевые слова» - шрифт Times New Roman, размер 10 пт, полужирный;
 - основной текст статьи размещается на 1 см ниже аннотации из абзаца 1 см, шрифт Times New Roman, размер 11 пт, междустрочный интервал 1,2 выравнивание по ширине;
- формулы набирают в редакторе формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Размер шрифтов: «обычный» - 12 пт, «крупный индекс» - 7 пт, «мелкий индекс» - 5 пт, «крупный символ» - 18 пт, «мелкий символ» - 12 пт). Формула размещается по тексту, выравнивается по центру и не должна занимать больше 5/6 ширины строки, нумерация формул в круглых дужках дело;

(размерности всех величин, которые используются в статье, подаются в системе СИИ, используемые символы должны быть объяснены;

(рисунки размещаются по тексту. Рисунки и фотографии должны быть четкими и контрастными; осы графиков - параллельными к краям листка, отстраня тем самым возможность появления сдвига углов при масштабировании; рисунки в журнал подаются цветными, черно-белые - редакция журнала не принимает;

(таблицы размещают по тексту. Ширина таблицы должна быть на 1 см меньшая ширины

строки. Над таблицей указывают ее порядковый номер, выравнивание по правому краю. Нумерация таблиц по всему тексту статьи сквозная. Название таблицы размещается под ее номером, выравнивание по центру;

(список литературы приводят в конце статьи. Ссылка на литературу указывают по тексту в квадратных дужках. Последовательность источников в списке литературы должны отвечать порядку их вспоминание в тексте. Ниже приведенные примеры разных типов ссылок на литературу.

Примеры оформления ссылок на литературные источники для ЛИТЕРАТУРЫ

Статьи в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Экспериментальные исследования термоэлектрического автомобильного предпускового нагревателя на дизельном топливе. *Термоелектричество*. 2016. №4. С.84-94.

Книги

Анатичук Л.І. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Научная мысль, 1979. 768 с.

Патенты

Патент Украины № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоэлемент

Материалы конференций

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Материалы XVII Международного форума по термоэлектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновцы, 2017. 64 с.

Авторефераты диссертаций

Кобилянський Р.Р. *Термоэлектрические приборы для лечения заболеваний кожи.*: автореф. дис. физ.-мат. наук. Черновцы, 2011. 20 с.

Примеры оформления ссылок на литературные источники для REFERENCES

Статьи в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

Книги

Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

Патенты

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.B., Nitzovych O.V. Thermoelements [In Ukrainian].

Материалы конференций

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9th International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

Авторефераты диссертаций

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].