

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРИСТАЛООПТИЧНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ТАНТАЛАТУ ЛІТІЮ

Ó Степаняк М. М., Степаняк М. В., 2010

Досліджено метрологічні характеристики чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів (ЧЕ КОТІ) із танталату літію. Для дослідження вибрано однорідні монокристали без внутрішніх дефектів і напружень. Основними вимогами до монокристалів є якісна обробка граней та правильна їх орієнтація.

Ключові слова: температура, вимірювання, лазер, кристалооптичний термоперетворювач.

The conducted researches of metrological descriptions of sensible elements of crystalloptic temperature sensors (SE COTS) from tantalat lithium. For research homogeneous monocrystal without internal defects and tensions got out. High-quality treatment of his verges is the basic requirements to the crystals SE COTS that correct orientation.

Keywords: temperature, measurement, laser, crystal optical transducer.

Вступ

Промислова автоматизація нестримно розвивається у напрямі стандартизації та уніфікації апаратно-програмного забезпечення. Створення вбудованих систем автоматизації на основі промислових контролерів, різних інструментальних програмних систем, промислових комунікацій вимагає розроблення нових типів вимірювальних перетворювачів. Температура є одним з найважливіших фізичних параметрів, що дають змогу контролювати технологічні процеси у виробництві. Найпоширенішими у техніці та науковій практиці є термоперетворювачі на базі термоелектрики та термоопорів [1, 2]. Вони вимагають індивідуального градування, періодичної перевірки їх стабільності, важливою є стабільність параметрів ізоляції та впевненість у тому, що значення реєстрованих струмів чи напруг мають лише температурне походження. Усі ці особливості пов'язують з дифузією компонент у сплавленому контакті металів термопари, домішок у термоопорі та зміною кристалічної структури усіх елементів давача [3].

Для заміни гальванічного зв'язку між чутливим елементом первинного перетворювача та апаратурою опрацювання результатів переходять на оптичні та кристалооптичні первинні перетворювачі температури. Проводяться дослідження зі створення засобів вимірювання температури для використання в умовах дії електричних та магнітних полів. Стимулом до початку цих робіт є інтенсивний розвиток кристалооптичних досліджень, оптоелектроніки і волоконно-оптичної техніки [5–8].

Нині розвивається кристалооптичний метод вимірювання температури, який, порівняно з пірометричним, має вищу точність за рахунок стабільності метрологічних характеристик чутливого елемента з анізотропного кристала та оптичного зв'язку з вторинним вимірювальним приладом. Для передавання вимірювального сигналу із зони дії електричних і магнітних полів використовується промінь монохроматичного світла.

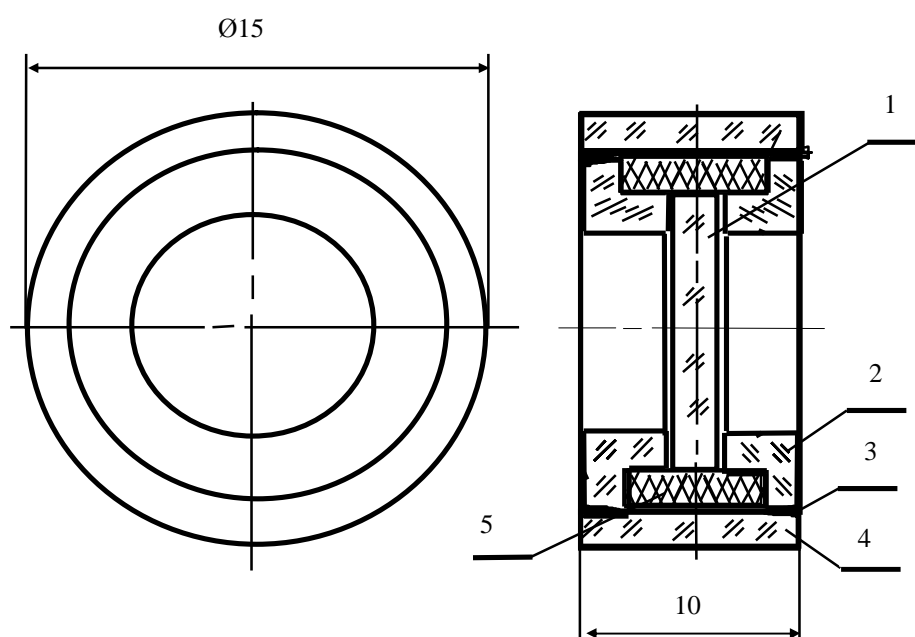
Мета роботи

Створення чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів для кристалооптичних лазерних засобів вимірювання температури підвищеної точності з розширеним температурним діапазоном.

Дослідження температурних залежностей метрологічних характеристик танталату літію

Досліджено метрологічні характеристики чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів (ЧЕ КОТП) із танталату літію. Для дослідження вибрано однорідні монокристали без внутрішніх дефектів і напружень. Основними вимогами до кристала ЧЕ КОТП є якісна обробка його граней та правильна орієнтація.

З метою дослідження метрологічних характеристик ЧЕ створено КОТП різної товщини, які встановлювали в каркаси з кварцового скла. ЧЕ виготовлено з монокристалічних пластинок танталату літію: № 3 товщиною 4, 87 мм і № 4 товщиною 0,24 мм з оптичною віссю, паралельною до її граней. Щоб уникнути впливу механічних напружень каркасу КОТП на ЧЕ, останній закріплювали азбестовими прокладками. Монокристалічні пластинки вільно встановлювали на азбест у каркас із кварцового скла, який після цього заварювали (рис. 1) [4].



*Рис. 1. Кристалооптичний термоперетворювач:
1 – ЧЕ; 2 – бокові кварцові прокладки; 3 – зварювальний шов кварцу;
4 – кварцовий корпус КОТП; 5 – азбестові прокладки*

Відомо [9], що внаслідок температурної залежності двопронезаломлення інтенсивність світла, яке пройшло крізь “поляризатор – кристал – аналізатор”, має періодичну залежність. Паралельний монохроматичний світловий промінь, проходячи термочутливий двопронезаломлювальний кристал, розділяється на два поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах промені, що поширюються з різними швидкостями. Тому між ними виникає оптична різниця ходу.

Оскільки кожному екстремуму відповідає певне значення температури, то за градуовальною характеристикою у координатах “температура – різниця фаз” можна визначити температуру середовища. Інтенсивність світла $I(t)$, яку реєструє фотоприймач, можна подати у вигляді [9 – 11]:

$$I(t) = I_o \cdot \sin^2 \frac{p \cdot k}{l} \cdot t = I_o \cdot \sin^2 \left[\frac{p}{l} \left\{ \left(\int_0^t \{n' - n''\} \frac{\partial d}{\partial t} + d \cdot \frac{\partial d}{\partial t} (n' - n'') \right) \right\} \right] \cdot dt, \quad (1)$$

де k – функція температури; n' , n'' – показники заломлення; λ – довжина хвилі монохроматичного випромінювання; d – товщина кристала ЧЕ; I_o – максимальне значення інтенсивності світла лазера на вході фотоприймача (рис. 2).

Тоді згідно з (1) та рис. 2 вимірювану температуру можна подати так

$$t = t_0 + m t_T + \Delta t,$$

де t_0 – відома початкова температура, коли $t_0 = 0$ і $m = 0$; m – кількість мінімумів фотоструму, зареєстрованих при зміні температури ЧЕ від початкової t_0 до вимірюваної t ; $\Delta t < t_T$ – температура неповного температурного інтервалу t_T . Видно (рис. 2), що деякому значенню фотоструму відповідає набір температур $(m \cdot t_T + \Delta t)$, де $m = 0, +1, +2, \dots$, t_T – інтервал температур, характерний для цього ЧЕ КОТП.

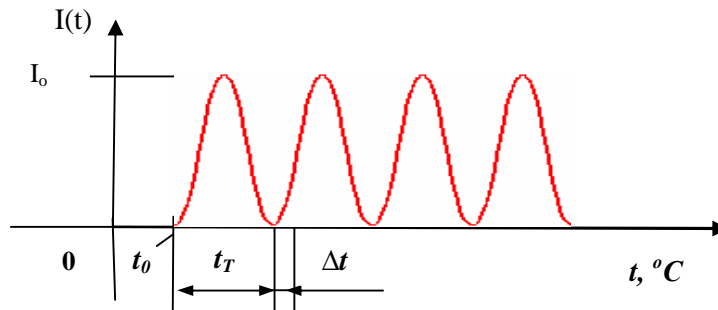


Рис. 2. Залежність інтенсивності світла на вході фотоприймача $I(t)$ від зміни температури

Здійснювались дослідження температурної залежності умовної різниці ходу, що виникає під час нагрівання кристала, в межах $20 \dots 650$ °С. Для досліджень використовувався He-Ne лазер, поляризатор, фотоприймач, підсилювач і вольтметр В7-16. Температура визначалась за допомогою стандартного зразка термоелектродного матеріалу (СЗТМ-1) типу ПП(S), що контактує з кристалом, та компаратора типу Р3003.

Експериментальна схема досліджень показана на рис. 3.

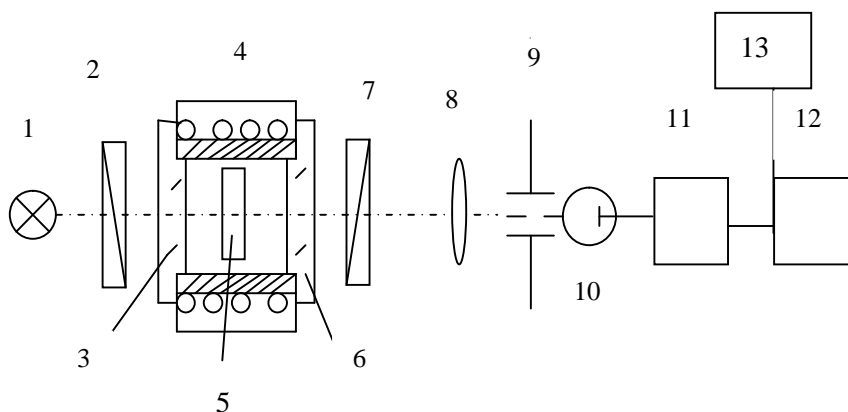


Рис. 3. Експериментальна схема досліджень:

1 – лазер ЛГН -207 Б; 2 – поляризатор; 3, 6 – вікна; 4 – піч; 5 – кристал ЧЕ; 7 – аналізатор;
8 – лінза; 9 – діафрагма; 10 – фотоприймач; 11 – підсилювач; 12 – вольтметр В7-16;
13 – блок опрацювання результатів

Досліджені зразки танталату літію являли собою монокристалічні пластинки завтовшки 4,87 і 0,24 мм з оптичною віссю, паралельною до її граней. Дослідження велося в діапазоні $20 \dots 650$ °С.

Швидкість нагрівання і охолодження змінювалась у межах від 0,02 К/с до 0,14 К/с, при цьому характерний температурний інтервал t_T не змінювався.

Зв'язок між змінами температурної стабільності фізичних характеристик кристалів під час термоциклічного нагрівання з динамічними характеристиками чутливого елемента і методичними похибками, які виникають при цьому, були оцінені за допомогою математичної моделі. Оцінка динамічних характеристик кристалооптичного лазерного методу привела до висновку, що показник теплової інерції для ЧЕ КОТП лежить у межах 0,25–2 с.

ЧЕ з кристалів LiTaO₃ характеризуються градуовальною характеристикою, що має високу чутливість. Характерні температурні інтервали чергування мінімумів: $t_{T3} = 0,4...4,6$ К для кристала № 3, а $t_{T4} = 13,8 ... 66,4$ К для кристала № 4.

Градуовальні характеристики чутливих елементів КОТП з танталату літію $N = f(t)$ подано на рис. 4, де $N = 8 \cdot m$, кількість імпульсів на виході блока опрацювання результатів 13 ; m – кількість мінімумів фотоструму, зареєстрованих у разі зміни температури ЧЕ від початкової t_0 до вимірюваної t .

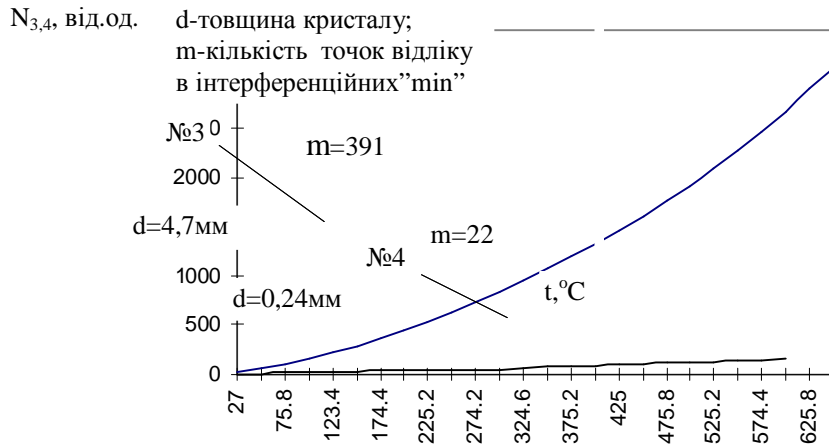


Рис. 4. Градуовальні характеристики чутливих елементів КОТП з танталату літію

За результатами досліджень в діапазоні 20...650 °С встановлено градуовальну статичну характеристику. Для зразка № 3 її можна подати поліномом

$$N_3 = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5,$$

де t_{T3} – температура, °С, а коефіцієнти $A_0...A_5$ дорівнюють, $A_0 = -38,875058$, $A_1 = 1,596102 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $A_2 = 0,0016431 \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $A_3 = 0,0000188 \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$, $A_4 = -4,23547 \text{ E} - 8 \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$, $A_5 = 3,32728 \text{ E} - 11 \text{ } ^\circ\text{C}^{-5}$.

Градуовальна характеристика КОТП № 4 описується аналогічним рівнянням з коефіцієнтами

$$A_0 = -3,254761, A_1 = 0,0912232 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, A_2 = 0,0002188 \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}, A_3 = 5,56161 \text{ E} - 0007 \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}, \\ A_4 = -1,64407 \text{ E} - 0009 \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}, A_5 = 1,5749 \text{ E} - 0012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-5}.$$

Часова стабільність метрологічних характеристик КОТП з танталату літію досліджувалась термоцилюванням у діапазоні 20... 650 °С (25 циклів тривалістю 6,0 год), а також нагріванням упродовж 80 год за температури 600 °С. При цьому значення температури в інтерференційних мінімуах залишалося незмінним.

Використовуючи методику вимірювання температури кристалооптичним методом, запропоновану в [12] (рис. 5), можна виконувати вимірювання температури t , якщо невідома t_0 – початкова температура

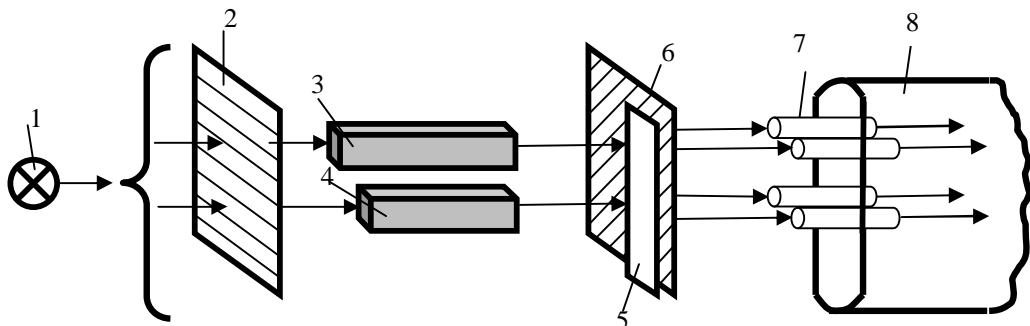


Рис. 5. Експериментальна схема досліджень КОТП з використанням двох ЧЕ:
1 – лазер ЛГН-207Б; 2 – поляризатор; 3 – 4 – кристали ЧЕ; 5 – чвертьхвильова пластинка;
6 – аналізатор; 7 – оптоволокно (фотоприймачі); 8 – блок опрацювання результатів

але міститься в певному діапазоні. Межі діапазону визначення початкової температури – t_0 залежать від матеріалу та товщини кристалів.

Якщо товщини кристалів (рис. 4) ЧЕ 3, ЧЕ 4 КОТП відповідно d_3, d_4 відносяться як $d_3 : d_4 = 9,7$ і тоді температурні інтервали $t_{T4} : t_{T3} = 9,7$ [12].

Виконано дослідження та моделювання шкали такого КОТП, в результаті чого з отриманих у відносних одиницях температурних інтервалів – $0,1 \cdot t_{T3}, 0,1 \cdot t_{T4}$ та $0,1 \cdot t_{T3}/4$ сформовано однозначний код – n для кожного значення температури на шкалі – t .

Використовуючи ЧЕ 3 з товщиною $d_3 = 2,32$ мм з та ЧЕ 4 $d_4 = 0,24$ мм з танталату літію, температурні інтервали відповідно $t_{T3} = 6,53$ °С, $t_{T4} = 63,4$ °С, можна одержати діапазон вимірювання початкової температури

$$\Delta t_0 = b \cdot t_{T4} = 2,91 \cdot 63,4 = 184,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $b = 2,91$ – коефіцієнт розширення діапазону при визначенні початкової температури t_0 , отриманий в результаті моделювання та дослідження ЧЕ 3, ЧЕ 4 з температурними інтервалами $t_{T4} : t_{T3} = 9,7$.

Якщо нижня межа діапазону вимірювання температури $t_{\min} = 24,2$ °С, то верхня

$$t_{\max} = t_{\min} + \Delta t_0 = 24,2 + 184,5 = 208,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Висновки

Результати досліджень показали, що ЧЕ КОТП з танталату літію мають високостабільні метрологічні характеристики та забезпечують можливість дистанційного вимірювання температури в малогабаритних об'єктах практично без тепловідведення [13] і під високим електричним потенціалом з повною гальванічною розв'язкою від об'єкта досліджень, який перебуває під високим електричним потенціалом в електромагнітних полях у діапазоні 20...650 °С з похибкою $\pm (0,15 + 0,0025 t)$ К, а використання методу з двома ЧЕ КОТП [12] дає змогу визначати початкову температуру t_0 у діапазоні 24÷210 °С.

1. Куинн Т. Температура. – М.: Мир, 1985. – 448 с. 2. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. Вимірювання температури: теорія та практика. – Львів:Beskid Біт, 2006. – 560 с. 3. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2003. – 438 с. 4. Stadnyk B., Stepanyak M. CRYSTALLOPTIC LASER THERMOMETRY // 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science, TEMPMEKO' 96, Abstract, Torino, Italy, 1996. – P. 63. 5. А. с. 1689775 (СССР) МКИ G01K 11/12. Поляризационно-оптический цифровой термометр / М.В. Степаняк, Б.И. Стадник, П.Г. Столярчук. – Оpubл. в БИ., 07.11.91. Бюл. № 5. – С. 41. 6. Стадник Б.І., Луцик Я. Т., Степаняк М.В. Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів // Тези доп. 8-ї Міжнар. конф. “Температура 2003. ”Тези доп. – Львів, 2003. – С. 101. 7. Степаняк М.М., Луцик Я.Т. Розширення можливостей вимірювання температури та частоти обертових об'єктів кристалооптичним методом // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – № 639: Автоматика, вимірювання та керування. – 2009. – С. 23–31. 8. Пат. на винахід України № 91663 МПК G01K 13/00, G01P 3/36, G01H 1/00. Пристрій для вимірювання температури та частоти обертових об'єктів / Мих. М. Степаняк, Я.Т. Луцик. – Оpubл. в ІБ 10.08. 2010. Бюл. № 15. 9. Романюк М.О. Кристалооптика. – К., 1997. – С. 432. 10. А. с. 821960 (СССР) Поляризационно-оптическое устройство для измерения температуры. – Оpubл. в 1981, Бюл. № 14. 11. Степаняк М.В. Оптичні методи вимірювання температури з використанням анізотропних кристалів // Технічні засоби автоматизації вимірів та керування науковими дослідженнями // Вісн. Львів. політехн. ін-ту. – 1992. – С. 87–91. 12. Степаняк М., Степаняк Мих. / Розвиток кристалооптичного методу вимірювання температури з використанням двох чутливих елементів // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомч. наук.-техн. зб. – Львів, 2010. – Вип. 71. – С. 58–63. 13. Габа В.М., Степаняк М.В., Столярчук П.Г. К вопросу определения методической погрешности поляризационно-оптического термометра // Праці Сьомої міжнар. наук.-техн. конф. “Електричні методи та засоби вимірювання температури: Тези доп. – Львів, 1992. – С. 34–35.