

Научная статья

УДК-546.56+536.615

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-85-94

Определение нестационарного температурного поля в многослойном (трехслойном) цилиндрическом модуле на SiGe

Герман Семенович Хагба

Абхазский государственный университет
Сухум, Республика Абхазия

Khagba65@mail.ru

Аннотация

Проведено исследование температурного поля трехслойного термоэлемента на основе SiGe в нестационарном режиме. На основе проведенного анализа процесса предложена и обоснована математическая модель нестационарного теплообмена.

Получены аналитические зависимости для работы нестационарного температурного поля. Изучено распределение температур в цилиндрических слоях. Для каждого слоя рассчитаны коэффициенты теплопроводности, критерии Фурье, критерии Био, а также коэффициент термоЭДС.

Ключевые слова

коэффициент, критерии, теплопроводность, теплопередача

Для цитирования

Хагба Г. С. Определение нестационарного температурного поля в многослойном (трехслойном) цилиндрическом модуле на SiGe // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 4. С. 85–94. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-85-94

Determination of an Unsteady Temperature Field in a Multilayer (Three-Layer) Cylindrical Module Samples of Siege

German S. Hagba

Abkhazian State University
Sukhum, Republic of Abkhazia

Khagba65@mail.ru

Abstract

The temperature field of a three-layer thermoelement based on SiGe was studied in a non-stationary mode. Based on the analysis of the process, a mathematical model of unsteady heat transfer is proposed and justified.

Analytical dependencies for the operation of a non-stationary temperature field are obtained. The temperature distribution in cylindrical layers has been studied. For each layer, thermal conductivity coefficients, Fourier criteria, Biot criteria, as well as the thermal emf coefficient are calculated.

Keywords

coefficient, criteria, thermal conductivity, heat transfer

© Хагба Г. С., 2024

For citation

Hagba G. S. Determination of an unsteady temperature field in a multilayer (three-layer) cylindrical module samples of SiGe. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 85–94 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-85-94

Введение

Немало работ посвящено переходным режимам работы плоских термоэлектрических преобразователей энергии, как в режиме нагревания, так и при охлаждении [1]. В настоящее время все шире используются термоэлектрические преобразователи цилиндрической конструкции, и поэтому представляет интерес изучение нестационарного режима и для этого случая. Основная задача расчета многослойных (трехслойной) цилиндрических модулей состоит в определении их выходных электрических параметров и нахождение температурных полей во всех их элементах для нестационарного режима работы. При этом основными исходными данными являются термоэлектрические свойства применяемого полупроводникового материала сплавов кремния с германием, содержащих соответственно 20 и 80 ат. Ge и Si соответственно. Для P- и N-типа проводимости и в $\text{Ge}_{20}\text{Si}_{80}$ в основном используются хорошо растворимые легирующие добавки В (бор) и Р (фосфор) соответственно. Следует отметить, что подавляющее число публикаций по термоэлектрическим свойствам твердых растворов германий – кремний посвящены именно $\text{Ge}_{20}\text{Si}_{80}$.

Актуальность темы

Кремний, германий и их сплав (SiGe) являются классическими полупроводниками и играют важную роль для фундаментальной науки и широкого промышленного применения. Кремний остается одним из важнейших технологических материалов для человечества.

В 1980-х гг. кремний также предложен в качестве многообещающего механического материала, что в конечном итоге привело к развитию так называемых микро(нано)-опто-электро-механических систем. Сплавы кремния и германия перспективны для использования в таких отраслях, как биполярные технологии [19], изготовление устройств фотоники [20], литий-ионных батарей [21] и технологий преобразования энергии, где они используются в качестве элементов солнечных батарей и термоэлектрических преобразователей.

Термоэлектрические преобразователи, которые могли бы эффективно преобразовать тепло в электричество и наоборот, представляют значительный интерес из-за большого потенциала для различных энергосберегающих технологий. Таким образом, первостепенной задачей ученых является синтезирование и исследование новых полупроводниковых соединений и твердых растворов на их основе.

По мере выявления присущих твердым растворам системы Si–Ge различных свойств они становятся особо важными материалами и представляют значительный интерес как для теории, так и для применения в разных областях техники. Исследованию твердых растворов рассматриваемой системы посвящено довольно большое число работ российских и зарубежных авторов [2–5].

Целью данной работы является исследование температурного поля в термоэлементе; показать методы решения температурных полей; определить температуры для каждого слоя, коэффициенты теплопроводности и получить зависимость температур в трехслойном термоэлементе от времени.

Научная новизна. Изучен процесс передачи тепловой энергии в электрическую в трехслойном цилиндрическом термоэлементе, а именно при контакте металл-полупроводник (SiGe) через трехслойные стенки термоэлемента. Определены коэффициенты теплоотдачи методом преобразования Фурье и Ханкеля.

Постановка задачи. Дан трехслойный термоэлемент цилиндрической конструкции на основе SiGe (рис. 1). В этом случае рассматривается передача тепла через многослойную, например трехслойную цилиндрическую стенку. Диаметры и коэффициенты отдельных слоев известны. Температура горячей среды T_r , холодной T_x , коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей среды β_2 . Температура поверхности стен T_{c1} и T_{c3} , а также температуры в месте соприкосновения разнородных цилиндрических слоев T_{c2} , в начальный момент времени он помещается в среду с постоянной температурой $T_{cp1} > T_0$, $T_{cp2} > T_0$, $T_{cp3} > T_0$.

Требуется найти распределение температур в любой момент времени.

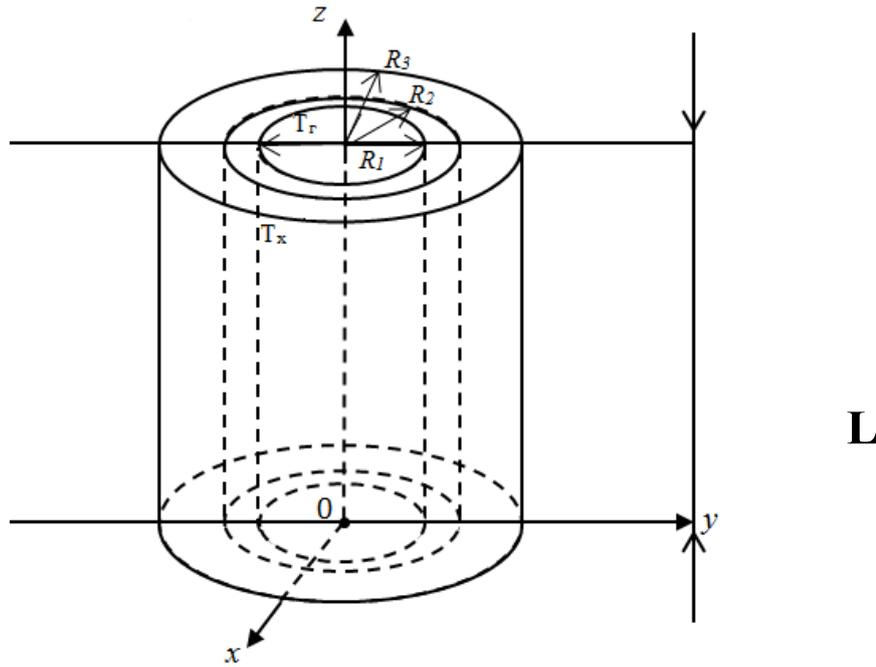


Рис. 1. Трехслойный цилиндрический термоэлемент, где показана зависимость теплопередачи от радиуса r , $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Fig. 1. A three-layer cylindrical thermoelectric element, which shows the dependence of heat transfer on the radius r , $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

Математическая модель нестационарного теплопереноса в многослойном цилиндрическом модуле имеет вид [1; 2]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \chi(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \chi(r) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v(r, t) = C(r) \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

Граничные условия на боковых поверхностях запишем в виде:

$$\begin{aligned} \chi(R_1) \frac{\partial T}{\partial r} &= \beta_1 (T - T_{cp1}) - J_1 \alpha_1 T; & r = R_1; \\ \chi(R_2) \frac{\partial T}{\partial r} &= Q - J_2 \alpha_2 T - T_{cp2}; & r = R_2; \\ \chi(R_3) \frac{\partial T}{\partial r} &= \beta_2 (T - T_{cp3}) - J_3 \alpha_3; & r = R_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия имеют вид:

$$T(R_i, z, t=0) = T_{cpi} = \text{const}, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Граничные условия по координате z :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad z = 0, \quad \chi_3 \frac{\partial T}{\partial z} = \gamma(T - T_{cpi}), \quad z = L. \quad (4)$$

Введем эффективную переменную $H(r)$ – в соответствии с работами [6–8]:

$$H(r) = \int_{R_1}^r \frac{dr}{\sqrt{b_1(r)}}, \quad b_1(r) = \frac{\chi_i(r)}{c(r)}. \quad (5)$$

Далее от температуры теплоэлектрического преобразователя переходим к параметру F_i , и оно может быть интерпретировано как функция распределения тепла и электропереноса через толщину цилиндрического модуля в течение времени t .

И представим решение в виде:

$$T_i(H_i, z, t) = F_i(H_i, z, t) + T_{cpi}, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (6)$$

Воспользуемся последовательно-интегральным преобразованием Фурье и Ханкеля по параметру \bar{F}_i как функции радиуса цилиндрического модуля, приравненного к радиусам слоев этого модуля,

$$\bar{F}_i = \int_0^L (F_1 + F_2 + F_3) \cos \mu_n \frac{zdz}{L}, \quad (7)$$

где μ_n – корни уравнения $\mu \operatorname{tg} \mu = \gamma L / \chi_3$; μ_n – корни уравнения (7'), заключенные в пределах $\chi_n < \mu_n < \nu_n$.

Обозначим χ_n – корни функций $I_1(\mu)$ и $I_2(\mu)$ через ν_n , где $I_1(\mu)$, $I_2(\mu)$ – функции Бесселя соответственно первого рода первого порядка и первого рода второго порядка.

Ядро преобразования Ханкеля имеет вид:

$$F_i \left(\frac{\mathcal{V}_m F(r)}{FR_i} \right) = \left[\frac{\gamma_i(\mathcal{V}_m) + \mathcal{V}_m \gamma_i(\mathcal{V}_m)}{(B_i)_i} \right] I_i \left(\mathcal{V}_m \cdot \frac{H_r}{HR_i} \right) - \left[\frac{I_i(\mathcal{V}_m) + \mathcal{V}_m I_i(\mathcal{V}_m)}{(B_i)_i} \right] \gamma_i \left(\mathcal{V}_m \cdot \frac{H_r}{HR_i} \right), \quad (8)$$

$$\text{где } \nu_m \text{ – корни уравнения } \begin{cases} \frac{F_1(K_1 \mathcal{V}_m)}{F_2(K_1 \mathcal{V}_m)} = \frac{\mathcal{V}_m}{d_2 B_{i1} / \alpha_1}, & K_1 = \frac{R_2}{K_1} \\ \frac{F_2(K_2 \mathcal{V}_m)}{F_3(K_2 \mathcal{V}_m)} = \frac{\mathcal{V}_m}{d_3 B_{i2} / \alpha_2}, & K_2 = \frac{R_3}{K_2} \end{cases}; \quad (9)$$

$$(B_i)_i \text{ – критерий Био } (i = 1, 2, 3). \quad B_i = \frac{\alpha L}{\chi}$$

Обратные косинусы преобразования функции Фурье и Ханкеля дают температурные поля T_1, T_2, T_3 в многослойном (трехслойном) цилиндрическом модуле

$$T_i = T_{cpi} + \frac{\mu_n}{K_1^2} \sum_{n=1}^6 \frac{\mu_n + B_{i1}^2}{\mu_n^2 + B_{i2} + B_{i3}} \left\{ \frac{R_2 - R_1 b_i(H) \mathcal{D}_i(H) L}{\mu_n} + \frac{R_3 - R_2 b_i(H) \mathcal{D}_i(H) L}{\mu_n} + \right. \\ \left. + \frac{B_{i3} F_i(R_2 \mathcal{V}_m)}{\left(\frac{\mu_n}{L}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{V}_m}{R_2}\right)^2} \chi_3(\mu_n) - \frac{\chi_2(\mu_n)}{\left(\frac{\mu_n}{L}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{V}_m}{R_2}\right)^2} \chi_3(\mu_n) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{\left(\frac{\mu_n}{L}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{V}_m}{R_2}\right)^2} \chi_1(\mu_n) \right\} \\ \times e^{\left(\frac{\mu_n^2 + \mathcal{V}_m}{L^2 + R_1^2}\right) b_i(H) t}. \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

$$T_{cpi} = \frac{\sum_{n=1}^6 \frac{4B_i}{\mu_n (\mu_n + B_i^2)} e^{-\frac{\mu_n^2 \alpha t}{R_i^2}} \pi r^2 L \gamma C (T_r - T_x) - 1}{Q}. \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

$F_0 = \frac{\alpha t}{R^2}$ – число Фурье, $a = 0,005 \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициент теплопроводности;

$$B_{i1} = \frac{R_2 \alpha_1}{\chi(R_1)}, \quad B_{i2} = \frac{R_3 \alpha_1}{\chi(R_2)}, \quad B_{i3} = \frac{Lj}{\chi_3}$$

$$b_i(H) = \frac{\chi_1(r)}{c(r)}, \quad b_2(H) = \frac{\chi_2(r)}{c(r)}, \quad b_3(H) = \frac{\chi_2(r)}{c(r)}$$

$$\chi_1(\mu) = \frac{Q}{(\alpha_1 * J - T_{c1}) \frac{2 \sin \mu 1}{\mu 1}} \quad (12)$$

$$\chi_2(\mu) = (2\beta - \alpha_2 J_2) \Gamma_{cp2} \frac{L \sin \mu 2}{\mu 2}$$

$$\chi_3(\mu) = \frac{2\beta - \alpha_3 J_3}{\alpha_3 J_3} T_{c3}.$$

Параметр $b_i(H)$ – отношение коэффициента теплопроводности к объемной теплоемкости как функция радиуса термоэлемента к диаметру термоэлемента.

Параметр $\mathcal{D}_i(H)$ есть распределение электронов в объеме цилиндрического модуля SiGe, который всегда сопровождается способностью проводить тепло и аккумулировать его на поверхности слоев.

Параметр $F_i(K_i V_m)$ есть распределение тепла и электропереноса через отношение слоев: второго слоя к первому и третьего слоя ко второму с учетом корней уравнения V_m и коэффициента термоЭДС – α .

χ – коэффициент теплопроводности, C – объемная теплоемкость, q_v – плотность тепловыделения от протекания тока, r – диаметр, z – координата вдоль оси цилиндра, t – время.

Q – тепловой поток, J_1, J_2, J_3 – плотность тока на поверхностях R_1, R_2, R_3 , $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты термоЭДС, β_1 и β_2 – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и внешней стороны модуля, T_{cp1} и T_{cp2} – температуры поверхности слоев, T_{cp3} – температуры в месте соприкосновения разнородных цилиндрических слоев.

L – высота цилиндра, .

γ – удельная проводимость или электропроводность.

L – высота цилиндрического модуля.

$I_i(v)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка .

$Y_i(v)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода второго порядка.

$\frac{H_r}{HR_i}$ – отношение радиуса цилиндрического модуля образца SiGe к слоям этого модуля

при изменении температуры подвижных сред в единицу времени. Что касается подвижных сред, это можно интерпретировать как величину, равную отношению дрейфовой скорости, т. е. скорости направленного движения носителей заряда, вызванного электрическим полем к напряженности это поля. Следовательно, подвижность носителей ограничивается процессами расстояния носителей заряда, происходящими на дефектах кристаллической решетки, а также на тепловых колебаниях кристаллической решетки. Следовательно, подвижность носителей заряда зависит от температуры T . С понижением температуры T доминирующим становится рассеяние на заряженных дефектах, вероятность которого растет с уменьшением энергии носителей заряда.

Далее определяем все параметры термоэлектрического преобразователя на образце для шести значений критерий Био и для корней характеристических уравнений $I_1(v_m)$ $Y(v_m)$ и их первых шести корней. Получим:

$$\begin{aligned} Bi: & 0,1; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10 \\ \mu_1: & 0,14; 0,19; 0,28; 0,34; 0,39; 0,44 \\ I_1(v_m): & 0,1; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10 \\ Y_1(v_m): & -6,4; -3,2; -2,2; -1,7; -1,4; -1,2. \end{aligned} \quad (13)$$

$$D = \frac{j\gamma}{\chi}$$

$$D_1 = 0,29 \frac{\text{АгВм}}{\text{см}^3}$$

$$D_2 = 0,35 \frac{\text{АгВм}}{\text{см}^3}$$

$$D_3 = 3 \frac{\text{АгВм}}{\text{см}^3}$$

$$Bi_1 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ В/К}$$

$$Bi_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ В/К}$$

$$Bi_3 = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ В/К}$$

$$Q = 150 \text{ Вт}$$

$$J_1 = J_2 = J_3 = J = 14 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$$

$$\chi_1(\mu) = 3,4 \text{ Вт/см} \cdot \text{к}$$

$L = 7$ см – высота термоэлемента

$R_1 = 0,25$ см, $R_2 = 0,50$ см, $R_3 = 0,90$ см.

$r = 3,3$ см – диаметр термоэлемента

$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ (В/К)

$$b_1(H) = 0,8 \frac{\text{Дж}}{(\text{см} \cdot \text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$b_2(H) = 0,6 \frac{\text{Дж}}{(\text{см} \cdot \text{кг} \cdot \text{К})}$$

$$b_3(H) = 0,3 \frac{\text{Дж}}{(\text{см} \cdot \text{кг} \cdot \text{К})}$$

$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ (В/К)

$\alpha_2 = 3 \cdot 10^{-4}$ (В/К)

$\alpha_3 = 4 \cdot 10^{-4}$ (В/К)

$$C = 4,1 \frac{\text{КДж}}{\text{К}} = 4100 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

$$\chi_2(\mu) = 2,8 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$$

$$\chi_3(\mu) = 1,5 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$$

$$T_\Gamma = 1000 \text{ К}, T_x = 500 \text{ К}$$

$$\text{Удельная проводимость кремния } 1,12 \frac{\text{СИМ}}{\text{СМ}}$$

Далее, подставляя (11), (12), (13), (14) в (10) и дифференцируя по времени, получим:

$$\begin{aligned} T'_{1,1} &= \left. \frac{dT_{1,1}}{d\Gamma} \right|_{t=0} = 81^\circ\text{К} & T'_{1,2} &= \left. \frac{dT_{1,2}}{d\Gamma} \right|_{t=0,20} = 97^\circ\text{К} \\ T'_{1,3} &= \left. \frac{dT_{1,2}}{d\Gamma} \right|_{t=0,40} = 728^\circ\text{К} & T'_{1,4} &= \left. \frac{dT_{1,4}}{d\Gamma} \right|_{t=0,60} = 635^\circ\text{К} \\ T'_{1,5} &= \left. \frac{dT_{1,5}}{d\Gamma} \right|_{t=0,80} = 105^\circ\text{К} & T'_{1,6} &= \left. \frac{dT_{1,6}}{d\Gamma} \right|_{t=1,0} = 72^\circ\text{К} \\ T'_{2,1} &= \left. \frac{dT_{2,1}}{d\Gamma} \right|_{t=0} = 46^\circ\text{К} & T'_{2,2} &= \left. \frac{dT_{2,2}}{d\Gamma} \right|_{t=0,20} = 436^\circ\text{К} \end{aligned} \quad (14)$$

распределение температур в термоэлементе. То есть найдем распределение температур в момент времени $t = 0$ ч; $0,20$ ч; $0,40$ ч; $0,60$ ч; $0,80$ ч; $1,0$ ч.

$$\begin{aligned} T'_{2,4} &= \left. \frac{dT_{2,4}}{d\Gamma} \right|_{t=0,60} = 593^\circ\text{К} & T'_{2,3} &= \left. \frac{dT_{2,3}}{d\Gamma} \right|_{t=0,40} = 888^\circ\text{К} \\ T'_{2,6} &= \left. \frac{dT_{2,6}}{d\Gamma} \right|_{t=1,0} = 59^\circ\text{К} & T'_{2,5} &= \left. \frac{dT_{2,5}}{d\Gamma} \right|_{t=0,80} = 97^\circ\text{К} \\ T'_{3,2} &= \left. \frac{dT_{3,2}}{d\Gamma} \right|_{t=0,20} = 469^\circ\text{К} & T'_{3,1} &= \left. \frac{dT_{3,1}}{d\Gamma} \right|_{t=0} = 28^\circ\text{К} \\ T'_{3,4} &= \left. \frac{dT_{3,4}}{d\Gamma} \right|_{t=0,60} = 117^\circ\text{К} & T'_{3,3} &= \left. \frac{dT_{3,3}}{d\Gamma} \right|_{t=0,40} = 156^\circ\text{К} \\ T'_{3,6} &= \left. \frac{dT_{3,6}}{d\Gamma} \right|_{t=1} = 26^\circ\text{К} & T'_{3,5} &= \left. \frac{dT_{3,5}}{d\Gamma} \right|_{t=0,80} = 47^\circ\text{К} \end{aligned}$$

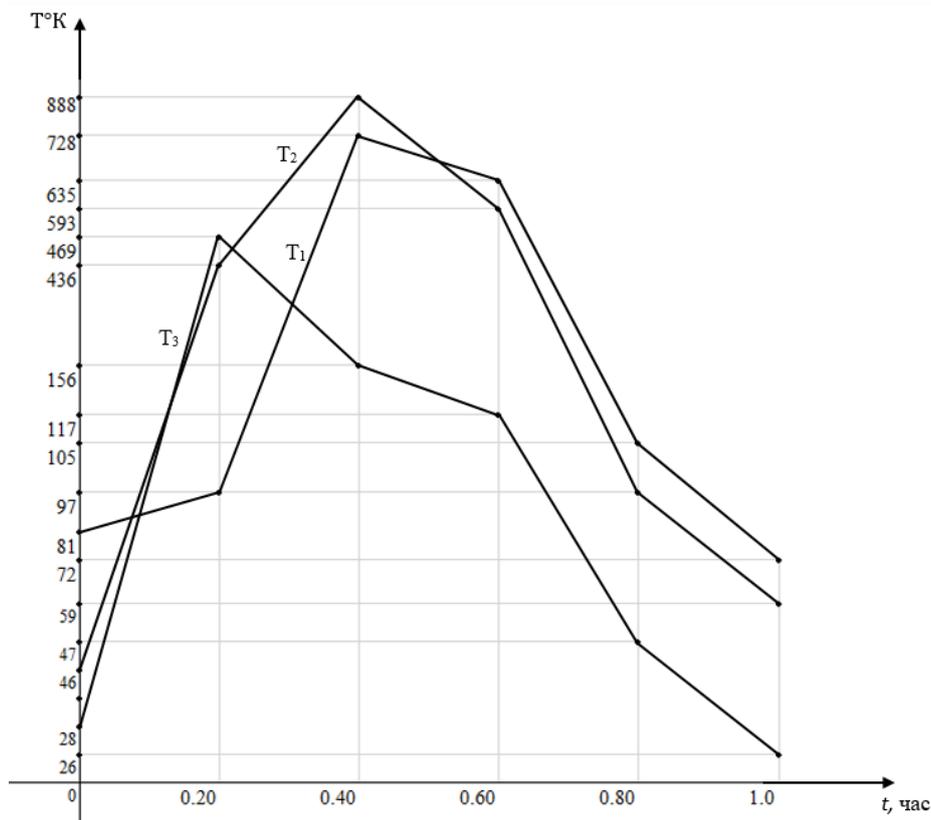


Рис. 2. График зависимостей температур от времени
 Fig. 2. Graph of temperature dependence on time

Обсуждение результатов

Рассматривая процессы, происходящие в цилиндрической системе образцов SiGe, определяем, что с течением времени увеличивается температура, это обусловлено тем, что при увеличении внутренней энергии системы часть электронов полупроводника приобретает необходимую энергию для преодоления энергетического барьера и переходит от уровня валентной зоны к уровню зоны проводимости. Этот процесс сопровождается образованием свободных уровней, т. е. дырок в количестве, равном количеству электронов проводимости. При этом концентрация электронов и дырок считаются равными, а их заряды имеют при разных знаках одинаковую величину, так как концентрация легирующих примесей фосфора составляет $P = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее, рассматривая процессы уменьшения температуры, определяем, что в течение времени t уменьшаются температуры. Указанное уменьшение вызвано не наступлением собственной проводимостью, а изменением концентраций носителей тока. Дело в том, что фосфор, имеющий определенную растворимость при заданной температуре, в процессе охлаждения выделяется из решетки. При нагреве до высоких температур наступает обратный процесс его растворения. В результате концентрация носителей тока увеличивается и становится больше оптимальной. Растворимость фосфора носит временной характер. Только через 1000 часов наступает стабильное состояние.

Преимущество предлагаемой архитектуры от ограниченного цилиндрического термоэлемента на основе SiGe заключается в следующем: здесь проведено исследование качественных и количественных характеристик температурного поля трехслойного термоэлемента на основе

сплава $\text{Ge}_{20}\text{Si}_{80}$. Показана математическая модель и решение математической модели методом интегральных преобразований Фурье и Ханкеля, где определены температурные поля для каждого слоя и для шести значений критерий Био и, соответственно, для корней характеристических уравнений в зависимости от времени t .

Что касается ограниченного цилиндрического термоэлемента, то здесь определена зависимость избыточной температуры внутри цилиндра в любой момент времени при различных значениях радиуса цилиндрического термоэлемента с учетом изменений изотермических поверхностей, а также средней избыточной температуры от числа Фурье. Получены формулы для безразмерных величин [9].

Заключение

Определены температуры подвижных сред в зависимости от времени при постоянном значении коэффициента температуропроводности α . Изучены отдельные механизмы переноса тепла. Определены распределения температур на границах в многослойном цилиндрическом модуле в зависимости от времени t .

Список литературы

1. **Анатчук Л. И.** Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. С. 768.
2. **Анатчук Л. И., Мочернюк Ю. Н., Прибыла А. В.** О солнечных термоэлектрических преобразователях энергии // Термоэлектричество. 2013. № 5. С. 41–48.
3. **Лобунец Ю. Н.** Солнечный пруд с термоэлектрическим преобразователем энергии // Термоэлектричество. 2013. № 2. С. 95–99.
4. **Odia A., Llin L., Pal D., Isella G.** Modelling and experimental verification of a Ge/SiGe thermoelectric generator // 11 th Conference an Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), Glacgow, uk, 29 June – 2 July 2015.
5. **Akhmetov D., Korotko A., Romyancev I.** 2,4-2,5 6hz Fractional-N Frequency Synthesizer with Integrated VCO in 0,18 um CMOS for RFID Systems // Proc IEEE International Conferenca on Electric Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, 22–23, October 2018. P. 64–68.
6. **Кудинов В. А.** Аналитические решения задач тепломассопереноса для многослойной конструкции. М.: Высш. шк., 2005. С. 250–255.
7. **Дударев Ю. И., Максимов М. З., Никоненко Л. К.** Нестационарное температурное поле многослойных цилиндрических систем // ИФЖ. 1988. Т. 55. № 4. С. 626–627.
8. **Коргашов Э. М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001. С. 401–403.
9. **Харба Г. С.** Определение нестационарного, температурного поля ограниченного, полупроводникового, цилиндрического термоэлемента на основе sige методом разделения переменных, в процессе охлаждения // Международный научный журнал «Научные вести». 2024. № 5(69). С. 72–89.
10. **Wood T., Naffouti M., Berthelot J., David T., Claude J.-B., Metayer L., Delobbe A., Favre L., Ronda A., Berberien I., Donod N., Abbarchi M.** All – Dielectric Color Using SiGe – Based Mie Resonator Arrays // ACS Photonics. 2017. Vol. 4. № 4. P. 873–883.
11. **Zhigunov D. M., Evlyukhin A. B., Shalin A.S.S., Zywiets U., Chichkov B. N.** Femtosecond Laser Printing of Single Ge and SiGe. Nanoparticles with Electric and Magnetic Optical Resonances // ACS Photonics. 2018. Vol. 5. № 3. P. 977–983.
12. **Yan Y., Yang Y., Bian X., Feng J., An Y., Yuan C.** Morphology – and Porosity – Tunable Synthesis of 3D Nanoporous SiGe Alloy as a High-Perfomance Lithium – Ion Battery Anode // ACS Nano. 2018. Vol. 12. № 3. P. 2900–2908.

References

1. **Anatachuk L. I.** Thermoelements and thermoelectric devices. Kiev, Naukova dumka, 1979, p. 768.
2. **Anatachuk L. I.** About solar thermoelectric energy converters / L. I. Anatachuk, Yu. N. Mochernyuk, A. V. Arrived. *Thermoelectricity*, 2013, no. 5, pp. 41–48.
3. **Lobunets Yu. N.** A solar pond with a thermoelectric energy converter. *Thermoelectricity*, 2013, no. 2, pp. 95–99.
4. **Odia A., Llin L., Pal D., Isella G.** Modelling and experimental verification of a Ge/SiGe thermoelectric generator. *11 th Conference an Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, Glacgow, uk, 29 June – 2 July 2015.
5. **Akhmetov D., Korotko A., Romyancev I.** 2,4-2,5 6hz Fractional-N Frequency Synthesizer with Integrated VCO in 0,18 um CMOS for RFID Systems. *Proc IEEE International Conferenca on Electric Engineering and Photonics (EExPolytech)*, St. Petersburg, pp. 64–68, 22–23, October 2018.
6. **Kudinov V. A.** Analytical solutions of heat and mass transfer problems for a multilayer structure. Moscow, Higher School, 2005, pp. 250–255.
7. **Dudarev Yu. I., Maksimov M. Z., Nikonenko L. K.** Nonstationary temperature field of multilayer cylindrical systems. *IFJ*, 1988, vol. 55, no.4, pp. 626–627.
8. **Kortashov E. M.** Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. Moscow, Higher School, 2001, pp. 401–403.
9. **Hagba G. S.** Determination of the non-stationary temperature field of a limited, semiconductor, cylindrical thermoelement based on sige by the method of separation of variables, during the cooling process. *International Scientific Journal “Scientific News”*, 2024, no.5(69), pp. 72–89.
10. **Wood T., Naffouti M., Berthelot J., David T., Claude J.-B., Metayer L., Delobbe A., Favre L., Ronda A., Berberien I., Donod N., Abbarchi M.** All – Dielectric Color Using SiGe – Based Mie Resonator Arrays. *ACS Photonics*, 2017, vol. 4, № 4, pp. 873–883.
11. **Zhigunov D. M., Evlyukhin A. B., Shalin A. S. S., Zywitz U., Chichkov B. N.** Femtosecond Laser Printing of Single Ge and SiGe. Nanoparticles with Electric and Magnetic Optical Resonances. *ACS Photonics*, 2018, vol. 5, № 3, pp. 977–983.
12. **Yan Y., Yang Y., Bian X., Feng J., An Y., Yuan C.** Morphology – and Porosity – Tunable Synthesis of 3D Nanoporous SiGe Alloy as a High-Perfomance Lithium – Ion Battery Anode. *ACS Nano*, 2018, vol. 12, № 3, pp. 2900–2908.

Сведения об авторе

Харба Герман Семенович, старший преподаватель

Information about the Author

German S. Hagba, Senior Lecturer

*Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024;
принята к публикации 20.09.2024*

*The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 19.04.2024;
accepted for publication 20.09.2024*