

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРА ВОЛОКОННО–ОПТИЧНОГО ТЕРМОМЕТРА

О.В. Козусенок, І.І. Туряниця

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, Університетська, 14

Приведено результати розрахунків статичної функції перетворення сенсора волоконно-оптичного термометра на основі стекол системи *Ge-Sb-Se*. Проаналізовано вплив параметрів матеріалу та елементів оптопари на чутливість та діапазон вимірюваних температур.

Принцип роботи волоконно-оптичного термометра (ВОТ) полягає в реєстрації зміни пропускання термочутливого елемента (ТЧЕ), викликаній зміною вимірюваної температури системи – T . Перевагою такої схеми є можливість дистанційного вимірювання, при цьому віддаль обмежується тільки довжиною оптичного волокна (ОВ). На відміну від [1] нами в якості ТЧЕ використано халькогенідні напівпровідникові стекла (ХСН) – зокрема стекла системи *Ge-Sb-Se*. Завдяки високій радіаційній та хімічній стійкості, простоті одержання, можливості зміни оптичних параметрів в широкому діапазоні при зміні складу та ін. забезпечує переваги над кристалічними ТЧЕ (*GaAs* – [1]). В якості джерела випромінювання (ДВ) використовується світло випромінюючий діод на основі *GaAs* ІЧ-діапазону – приймача (ПВ) – кремнієвий фотодіод.

При аналізі параметрів будь яких сенсорів використовують статичну функцію перетворення, яка встановлює залежність вихідного сигналу при зміні вхідного в усталеному режимі (у нашому випадку залежність пропускання від температури). Відповідно до загально прийнятої схеми розрахунку [2, 3] для обчислення вихідного сигналу фотоприймача потрібно знати інтегральні параметри спектральних характеристик елементів оптопари від еталонного джерела та проводити їх перерахунок на реальне джерело. У ряді випадків ці параметри є відсутні у довідниковій літературі і уникнути цю проблему, а також для спрощення розрахунку, доцільно використовувати нормовані характеристики та параметри – зокрема коефіцієнт термочутливості, який визначається відношенням відносної зміни про-

пускання при зміні температури на один градус при фіксованій довжині хвилі для зразка одиничної товщини:

$$B(h\nu) = \frac{\Delta\theta(h\nu, T)}{\theta(h\nu, T_0)} \cdot \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{1}{l}, \quad (1)$$

де $\theta(h\nu, T)$ – коефіцієнт пропускання чутливого елемента.

Коефіцієнт пропускання ЧЕ знаходиться за законом Бугера-Бера

$$\theta(h\nu, T) = (1 - R)^2 K \exp[-\alpha(h\nu, T) \cdot l], \quad (2)$$

де R – коефіцієнт відбивання, K – безрозмірний коефіцієнт, який враховує втрати на відбивання та поглинання в оптичному волокні, $\alpha(h\nu, T)$ – коефіцієнт поглинання матеріалу термосенсора при температурі вимірювання, l – товщина ЧЕ. Прийmemo, що відхилення вимірюваної температури є незначними, тобто $T = T_0 + \Delta T$. Це дає можливість розкласти $\theta(h\nu, T)$ в ряд Тейлора при $h\nu = const$:

$$\theta(h\nu, T_0 + \Delta T) = \theta(h\nu, T_0) + \left. \frac{d\theta(h\nu, T)}{dT} \right|_{T=T_0} \Delta T + \left. \frac{d^2\theta(h\nu, T)}{dT^2} \right|_{T=T_0} (\Delta T)^2 + \dots \quad (3)$$

Нехтуючи величинами другого і вищого порядків малості з (3)

$$\begin{aligned} \Delta\theta(h\nu, T) &= \theta(h\nu, T) - \theta(h\nu, T_0) = \\ &= \left. \frac{d\theta(h\nu, T)}{dT} \right|_{T=T_0} \Delta T. \end{aligned} \quad (4)$$

Продиференціювавши (2), одержуємо

$$\left. \frac{d\theta(h\nu, T)}{dT} \right|_{T=T_0} = -(1 - R)^2 \cdot \exp(-\alpha \cdot l) \cdot \left. \frac{d\alpha(h\nu, T)}{dT} \right|_{T=T_0} l -$$

$$\begin{aligned}
 & -2(1-R) \cdot \exp(-\alpha \cdot l) \frac{dR}{dT} \Big|_{T=T_0} = \\
 & = -\theta(h\nu, T) \left[\frac{d\alpha(h\nu, T)}{dT} \cdot l + \frac{2}{1-R} \frac{dR}{dT} \right] \Big|_{T=T_0} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Врахування (4) та (5) дає наступний вираз для коефіцієнта термочутливості:

$$B(h\nu) = -\frac{1}{l} \left[\frac{d\alpha(h\nu, T_0)}{dT} \cdot l + \frac{2}{1-R(h\nu, T_0)} \frac{dR(h\nu, T_0)}{dT} \right] \quad (6)$$

Спектральна залежність коефіцієнта поглинання α для аморфних напівпровідників в середньо частотній області описується правилом Урбаха [3]

$$\alpha(h\nu, T) = \alpha_0 \exp[S(T) \{h\nu - E_g(T)\}] \quad (7)$$

де α_0 – значення коефіцієнта поглинання при якому визначається ширина забороненої зони $E_g(T)$ (як правило при $\alpha_0 = 1000 \text{ см}^{-1}$), $S(T)$ – постійна яка визначає крутість спектральної залежності коефіцієнта поглинання.

Коефіцієнт відбивання для області поглинання визначається через показник заломлення n за формулою Френеля

$$R = (n-1)^2 / (n+1)^2.$$

Тоді

$$\frac{dR}{dT} = 4 \cdot \frac{n-1}{(n+1)^3} \frac{dn}{dT} \quad (8)$$

та з (7)

$$\frac{d\alpha}{dT} = \alpha \left\{ \frac{dS}{dT} [h\nu - E_g] - S \frac{dE_g}{dT} \right\} \quad (9)$$

Підставивши (8) та (9) в (6), після нескладних алгебраїчних перетворень одержуємо остаточно аналітичний вираз для визначення спектрального коефіцієнта термочутливості

$$\begin{aligned}
 B(h\nu) \cdot l & = \frac{\Delta\theta(h\nu, T)}{\theta(h\nu, T_0)} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \\
 & = - \left\{ 2 \cdot \frac{n-1}{n(n+1)} \frac{dn}{dT} + l \cdot \alpha(T) \cdot \left[\frac{dS}{dT} [h\nu - E_g] - S \frac{dE_g}{dT} \right] \right\} \Big|_{T=T_0} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Так як в системі реєстрації вимірюється інтегральне пропускання, то слід визначати інтегральний коефіцієнт термочутливості:

$$B_I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_{\max}} \frac{\sigma_\lambda}{\sigma_{\lambda \max}} B(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

де $\Phi(\lambda)/\Phi_{\max}$ і $\sigma_\lambda/\sigma_{\lambda \max}$ – нормовані спектральні характеристики світло- та фотодіодів в діапазоні довжин хвиль $\lambda_1 - \lambda_2$.

Таким чином, одержаний вираз для спектрального коефіцієнта термочутливості дає можливість проводити прогнозований вибір матеріалу термосенсора та елементів оптопари для оптимізації їх параметрів.

Нами проведені розрахунки $B(h\nu)$ та чисельним інтегруванням B_I для ХСН системи *Ge-Sb-Se* трьох складів – термочутливий елемент, АЛ107Б – джерело, а ФД250А – приймач випромінювання. Параметри матеріалу сенсора, які використовувались при розрахунках, приведені в таблиці 1. Коефіцієнт поглинання α розраховувався за формулою (7).

Порівняння порядку величин, приведених в таблиці, дає можливість знехтувати першим доданком у формулі (10), тобто не враховувати вклад зумовлений зміною відбивання. Залежність інтегрального коефіцієнта термочутливості від температури для зразків одиначної товщини ($l=1 \text{ см}$) в діапазоні 0,92–0,99 мкм приведено на рис. 1.

Як видно ці характеристики є нелінійними і можуть бути апроксимовані, введеному інтервалі температур, емпіричною залежністю:

$$B_I = A_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2, \quad (12)$$

де константи A_0 , C_1 , C_2 залежать від складу ХСН і приведені в табл. 2.

Перехід в (1) від скінчених до нескінченно малих приростів дає диференціальне рівняння з розділюваними змінними. У результаті розв'язку цього рівняння одержуємо статичну функцію перетворення

$$\frac{\theta(T)}{\theta(T_0)} = \exp(BI\Delta T). \quad (13)$$

Це дає можливість проводити аналіз впливу на зміну відносного пропускання товщини термосенсорів, їх складу, характеристик і параметрів джерела та прийма-

ча випромінювання. Відповідні типові залежності при нормуванні до $T=290$ К приведені на рис. 2 – 3. Як видно з цих графіків зміна товщини приводить до зміни крутості, яка визначає точність вимірювання і зміни діапазону лінійності, яка зростає при зменшенні товщини. Покращення чутливості забезпечується збільшенням товщини, але при цьому зменшується діапазон вимірюваних температур. Для термосенсорів малої товщини при незначних змінах температури характеристика перетворення має ділянку квазінасищення, протяжність якої залежить від складу і є максимальною для $Ge_{16}Se_{60}Sb_{24}$. Наявність цієї ділянки зменшує чутливість, що необхідно враховувати при проектуванні приладу.

Значним чином на точність вимірювання температури впливає зміщення спектральної характеристики світлодіода (рис. 4).

За відомим значенням коефіцієнта термочутливості може бути обчислений максимальний приріст температури ΔT_{max} , який може бути зареєстрований. Цей параметр знаходиться з виразу (1) за умови, що відносна зміна пропускання є рівною одиниці. Типові залежності приведені на рис. 5. Окрім цього, якщо прийняти відносну зміну пропускання рівною пороговому потоку, який визначається шумовими параметрами оптопарі то це дає можливість знайти фізичну межу мінімальної зміни температури. У нашому випадку вона не перевищує 0,05 К.

Таблиця 1. Параметри ХСН системи $Ge-Sb-Se$, які використовувались для визначення коефіцієнта термочутливості.

Склад	E_g, eV при $\alpha_0 = 1000 \text{ см}^{-1}$	$\frac{dE_g}{dT}, eV/K$	S, eV^{-1}	$\frac{dS}{dT}, eV^{-1} \cdot K^{-1}$	$\frac{dn}{dT}, K^{-1}$
$Ge_{15}Se_{60}Sb_{25}$	1,64	$-1,0 \cdot 10^{-3}$	17,7	0	$1,0 \cdot 10^{-4}$
$Ge_{16}Se_{60}Sb_{24}$	1,58	$-1,0 \cdot 10^{-3}$	17,0	$-6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
$Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$	1,66	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	15,4	$-1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2. Константи поліноміальної апроксимації залежності коефіцієнта термочутливості від температури.

Склад	$A_0, \text{мкм/К}$	$\Delta A_0, \text{мкм/К}$	$C_1, \text{мкм/К}^2$	$\Delta C_1, \text{мкм/К}^2$	$C_2 \cdot 10^5, \text{мкм/К}^3$	$\Delta C_2 \cdot 10^5, \text{мкм/К}^3$
$Ge_{15}Se_{60}Sb_{25}$	-2,95	0,17	0,019	0,009	-3,22	0,12
$Ge_{16}Se_{60}Sb_{24}$	-9,13	0,48	0,059	0,003	-9,37	0,37
$Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$	-4,94	0,25	0,032	0,001	-5,36	0,19

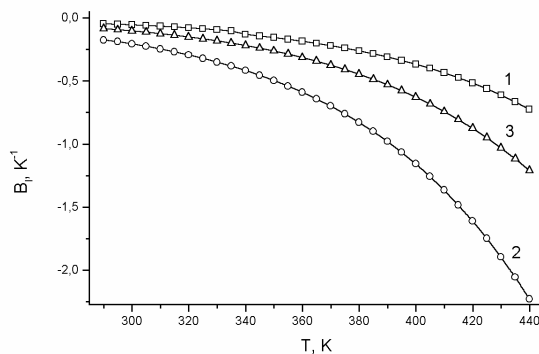


Рис. 1 Залежність інтегральної термочутливості сенсора одиничної товщини на основі стекол системи $Ge-Sb-Se$ від температури: 1 – $Ge_{15}Se_{60}Sb_{25}$; 2 – $Ge_{16}Se_{60}Sb_{24}$; 3 – $Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$.

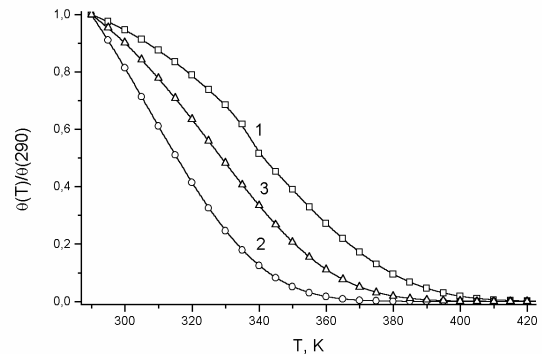


Рис. 2 Залежність відносної зміни пропускання від температури для різних складів ТЧЕ товщиною 0,1 см (нумерація кривих відповідно до рис. 1).

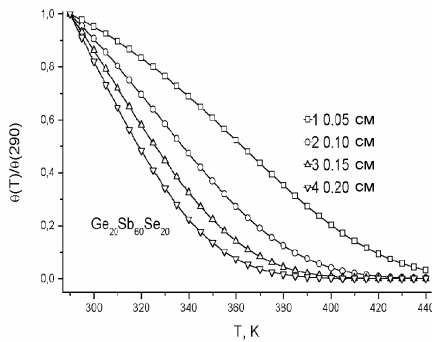


Рис. 3 Залежність відносної зміни пропускання від температури при різних товщинах сенсора на основі $Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$.

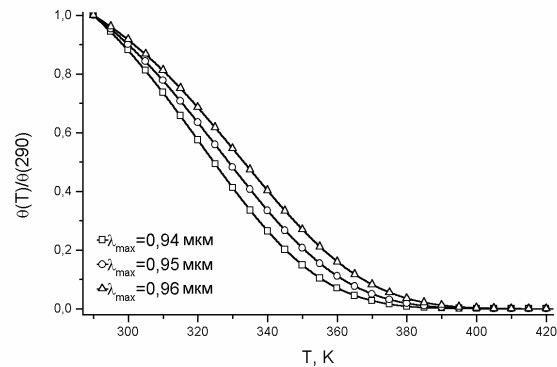


Рис. 4 Вплив зміщення спектральної характеристики світлодіода на передавальну характеристику ТЧЕ ($Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$, товщиною 0,10 см).

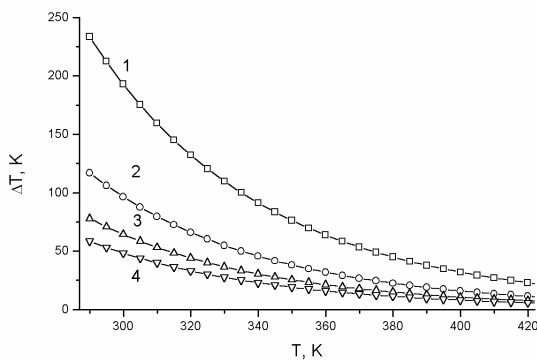


Рис. 5 Залежність від температури максимальної різниці температур для різної товщини ТЧЕ ($Ge_{20}Se_{60}Sb_{20}$): 1 – 0,05 см; 2 – 0,10 см; 3 – 0,15 см; 4 – 0,20 см.

Таким чином, на основі проведених розрахунків, можна констатувати, що для оптимізації параметрів матеріалу, який використовується в якості сенсора, необ-

хідне врахування взаємовиключаючих факторів впливу на передавальну характеристику:

- для підвищення точності вимірюваних температур необхідно використовувати стекла, які мають великий температурний коефіцієнт псевдоширини забороненої зони та максимальну крутість краю поглинання;
- аналогічний вплив на точність має збільшення товщини термосенсора;
- динамічний діапазон вимірюваних температур зростає при мінімізації температурного коефіцієнта псевдоширини забороненої зони та крутості краю поглинання і товщини термосенсора.

Тобто при виборі матеріалу та товщини сенсора необхідно базуватися на конкретних вимогах стосовно інтервалу та точності вимірюваних температур.

Література

1. Yong Thao, Ming Rong, Yanbiao Liao, Sensor Journal, IEEE.–2003.–V.3, is.4.–P.400–403.
2. Л.З. Криксунов, Справочник по основам инфракрасной техники (Сов. радио, М. 1978).
3. Аморфные полупроводники: Пер. с англ. / Под ред. М. Бродски.– (Мир, М.: 1962).

DETERMINATION OF THE THERMOSENSITIVITY OF FIBER OPTIC TEMPERATURE SENSOR

O.V. Kozusenok, I.I. Turjanytsa

Uzhgorog National University, 14 Universitetska str, 88000 Uzhgorod

The results of calculations of the static transformations functions for fiber optic temperature sensor on basis of *Ge-Sb-Se* glasses, are presented. The influence of material parameters and optron's elements sensitivity and the measured temperature range, is analysed.