

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 535.5; 535.327; 548.0:535.6

РОЗВИТОК КРИСТАЛООПТИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Микола Степаняк¹, Михайло Степаняк², 2010

¹Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
²кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Виконано дослідження кристалооптичного методу вимірювання температури, що дає змогу знаходити початкову температуру та підвищувати точність вимірювання з використанням різної кількості чутливих елементів кристалооптичного термоперетворювача.

Осуществлено исследование кристалооптического метода определения начальной температуры и повышения точности измерения с использованием различного количества чувствительных элементов кристалооптического термопреобразователя.

The temperature transducer was investigated for its precision increasing due to the primary temperature estimation and different number of crystal sensors using.

Вступ. На фоні стрімкого росту застосування у виробництві автоматизованих систем контролю й управління, нових технологічних процесів і гнучких автоматизованих виробництв потреба розроблення нових чутливих елементів для первинних перетворювачів повинна розглядатися як завдання першочергове. Крім високих метрологічних характеристик, первинні перетворювачі повинні характеризуватись високою надійністю, завадостійкістю, довговічністю, стабільністю, якомога меншими габаритами, масою, енергоспоживанням та вартістю, а також бути сумісними з мікроелектронними пристроями опрацювання інформації [1]. Нині інтенсивно досліджуються та розробляються мікроелектронні первинні перетворювачі на основі інтегральної оптики. Вони основані на оптичних, електрооптичних та інших ефектах в оптично активних матеріалах та оптичних структурах, наприклад, рідких кристалах, волоконно-оптичних елементах, їх комбінаціях тощо. При цьому широко застосовуються лазери, фоточутливі елементи та пристрої. Оптичне волокно стає предметом широкого використання не тільки як провідник оптичного сигналу в комунікаційних мережах, але також як активне середовище, що само або в комбінації з іншими оптично активними чи електронними матеріалами та структурами здійснює реєстрацію фізичних величин [2].

Вимоги вимірювання температури значною мірою задовольняють кристалооптичні та волоконно-оптичні первинні перетворювачі. Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів (ЧЕ КОТП) підтвердили можливості використання їх для дистанційного вимірювання температури практично без тепловідведення на об'єктах під високим електричним потенціалом [3].

Мета роботи. Створення КОТП для підвищення точності вимірювання температури та збільшення надійності в умовах дії електромагнітних полів під високим електричним потенціалом.

Дослідження кристалооптичних термоперетворювачів з різною кількістю чутливих елементів. Відомо, що при прохоженні світла через систему «поляризатор – кристал – аналізатор», внаслідок температурної залежності двозаломлення кристала його інтенсивність $I(t)$, яка реєструється фотоприймачем [4, 5], має періодичну залежність:

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

де k – функція температури; n' , n'' – показники заломлення; λ – довжина хвилі монохроматичного випромінювання; d – товщина кристала чутливого елемента кристалооптичного термоперетворювача.

Оскільки кожному екстремуму відповідає певне значення температури, то за градуальною характеристикою у координатах «температура – різниця фаз» можна визначити температуру середовища.

Тоді згідно з (1) вимірювану температуру t можна подати так:

$$t = t_0 + m t_T + \Delta t, \quad (2)$$

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 температури t ; $\Delta t < t_T$ – температура неповного температурного інтервалу t_T .

Отже, деякому значенню фотоструму фотоприймача відповідає набір температур ($m t_T + \Delta t$), де $m = 0, +1, +2, \dots$, t_T – інтервал температур, характерний для цього ЧЕ КОТП.

Однак тут існує проблема визначення початкової температури t_0 та Δt , хоч цей метод має високу повторюваність метрологічних характеристик ЧЕ КОТП, що робить його перспективним [3]. Вимірювання Δt можна виконувати за методикою, описаною в [6].

Для вимірювання температури кристалооптичним методом та вирішення проблеми визначення t_0 можна використати первинний КОТП на основі двозаломлювальних кристалів (рис. 1) [7].

Такий КОТП [7] складається зі схрещених поляризатора 7 та аналізатора 9 та решітки двозаломлювальних кристалів ЧЕ 1–5 між ними. Послідовність товщин d_5, d_4, d_3, d_2, d_1 двозаломлювальних кристалів ЧЕ відповідає відношенню 1 : 2 : 4 : 8 : 16. Відповідно, кристал ЧЕ 1 з більшою товщиною d_1 відтворює найменший двійковий розряд. Вихідний пучок лазерного випромінювання через оптичні волокна відповідного кристала ЧЕ 1–5 переносить сигнал на фотоприймачі. В результаті цього можна отримати у числовому вигляді електричний еквівалент температури. Вихідний пучок проходить через пару оптичних волокон для передавання вихідних сигналів, що генеруються кожним кристалом ЧЕ. Кожна пара вихідних оптичних волокон передає половину квадратурної пари сигналів. У цих парах різниця фаз між сигналами становить 90° , тобто $\lambda/4$. Значення інтенсивності лазерного випромінювання квадратурної пари сигналів з температурою змінюється залежно від температури за формулою (1). За допомогою детектування та декодування отримують електричні сигнали, які застосовують для точного відтворення значення температури в цифровій формі.

Такий КОТП використовують як первинний аналого-цифровий перетворювач температури (АЦПТ) на цифровий сигнал у двійковому коді. Однак у разі використання 5 ЧЕ похибка такого АЦПТ становить 3 %, а температурний діапазон вимірювання визначається температурним інтервалом t_{T5} , ЧЕ 5. Збільшення точності вимагає збільшення кількості кристалів ЧЕ, що ускладнює конструкцію такого АЦПТ та збільшує його інерційність.

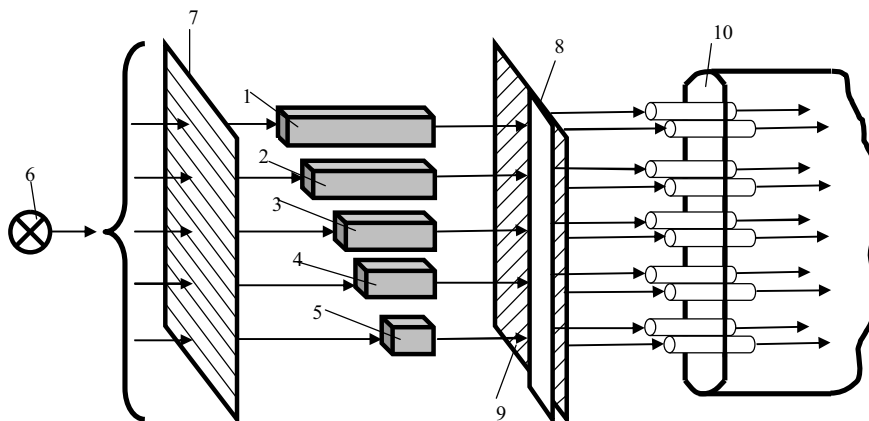


Рис. 1. Первинний кристалооптичний термоперетворювач на основі двозаломлювальних кристалів: 1–5 – кристали ЧЕ; 6 – лазер ЛГН-207Б; 7 – поляризатор; 8 – чвертьхвильова пластинка; 9 – аналізатор; 10 – оптоволокно (фотоприймачі)

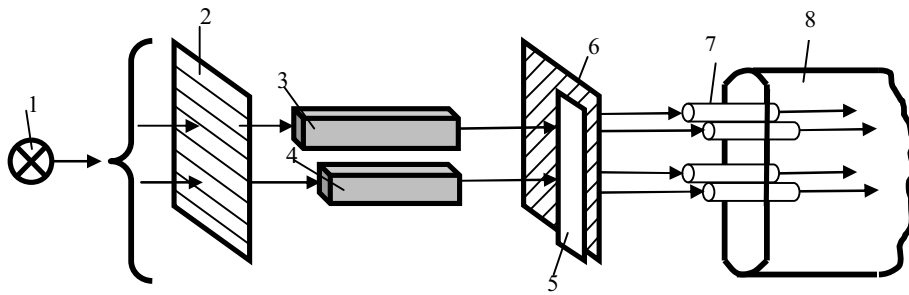


Рис. 2. КОТП: 1 – лазер ЛГН-207Б; 2 – поляризатор; 3 – 4 – кристали ЧЕ; 5 – чвертьхвильова пластинка; 6 – аналізатор; 7 – оптоволокну (фотоприймачі); 8 – блок опрацювання результатів

Використовуючи формулу (2), можна отримати значення вимірюваної температури t для кожного ЧЕ КОТП (рис. 1)

$$t = t_0 + m_1 t_{T1} + \Delta t_1, \quad (3)$$

$$t = t_0 + m_2 t_{T2} + \Delta t_2, \quad (4)$$

$$t = t_0 + m_3 t_{T3} + \Delta t_3, \quad (5)$$

$$t = t_0 + m_4 t_{T4} + \Delta t_4, \quad (6)$$

$$t = t_0 + m_5 t_{T5} + \Delta t_5, \quad (7)$$

де $-\Delta t_{1-5} < t_{T1-5}$ – температура неповних температурних інтервалів, відповідних $-t_{T1-5}$; $m_{1-5} = 0, +1, +2, \dots$ – кількість мінімумів фотоструму, t_{T1-5} – інтервали температур для кожного ЧЕ залежно від товщини.

Для розширення температурного діапазону, підвищення точності вимірювання температури та зменшення інерційності ЧЕ КОТП нами запропоновано КОТП, поданий на рис. 2.

У цьому КОТП товщини кристалів ЧЕ 3, ЧЕ 4 відповідно d_3, d_4 відносяться як $d_3 : d_4 = 9,7$ і тоді температурні інтервали $t_{T4} : t_{T3} = 9,7$.

Для забезпечення вимірювання температури поляризатор 2 та аналізатор 6 перебувають у схрещеному положенні, кристали ЧЕ 3, ЧЕ 4 в діагональному. Пари променів, ординарний та екстраординарний, що генеруються ЧЕ 3 та ЧЕ 4, отримують зсув фаз, що залежить від температури. Частина випромінювання з кожного каналу проходить через чвертьхвильову пластинку 5 та одержує додатковий зсув фаз $-\pi/2$ і потрапляє через оптоволокну на фотоприймачі 7 та блок опрацювання результатів 8. На виході фотоприймачів отримуємо електричні сигнали $U_{\phi 3-1}, U_{\phi 3-2}, U_{\phi 4-1}, U_{\phi 4-2}$, що визначаються квадратом амплітуди відповідних оптичних сигналів на вході та їх чутливістю $S_{3-1}, S_{3-2}, S_{4-1}, S_{4-2}$, тобто

$$U_{\phi 3-1} = S_{3-1} I_0 \sin^2 \frac{\pi \cdot k}{\lambda} t, \quad (8)$$

$$U_{\phi 3-2} = S_{3-2} I_0 \sin^2 \frac{\pi \cdot k}{\lambda} (t - \frac{t_{T3}}{4}) \quad (9)$$

$$U_{\phi 4-1} = S_{4-1} I_0 \sin^2 \frac{\pi \cdot k}{\lambda} t, \quad (10)$$

$$U_{\phi 4-2} = S_{4-2} I_0 \sin^2 \frac{\pi \cdot k}{\lambda} (t - \frac{t_{T4}}{4}), \quad (11)$$

де I_0 – інтенсивність світла на виході термочутливого елемента двозаломлювальних кристалів – ЧЕ 3, ЧЕ 4; $\lambda = 632,8$ нм – довжина хвилі джерела 1 монохроматичного поляризованого світла; k – функція від температури t ; t_{T3}, t_{T4} – температурний інтервал для термочутливого кристала ЧЕ 3 та ЧЕ 4, що відповідає фазі, кратній до 2π (рис. 3).

Для формування градуовальної характеристики КОТП ЧЕ3 температурний інтервал t_{T3} ділять на 10 та здійснюють вибірки вимірювання напруги $U_{\phi 3-1}$ в кожній точці поділу (рис. 3), використовуючи АЦП та отримують цифровий код Nt_{T3-1} . Подаючи напругу $U_{\phi 3-2}$ на компаратор, одержують на його виході напругу $U_{\text{вих. комп.}}$, що дорівнює лог. «1», якщо напруга $U_{\phi 3-2} \geq U_0 + U_{\phi 3-2m}/2$, а якщо напруга $U_{\phi 3-2} < U_0 + U_{\phi 3-2m}/2$, то лог. «0», та отримують цифровий код Nt_{T3-2} . Використовуючи цифрові коди Nt_{T3-1}, Nt_{T3-2} формують цифровий код Nt_{T3-3} , що відповідає дробовій частині температурного інтервалу t_{T3} . Ділення температурного інтервалу t_{T3} на 10 подане на рис. 3, а результати поділу занесені в табл. 1 [6, 8]. Аналогічно здійснюють формування градуовальної характеристики КОТП ЧЕ 4 з діленням температурного інтервалу t_{T4} на 40 частин.

Виконані дослідження та моделювання шкали такого КОТП, у 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 .

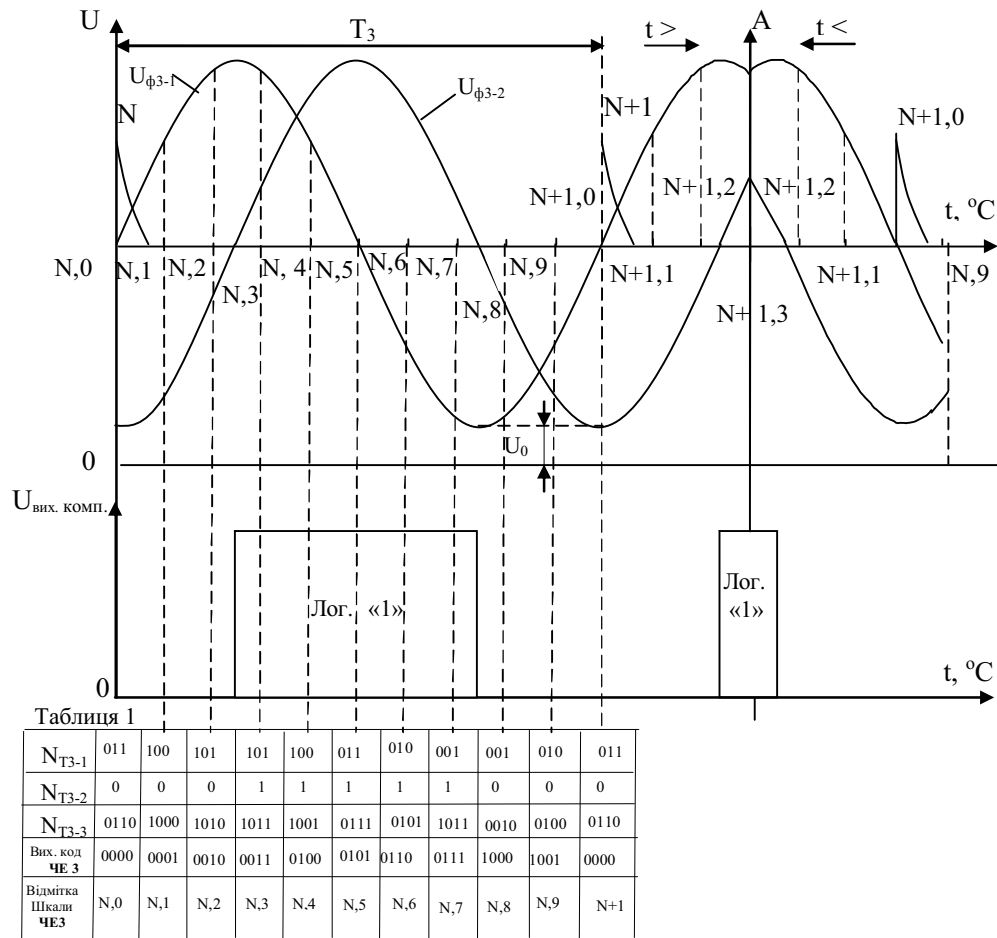
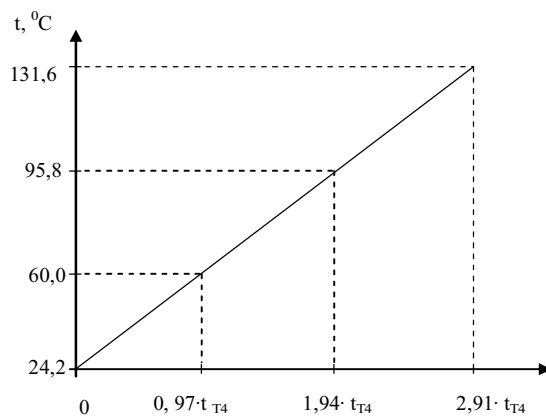


Рис. 3. Часова залежність формування градуювальної характеристики вихідного сигналу від температури ЧЕ 3 КОТП $N = f(t)$



t_{T4} , відн.од.

Рис. 4. Температурна залежність діапазону визначення початкової температури t_0 від кількості температурних інтервалів t_{T4}

При використанні ЧЕ 3 з товщиною $d_3 = 4,04$ мм з та ЧЕ 4 $d_4 = 0,42$ мм з ніобату літію, температурні інтервали відповідно $t_{T3} = 3,8$ °С, $t_{T4} = 36,9$ °С, можна одержати діапазон вимірювання початкової температури

$$\Delta t_0 = b \cdot t_{T4} = 2,91 \cdot 36,9 = 107,4$$
 °С, (12)

де $b = 2,91$ – коефіцієнт розширення діапазону під час визначення 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 границя діапазону вимірювання температури $t_{\min} = 24,2$ °С, то

$$t_{\max} = t_{\min} + \Delta t_0 = 131,6$$
 °С. (13)

За відношення температурних інтервалів $t_{T4} : t_{T3} = 9,7$ та ділення t_{T3} на 10 частин, а t_{T4} на 40, зміна температури на $3 \cdot t_{T4}$ приводить до зменшення температурного діапазону визначення початкової температури t_0 на 9 відн. од., порівняно з $3 \cdot t_{T4}$ (рис. 4), але дає змогу отримати 291 відн. од. для її визначення та формування шкали КОТП у відн. од., підвищити точність вимірювання в 9,3 раза порівняно з [7] і двома, а не з п'ятьма ЧЕ КОТП.

Висновки. Запронований метод вимірювання температури з використанням двох ЧЕ КОТП дає змогу розширити діапазон вимірювання на коефіцієнт розширення $b = 2,91$, зменшити інерційність КОТП у три рази та підвищити точність вимірювання при опрацюванні інформації з чутливого елемента з більшою товщиною, тобто ЧЕ3 КОТП згідно з [6, 8]. Результати досліджень та використання ЧЕ для КОТП з ніобату літію дають змогу отримати високостабільні метрологічні характеристики [3, 9], що забезпечує можливість дистанційного вимірювання температури в магнітних полях на об'єктах під високим електричним потенціалом, практично без тепловідводу в діапазоні 24...132°С. Розвиток наукових досліджень кристалооптичних методів та пошук нових матеріалів для ЧЕ КОТП вказує на їх перспективність з огляду на значне розширення можливості вимірювання температури і підвищення їх точності [10, 11].

1. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К.Хататэ; Под ред.Т.Окоси: Пер. с япон.-Л. Энергоиздат. Ленингр. отд-е, 1990. – 256 с.: ил. 2. Буджак Я. С та інші. Елементи теорії мікроелектронних сенсорів / Буджак Я.С., Готра З.Ю., Готра О. З., Каліта В., Лопатинський І.С., Раренко І. М.; За редакцією З. Ю. Готри. – Львів: Ліга – Прес. 2001. – 636 с. 3. Стадник Б., Луцик Я., Степаняк М. Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних перетворювачів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2007. – № 67. – С. 69–72. 4. Романюк М. О. Кристалооптика. – К., 1997. – 432 с. 5. А.с. 821960 (СССР) Поляризаційно-оптичне устройство для измерения температуры / Романюк Н.А., Костецкий, Габа В.М. / – Опубл. в БИ., 15.04.81. Бюл. №14. 6. А.с.1500854(СССР) МКИ G01K 11/12. Поляризаційно-оптичний цифровий термометр // Степаняк М.В., Кочан В.А., Габа В.М., Столярчук П.Г. – Опубл. в БИ., 15.08.89. Бюл. № 30, с.41.7. Пат. 4215576 США МКИ G01K 11/14. Optical Temperature Sensor Utilizing Birefringent Crystals // W. Qwick, L. H. Height, K. A. James, V. H. Strahan / Опубл. 05. 08.1980. 8. А.с.1689775(СССР) МКИ G01K 11/12. Поляризаційно-оптичний цифровий термометр / Степаняк М.В., Стадник Б.И., Столярчук П.Г. – Опубл. в БИ., 07.11.91. Бюл. № 5. – С.41. 9. Стадник Б., Луцик Я., Степаняк М. / Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних перетворювачів. Тези доповідей 8-ї міжнародної конференції “Температура 2003”. – Львів, 2003. – С.101. 10. Габа В. М. Спектрально-температурні деформації оптичних індикаторів у іонних кристалах та фізичні аспекти їх практичного застосування. – Львів: Ліга-Прес, 2006. – 228 с. 11. Степаняк М. М., Луцик Я. Т. Розширення можливостей вимірювання температури та частоти обертюваних об'єктів кристалооптичним методом // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – № 639. – 2009. – С. 23–31.