

РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛАБОРАТОРЕН МОДЕЛ НА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕН ГЕНЕРАТОР

д-р Никола Драганов

Технически университет – Габрово, катедра „Електроника”,
лаборатория по ”Сензорна техника”

Анотация. Известни са различни видове източници на електроенергия, работещи на базата на различни физични принципи – пиезоелектричен, пироелектричен, фотоволтаичен, пиезоелектричен, термоелектричен и др. Интерес за електрониката представлява термоелектрическият ефект, проявяващ се в полупроводникови структури.

Настоящата статия е посветена на създаването на електроенергия от полупроводников термоелектрически генератор, създаден на базата на елемент на Пелтие. Представено е аналитично описание на термогенериращия процес. Представена е конструкция на разработения лабораторен термоелектричен модел и експериментални електрически схеми за неговото изследване. Проведени и описани са експериментални изследвания, доказващи генерацията на термоелектродвижещо напрежение. Разработката намира конкретно приложение в електрониката и микроелектрониката за изграждане на вградени запазващи термоелектрични системи и интегрални микросистеми с вградени термоелектрически източници на енергия.

Ключови думи: Термоелектрически генератор, системи за събиране на електроенергия, алтернативни източници на енергия, вградени запазващи източници.

Въведение. Алтернативните източници най-често се свързват с енергията, създадена от слънцето, вятъра, приливите и отливите и инсталациите за нейното преобразуване – вятърни турбини, фотоволтаични панели и водни централи. Уви, полупроводниковите термоелектрически елементи още не са достигнали такава висока ефективност, за да се разчита на електроенергия от тях. За сега те се използват за охлаждане и загряване в различни обеми и обекти, а работейки в генераторен режим, термоелектрическите елементи се вграждат в микроелектронни конструкции за запазване на отделни електронни блокове в интегралните схеми от създадената от тях топлина, активни антикорозионни системи на тръбопроводи и автомобилни купета, плавателни съдове и др. Създаването на електроенергия за бита и други от термоелектрически елементи с необходимата мощност е все още неудачно, въпреки че доста статии и дисертационни трудове се опитват да наложат това неправилно за сега мислене „...колко е ефективно термоелектричеството за бита...”.

Термоелектрическият генератор е полупроводниково термоелектрическо устройство, което се състои от полупроводников термоелектрически блок и е предназна-

чено за директно преобразуване на топлината енергия в електрическа такава [1, 2, 3].

Целта на настоящата разработка е да даде анализ, описващ електронните процеси в термоелектрическия елемент, и реален модел на практически реализиран лабораторен модел на термоелектрически генератор, на базата на термоелектрическа батерия (стандартен елемент на Пелтие) и анализирани на неговите основни характеристики на база реални експериментални изследвания.

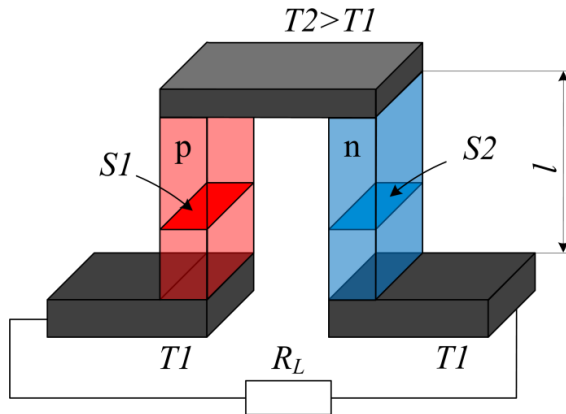
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЕЛЕМЕНТ АНАЛИЗ

В съответствие с предназначението си един от основните параметри на термоелектрическите генератори е коефициентът на полезно действие (к.п.д.), т.е. това е отношението на полезната мощност, отделена в товара, включен към генератора, към количеството топлина, постъпващо за единица време в топлопоглъщащите зони [2].

Ако относителните съпротивления на клоновете на термоелемента са ρ_1 и ρ_2 , пътя който изминава електрическият ток (височината на клоновете) е l и отделните клонове са със сечение S_1 и S_2 (фиг.1), то за пълното съпротивление на термоелемента може да се запише:

$$R = \frac{\rho_1 \cdot l}{S_1} + \frac{\rho_2 \cdot l}{S_2} \quad (1)$$

Преходното съпротивление на спойките на двата клона с металните контактни пластини е пренебрежимо спрямо съпротивлението на самите клонове на елемента.



Фиг. 1. Термоелектрически елемент

Пълната топлопроводимост на термоелектрическият елемент може да се изрази чрез относителната топлопроводимост на двата клона:

$$K = \frac{\kappa_1 \cdot S_1}{l} + \frac{\kappa_2 \cdot S_2}{l} \quad (2)$$

В резултат на поглъщането на топлина от топлопоглъщащата спойка или от източника на топлинна енергия към топлоотделящата спойка за единица време се предава следното количество топлина:

$$Q_K = K(T_2 - T_1). \quad (3)$$

Като се има предвид, че термоелектродвижещото напрежение е пропорционално на коефициента на термо-е.д.н. $\alpha_{1,2}$ и разликата в температурите ΔT на двете страни на елемента ($\varepsilon = \alpha_{1,2} \cdot \Delta T$), то за електрическият ток, протичащ във веригата на термоелемента може да се запише:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\alpha_{1,2} \cdot (T_2 - T_1)}{R + R_L}, \quad (4)$$

където: R – съпротивлението на клоновете на елемента, R_L – съпротивлението на товара, включен във външната верига. Или в товара ще се отдели полезна мощност с големината:

$$P_L = I^2 \cdot R_L = \frac{\alpha_{1,2}^2 \cdot (T_2 - T_1)^2 \cdot R_L}{(R + R_L)^2}. \quad (5)$$

Токът, протичащ във веригата на термоелектрическият елемент, включен като генератор, се обуславя от ефекта на Зеебек, който предизвиква първо проява на ефекта на Пелтие с отделяне и поглъщане на топлина, и второ отделяне на Джаулова топлина в двата клона на термоелемента. Посоката на тока в термоелемента съответства на погълнатата топлина за единица време от топлопоглъщащата страна. Тя може да се даде с израза:

$$Q_{P2} = \alpha_{1,2} \cdot I \cdot T_2. \quad (6)$$

Ефектът на Пелтие се заключава в напompване на определено количество топлина от топлопоглъщащата страна към топлоотделящата, като така се увеличава проводимостта на термоелемента. В резултат на това топлината, отделена на топлоотделящата страна, ще бъде:

$$Q_{P1} = \alpha_{1,2} \cdot I \cdot T_1. \quad (7)$$

От разликата в стойностите на T_1 и T_2 стойностите на Q_1 и Q_2 също ще са различни. Като се има предвид, че $\varepsilon = \alpha_{1,2} \cdot \Delta T$, то разликата на уравнения (7) и (6) ще бъде:

$$Q_{P2} - Q_{P1} = \alpha_{1,2} \cdot I \cdot (T_2 - T_1) = \varepsilon \cdot I = I^2 (R + R_L). \quad (8)$$

По този начин електрическата мощност, генерирана от термоелектрическият елемент, е в резултат на разликата в топлината, отдадена от източника към топлопоглъщащата страна, и топлината, пренесена на топлоотделящата страна в резултат на ефекта на Пелтие. Една част от тази електрическа мощност се отделя в товара като полезна мощност ($I^2 R_L$), а друга ($I^2 R$) във вид на Джаулова топлина в клоновете на термоелемента. В първо приближение може да се счита, че Джауловата топлина се разпределя на половина между топлата и студената страна, т.е. към източника на топлина се връща мощност:

$$\frac{Q_J}{2} = \frac{I^2 R}{2} = \frac{\alpha_{1,2}^2 \cdot (T_2 - T_1)^2 \cdot R}{2 \cdot (R + R_L)^2}. \quad (9)$$

Определяйки количеството топлина, постъпваща за единица време на топлопогъл-

щачата спойка (топлата страна) на термоелемента от източника на топлинна енергия, и отчитайки Джауловата ѝ съставка, връща енергия към източника при протичане на електрически ток през веригата, то к.п.д. на термоелемента може да се определи по следния начин:

$$\eta = \frac{P_L}{Q_K + Q_{P2} - 0,5Q_J} \quad (10)$$

Ако разпишем уравнение (10) отчитайки уравнения (5-9) за к.п.д. се получава:

$$\eta = \frac{\alpha_{1,2}^2 \cdot (T_2 - T_1)^2 R_L}{(R + R_L)^2} \cdot \frac{R}{K(T_2 - T_1) + \frac{\alpha_{1,2}^2 \cdot (T_2 - T_1)}{R + R_L} - \frac{\alpha_{1,2}^2 \cdot (T_2 - T_1)^2 R}{2(R + R_L)^2}} \quad (11)$$

Ако се замести отношението на съпротивлението на двата клона на термоелемента към съпротивлението на товара с $G=R/R_L$ в уравнение (1), за R_L следва:

$$R_L = G \cdot R = G \cdot l \cdot \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right), \quad (12)$$

$$\text{обаче, } R - R_L = (G + 1)R = (G + 1)l \cdot \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right), \quad (13)$$

Следователно, ако уравнения (2), (12) и (13) се заместят в уравнение (11), то к.п.д. ще бъде:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{G}{G+1}}{1 + \frac{K \cdot R \cdot (G+1)}{\alpha_{1,2}^2 \cdot T_2} - \frac{T_2 - T_1}{2(G+1) \cdot T_2}} \cdot (14)$$

Първият множител на последното уравнение представлява коефициента на полезно действие на обратима топлинна машина, а вторият множител характеризира намаляването на к.п.д. в резултат на необратими загуби в топлопроводимостта и Джаулова топлина в термоелектричния елемент. Произведението $K \cdot R$ зависи от параметрите на материала ($\rho_1, \rho_2, \kappa_1, \kappa_2$) на клоновете на термоелемента и токовете сечения (S_1, S_2) на отделните клонове. Най-голямо к.п.д. се осигурява при избор на такова сечение на клоновете, че $K \cdot R$ да е възможно най-малко.

Отношението $\alpha_{1,2}^2 / K \cdot R$ отразява описаната обратна пропорционалност, като:

$$(K \cdot R)_{MIN} = \left(\sqrt{\kappa_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\kappa_2 \cdot \rho_2} \right)^2, \quad (15)$$

или за ефективността на термоелектрически елемент може да се запише:

$$Z = \frac{\alpha_{1,2}^2}{\left(\sqrt{\kappa_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\kappa_2 \cdot \rho_2} \right)^2} \cdot (16)$$

Коефициентът на п. д. на термоелемента с оптимални размери зависи от следните фактори: ефективност на термоелемента (определя се от електрофизичните параметри на полупроводниковия материал, от който са изработени клоновете на елемента); разлика в температурата на слоевете на двете страни; отношение на съпротивлението на товара към съпротивлението на термоелемента.

Често пъти от термоелемента трябва да се получи максимална мощност, даже за сметка на к.п.д.. В този режим на работа съпротивлението на товара трябва да бъде равно на съпротивлението на термоелемента ($G=1$). Тогава за к.п.д. се получава:

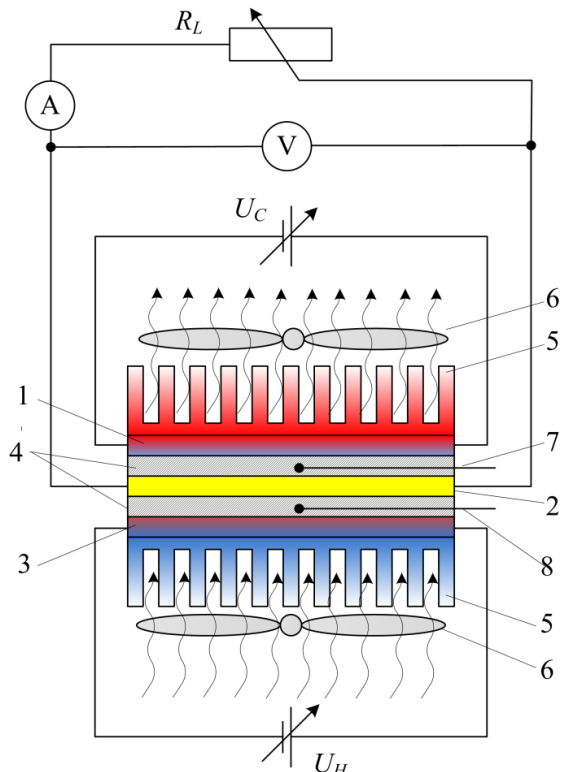
$$\eta_{G=1} = 0,5 \frac{T_2 - T_1}{T_2 + \frac{2}{Z} - \frac{(T_2 - T_1)}{4}} \quad (17)$$

Коефициентът на термо-е.д.н. на повечето термоелектрически елементи е от порядъка на 300 до 500 $\mu\text{V/K}$. Трябва да се отчете, че почти всички термоелектрически генератори работят с разлика в температурите не по-голяма от 600K, при което от един термоелектрически елемент се получава около 0,3V. За да се получат високи стойности на генерираното напрежение и за доброто съгласуване с реални товарни съпротивления е необходимо последователно включване на много термоелектрически елементи.

Полупроводниковите термоелектрически батерии представляват множество последователно включени термоелектрически елементи [1, 2]. Те се изработват с разнообразни форми и размери, удовлетворяващи изискванията на проектантите на устройствата с тях.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ГЕНЕРАТОР ЕКСПЕРИМЕНТ

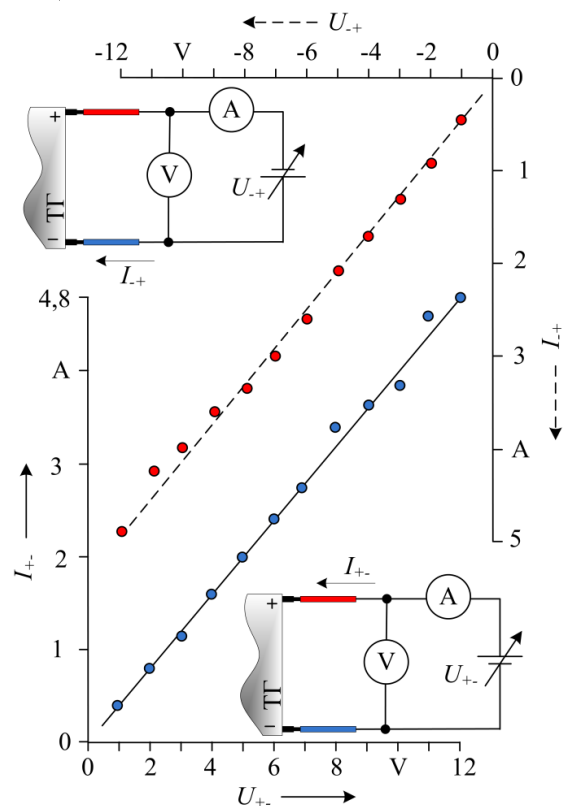
На базата на термоелектрически батерии, използвани за охлаждане и загряване, известни с неправилно навлязлото наименование елементи на Пелтие, е реализиран и изследван реален лабораторен термоелектрически генератор. Скица на неговата конструкция и начинът на електрическото включване на батериите са показани на фиг.2.



Фиг. 2. Конструкция и електрическо включване на лабораторния модел на термоелектрически генератор

Лабораторният модел на реализирания термоелектрически генератор се състои от три термоелектрически батерии, монтирани последователно по температурен поток. В модела са използвани три термоелектрически батерии. Две от тях (1 и 3) работят в режим на генериране на температурна разлика (режим на Пелтие), а между тях (термобатерия 2) работи в режим на термоелектричен генератор (ТГ). Конструкцията е създадена по такъв начин, че да може да се проведат експериментални изследвания на термоелектрическия генераторен елемент 2 с възможност за плавно управление на температурата на двете му страни. По този начин, управлявайки напреженията на двата

крайни термоелектрически елемента (термобатерии), се управлява температурната разлика на този между тях (на нагряващия – U_H и на охлаждащия – U_C). Така термоелемент 1 ще създава отрицателен градиент на температурата, а термоелемент 3 положителен. Между всяка термоелектрическа батерия е поставена по една пластина (4) от електротехническа мед с площ и дебелина равни на дебелината на една термобатерия. Това е необходимо при този тип конфигурация на конструкцията от гледна точка на предпазване на термоелектрическите батерии, задаващи температурата, с допълнително увеличаване на техния температурен капацитет.



Фиг. 3. Експериментални волтамперни характеристики на термоелектрическия генератор и схемите, по които са заснети

Освен температурен капацитет, вградените медни пластини 4 дават възможност за правилно и адекватно измерване на температурата на топлата и студената страна на термоелектрическия генератор. В реализирания модел това е постигнато чрез вграждане на сензори за температура (7 и 8) във всяка от медните пластини 4, (фиг.2 и фиг.8) [4]. При изследването на термоелек-

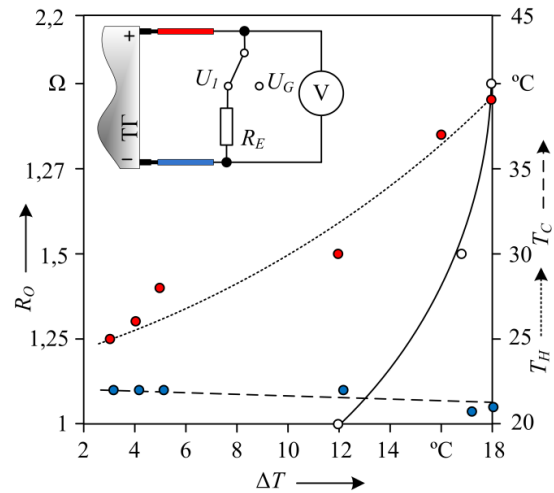
трическите режими не е нужно да се използват скъпи термометри, инфрачервени термометри или термовизия. Най-правилният и точен метод за измерване на температурата без наслагване грешки е тя да се измерва в точката, в която се създава [3]. Според направеното от автора проучване този модел на температурно измерване не е реализиран в нито един от досега реализираните такива ТГ. При всички тях температурата се измерва косвено от топлопровод или безконтактно, което е абсолютно некоректно от гледна точка на правилното поставяне на експеримента [3, 4].

За стабилен режим на работа на задаващите температурната разлика термоелектрични елементи на техните външни повърхности са монтирани масивни алуминиеви охладители 5 с възможност за принудително охлаждане чрез управляеми вентилатори 6.

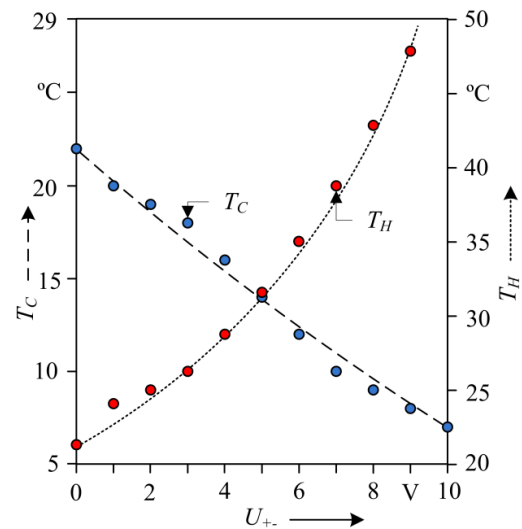
На фиг. 3 са показани волтамперните характеристики на термоелектрическата батерия, използвана за ТГ. На същата са показани и електрическите схеми на включване при заснемането на характеристиките. Както се вижда от тях те са симетрични в първи и трети квадрант на координатната система, а също така са и линейни за зададения обхват на изменение на напрежението ($U_{+} = |U_{-}| = 0 \div 12V$).

Следователно, използваният термоелектрически елемент е симетричен и ще генерира симетрично напрежение (U_G) при създаване на температурна разлика ΔT на чувствителните му повърхности.

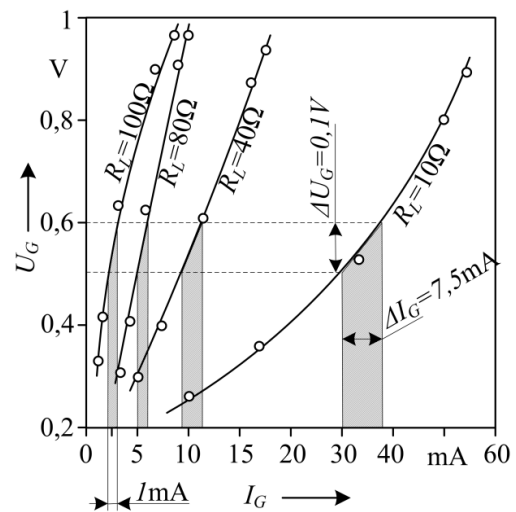
На фиг. 4 са показани експериментални характеристики, отразяващи зависимостта на изходното съпротивление R_O на ТГ в процес на генериране и външносъздадените температури на топлопоглещащата (T_C) и топлоотдаващата (T_H) повърхности на ТГ от температурната разлика ΔT . Последната е получена като: $\Delta T = T_H - T_C$. Показана е и електрическата схема за определяне на изходното съпротивление на ТГ, фиг.4. Анализът на характеристиката показва запазване на ниско $R_O = 1\Omega$ в широк обхват на изменение на температурите $\Delta T \leq 12^{\circ}C$. В края на обхвата $12 \leq \Delta T \leq 18^{\circ}C$ R_O се повишава само до 2Ω . Следователно ТГ е стабилен в изследвания обхват на $\Delta T = 0 \div 18^{\circ}C$.



Фиг. 4. Експериментални характеристики, отразяващи зависимостите на $R_O = f(\Delta T)$, $T_H = f(\Delta T)$ и $T_C = f(\Delta T)$



Фиг. 5. Експериментални преобразователни характеристики $T_H = f(U_{+})$ и $T_C = f(U_{+})$



Фиг. 6. Експериментални товарни характеристики $U_G = f(I_G)$, $R_L = \text{const}$

С цел експериментално опознаване на термоелектрическият елемент, използван като ТГ, експериментално са получени зависимости $T_H=f(U_{+})$ и $T_C=f(U_{+})$, фиг. 5. Те отразяват създаваните температури (T_H и T_C) от самия термоелектрически елемент при захранването му с положително напрежение U_{+} от външен регулируем източник. При изменение на напрежението U_{+} на неговите изводи от 0 до 10V температурите му се изменят от стайната ($\sim 22^{\circ}\text{C}$) до 8°C на студената му страна и до 53°C на топлата страна.

Експериментално са заснети и товарните характеристики на ТГ, показани на фиг.6. Те отразяват зависимостта на генерираното от генератора напрежение U_G при постоянна температурна разлика ΔT и включен товар R_L към неговите електрически изводи. Съгласно уравнение (17) най-голям к.п.д. ТГ проявява при товарно съпротивление, равно на това на термоелектрическият елемент. Затова за товарни са избрани стойности на R_L между 10Ω и 100Ω . Установено е намаляване на стръмността на характеристиката с намаляване на R_L . Също така с увеличаването на товара, т.е. намаляване на R_L , изходният ток расте, а заедно с това се увеличава нелинейността на характеристиката. Последното се дължи на появата на

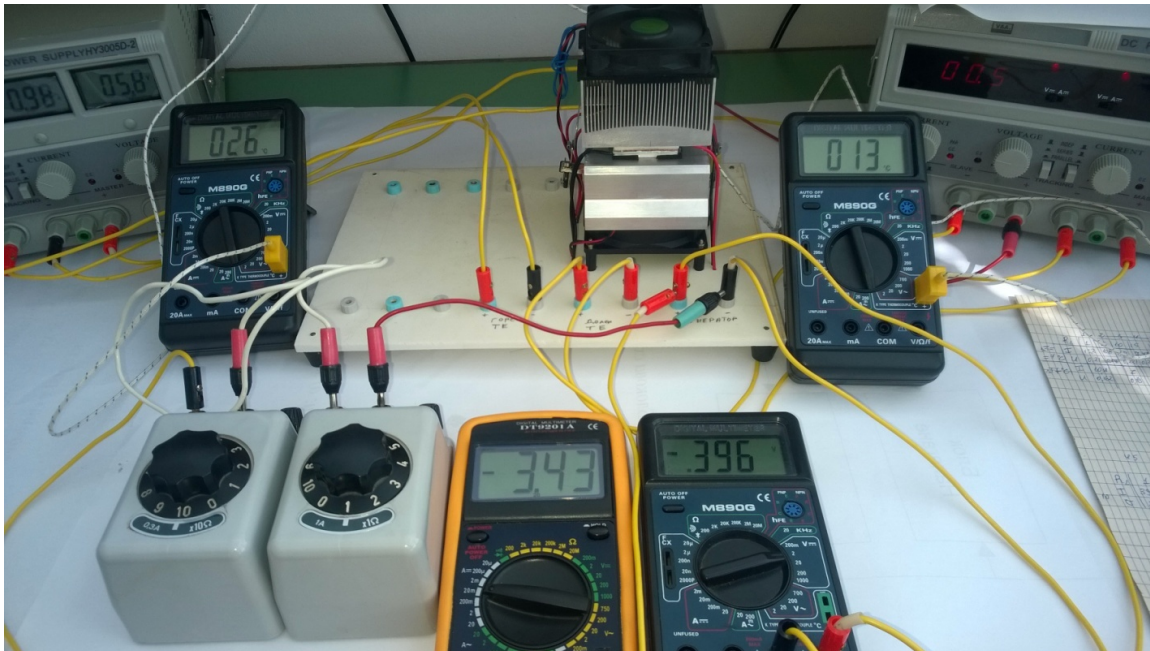
паразитен ефект на Пелтие при по-високи стойности на изходната мощност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализиран и изследван е реален лабораторен модел (фиг.7) на термоелектрически генератор, чиято конструкция (фиг.2) позволява коректно изследване на неговите характеристики с директно измерване на температурите на двете му страни без топлинни загуби и наслагване. Този подход се счита за оригинален, тъй като според проучванията, той не се е използвал в такъв тип разработки.

Чрез допълнителните термоелектрически елементи, работещи в режим на Пелтие, може плавно да се задава температурната разлика между топлопоглещащата и топлоотдаващата страна на ТГ (фиг. 8). По този начин са проведени експериментални изследвания. Заснети и анализирани са характеристиките, описващи работата на термогенератора.

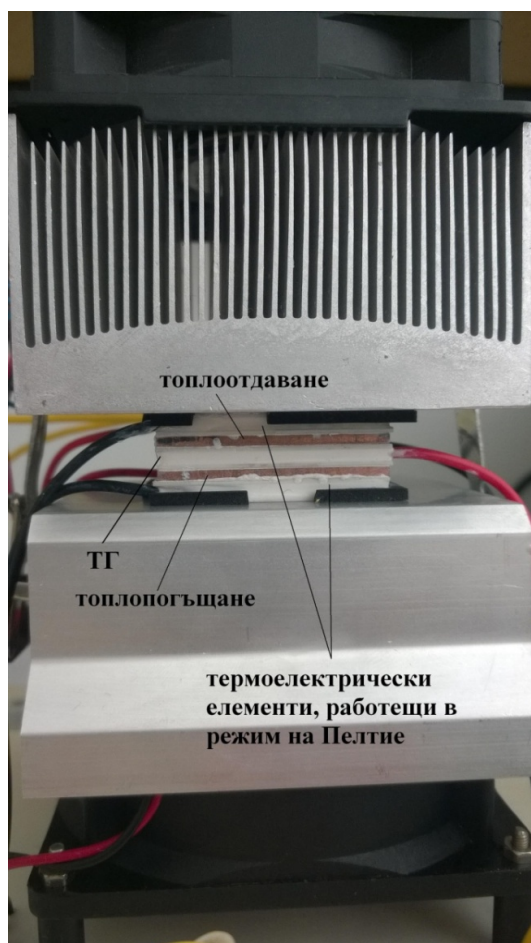
Заснети и анализирани са волтамперните характеристики на ТГ с цел доказване на неговата симетричност (фиг. 3) и реалните характеристики $T_H = f(U_{+})$ и $T_C=f(U_{+})$ в режим на Пелтие (фиг. 5), показващи създаваните температури на топлата (T_H) и студената (T_C) страни от самия термоелектрически елемент, използван като ТГ.



Фиг. 7. Снимка на опитната постановка по време на снемане на товарните характеристики

Изследвано е изходното съпротивление ТГ, като е построена и анализирана зависимостта $R_o=f(\Delta T)$, фиг.4.

Експериментално са заснети товарните характеристики на реализирания ТГ (фиг.6). Установена е появата на паразитен ефект на Пелтие, изразяващ се в генериране на топлина в самия елемент в режим на термогенерация. Последното се установява с нелинейността на товарните характеристики при ниско товарно съпротивление.



Фиг. 8. Снимка на термоелектрическия генератор, реализиран с полупроводникови термоелектрически елементи

Разработеният лабораторен модел на термоелектрически генератор на този етап намира приложение в научноизследователската дейност за експериментални изследвания и правилното разбиране

и анализиране на термоелектрическите ефекти в полупроводникови термоелектрични батерии. Той може да послужи за концепция при разработването на вградени термоелектрични захранващи блокове в електронни устройства и микроелектронни конструкции (интегрални схеми, сензори, микроелектромеханични системи и др.), като по този начин създадени, те са енергоспестяващи поради намалената собствена консумация.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Пасынков, В.В., Л.К. Чиркин. Полупроводниковые приборы. Изд. Высшая школа, Москва, 1987.

[2] Valkov, S., I. Yamakov and et. Electronic semiconductors elements and integrated circuit. Publ. Technique, Sofia, 1992.

[3] Draganov, N., SENSORS. Principles, Structure, Technology, Characteristics, Parameters and Applications. PART 1. Publishing House X-Press, Gabrovo, Bulgaria, 2014.

[4] Draganov, N., SENSORS. Principles, Structure, Technology, Characteristics, Parameters and Applications. PART 2. Publishing House X-Press, Gabrovo, Bulgaria, 2016.

За контакти:

д-р Никола Драганов
Технически университет – Габрово
Катедра „Електроника“
Лаборатория по Сензорна техника
тел: 066 827 551, 0878277746
e-mail: ndrag@abv.bg

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF LABORATORY MODEL OF THERMOELECTRICAL GENERATOR

Draganov, Nikola Draganov

*Technical University of Gabrovo, Department of Electronics,
Laboratory of Sensors Technology*

Diverse kinds of energy supplies based on various physical principles as piezoelectric, photovoltaic, thermoelectrical and etc phenomena are well-known. Thermoelectrical effect in semiconductor structures has a special interest for electronics.

This article is dedicated to an electrical energy creating by semiconductor thermoelectrical generator based on Peltier element. An analytical description of thermogeneration process is explained. The construction of the developed laboratorial thermoelectrical model and experimental circuit diagrams for its investigation are presented. Experimental researches proved the thermoelectrical voltage generation are carried out and described.

The elaboration can find a tangible application in electronics and microelectronics for building of embedded thermoelectrical feeding systems and integrated microsystems with embedded thermoelectrical power supplies.

Keywords: thermoelectric generator; systems for electrical energy collecting; energy harvesters; alternative energy source; embedded energy sources.