

УДК: 535.5; 535.327; 548.0:535.6

КРИСТАЛООПТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ З ВНУТРІШНЬОЮ РЕПЕРНОЮ ТОЧКОЮ

© Романюк М.¹, Костецький О.², Романюк М.³, Андрієвський Б.^{1,4}, Стадник В.¹, 2003¹ Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна² Львівський державний аграрний університет, Львів, Україна³ Національний університет "Львівська політехніка",

вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

⁴ Технологічний університет Кошаліна, Кошалін, Польща

Обґрунтовано новий кристалооптичний метод вимірювання температури на базі інверсії знака та температурної залежності двопронезаломлення Δn кристалів, у якому точку інверсії знака Δn використовують як внутрішній репер, а двопронезаломлення як індикатор температури. Метод вирішує деякі проблеми, що виникають перед термометрією на базі термоелектрики і термоопору, а також забезпечує нові можливості вимірювання температури у важких умовах (високі електромагнітні завади, деталі, що обертаються). Він ґрунтується і дещо послаблює впливи перекристалізації та дифузійних процесів на параметри перетворювача на базі монокристалів природно забезпечує гальванічну розв'язку перетворювача та індикатора та містить внутрішній репер (або й декілька) температур, корисний для контролю стабільності градуювальної характеристики перетворювача.

Обосновывается новый кристалооптический метод измерения температуры на базе инверсии знака двупреломления и температурной зависимости двупреломления Δn кристаллов, в котором точка инверсии знака двупреломления Δn используется как внутренний репер, а двупреломление как индикатор температуры. Метод решает некоторые проблемы, которые возникают перед термометрией на базе термоэлектрики и термосопротивления, а также открывает новые возможности измерения температуры в тяжелых условиях (значительные электромагнитные преграды, детали, которые вращаются). Этот метод базируется на монокристаллах и несколько ослабляет влияние перекристаллизации и диффузионных процессов на параметры датчика, обеспечивает гальваническую развязку датчика и индикатора и содержит внутренний репер (или несколько) температур, который полезен для контроля стабильности градуировочной кривой датчика.

A new crystal optical technique for measuring temperature, which is based on the birefringence sign inversion point and the temperature dependence of the birefringence Δn in crystals, is substantiated. Within the technique, the sign inversion point is used as an internal reference point, while the birefringence serves as a temperature measuring method itself. The technique solves a number of problems appearing in frame of usual thermometry based on thermoelectricity and thermo-resistance and gives some new opportunities to measuring temperature under the complicated circumstances (high electromagnetic noises, revolving details, etc.). Being based upon using single crystals, it weakens the influences of re-crystallization and diffusion processes on the sensor parameters, provides a galvanic isolation of the sensor and indicator channels in a natural way and includes an internal reference temperature point (or even several such points), the latter being useful for checking the stability of calibrating characteristics of the sensor.

Вступ. Найпоширенішими у техніці є термоперетворювачі на базі термоелектрики та термоопорів [1, 2]. Вони вимагають індивідуального градуювання, періодичної перевірки 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 дифузійною компонент у сплавленому контактні металів термопари, домішок у термоопорі та зміною кристалічної структури усіх елементів перетворювача.

Фундаментальні дослідження у цій галузі привели до ідеї термопари на базі монокристалів [3], заміни або удосконалення гальванічного зв'язку перетворювача з індикатором та створення перетворювача з внутрішнім

репером температури [4]. У ролі останнього використовують спеціальну насадку на термопару з металом, температура плавлення якого і визначає реперну точку, у якій змінюється швидкість наростання або зменшення показів індикатора при незмінній потужності нагрівника чи холодильника. Для отримання іншої реперної точки слід використати іншу насадку.

Для заміни гальванічного зв'язку між перетворювачем та індикатором переходять на оптичні перетворювачі температури. Одним з варіантів такого перетворювача є розсіювальна комірка, заповнена рідиною і порошком скла, які різняться розмірами, температурною і спектральною залежністю показників заломлення n . Якщо ці параметри відмінні, комірка сильно розсіює світло, при перетині кривих $n(\lambda)$ для рідини і скла середовище у комірці стає оптично однорідним на певній довжині хвилі λ і при певній температурі за мінімумом розсіювання встановлюють температуру.

Пропонуємо кристалооптичний перетворювач температури на базі двопронезаломлення Δn та інверсії знака двопронезаломлення.

Основна ідея методу, оснований на двопронезаломленні світла. Запропонований нами метод вимірювання температури ґрунтується на інверсії знака двопронезаломлення двовісних кристалів [5]. Він дає змогу задовольнити згадані нові рішення термометрії на базі термоопору і термоелектро-рушійної сили. Тут перетворювач – монокристалічна пластинка з певного двовісного кристала хорошої оптичної якості. Температурна залежність двопронезаломлення визначає шукану температуру, точка інверсії знака двопронезаломлення служить внутрішнім репером, оптичний зв'язок перетворювача з індикатором (екран, на який проєктують інтерференційну картину або фотоприймач) є природним для цього типу приймачів [6, 7].

Реперну температуру фіксують візуально за формою інтерференційної картини або за мінімумом фотоструму, що є позитивною особливістю методу, оскільки не є обов'язковими абсолютні вимірювання струму чи напруги. Відхилення температури від реперної визначають за температурними змінами двопронезаломлення (на практиці – різниці ходу) цього самого перетворювача при проходженні світла у напрямі інверсії знака двопронезаломлення тобто без переюстування оптичної системи.

Двопронезаломлення світла у кристалах та інверсія його знака. Кристали усіх сингоній, крім

кубічної, є двопронезаломлювальні. Сьогодні описано тисячі таких матеріалів, що відрізняються величиною Δn , його температурою та спектральною залежністю, а також діапазоном температур, у якій матеріал є стійким. Відомо чимало тугоплавких кристалів, придатних до роботи в діапазоні температур понад 1500°C . Ці матеріали можуть бути використані як перетворювачі температури на базі двопронезаломлення. На жаль, сьогодні відомо лише декілька десятків кристалів, у яких спектральні залежності показників заломлення перетинаються в одній точці, у якій підвищується симетрія оптичної індикатриси та змінюється знак різниці показників заломлення для відповідного напрямку поширення світла.

У одновісних кристалах така точка називається ізотропною (кристал стає ізотропним), у двовісних – виникає ізотропний напрям, кристал стає оптично одновісним. Таку ситуацію однозначно встановлюють за формою коноскопичної картини – система лемніскаат для двовісного кристала та система концентричних кілець – для одновісного [5].

У таблиці наведено характерні коефіцієнти, що визначають чутливість різних методів вимірювання температури і дають змогу оцінити перспективи запропонованого кристалооптичного методу.

Кристалооптичний термометр складається з перетворювача, розташованого у діагональному положенні між схрещеними ніколями, приймача випромінювання та відображального пристрою. Якщо температурна залежність різниці ходу променів у перетворювачі є лінійною, то певному інтервалу температур ΔT відповідатиме однакова зміна інтенсивності світла від мінімуму до максимуму. Результуюча температура така

$$T = T_0 + (m + \Delta m)\Delta T,$$

де T_0 – вихідна температура, при якій вмикається лічильник імпульсів фотоструму, m – ціла кількість періодів змін фотоструму, Δm – частина такого періоду, яку можна вимірювати кристалооптичним компенсатором або оцінювати за значенням фотоструму в одиницях його максимальної величини.

При нелінійній залежності двопронезаломлення від температури різним значенням m будуть відповідати неоднакові інтервали ΔT , але це буде враховано під час градування. Є певні труднощі, пов'язані з квадратичною залежністю $I(T)$, однак ця задача вже має розв'язки [7, 10]. Зрозуміло, в реєструючій системі повинен бути реверсивний лічильник імпульсів фотоструму.

Фотострум визначається інтенсивністю світла, яке випромінюється із системи схрещених поляризаторів і зразка між ними, за таким співвідношенням

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 (\pi d(n' - n'')/\lambda),$$

де I_0 – інтенсивність світла, що падає на зразок, d – товщина зразка по ходу променя, $(n' - n'')$ – відповідне двоприменезаломлення, яке при $T = T_0$ дорівнює нулеві, λ – довжина світлової хвилі, яка використовують для отримання інтерференційної картини, α – кут між напрямками коливань у поляризаторі та у кри-

сталічному препараті. Зрозуміло, що найкраща орієнтація зразка відповідає умові $\alpha = 45^\circ$.

Чутливість методу визначається параметрами перетворювача та приймальної апаратури і лежить у межах $10^{-1} \dots 10^{-3}$ К. Зокрема, для $\Delta I \sim 0.01 I_0$, $d \sim 0.1$ см, $\partial \Delta n / \partial T \sim 5 \cdot 10^{-5}$ К $^{-1}$, $\lambda \sim 6 \cdot 10^{-5}$ см вона становить $\Delta T \sim 2 \cdot 10^{-2}$ К. Як правило, для освітлення використовують лазер, так що I_0 є значним і не виникає потреби застосовувати прецизійні спектральні прилади.

Рис. 2 ілюструє температурну залежність двоприменезаломлення деяких кристалів з інверсією двоприменезаломлення.

Параметри перетворювачів температури

Класичний

Робоча речовина	Метод вимірювання	Термічний коефіцієнт, 10^{-5} К $^{-1}$			
		Опір, Ом	ЕРС, В	Об'єм	довжина
платина	Термоопір	350			0,89
платина-родій	Термо-ЕРС		0,95		
гелій				365	
ртуть	Об'ємний			15	

Кристаллооптичний

Робоча речовина	Область температур, К	Область спектра, А°	Напрямок у кристалі		$\partial \Delta n / \partial T, 10^{-5}$ К $^{-1}$
			$\Delta n \neq 0$	$\Delta n = 0$	
$(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	190–350	5000	Z		0.4–6.6
$RbKSO_4$	100–800	5000	X	X, Y, Z	0.86
$RbNH_4SO_4$	120–620	5000	X	Y	1.73
$LiKSO_4$	185–400	5000	Z	Y	0.8
$LiRbSO_4$	100–420	5000	X		0.47
Rb_2ZnCl_4	560–600	5000	Y		2.0
$LiNbO_3$	300–700	6320	Z		7
$LiNbO_3$	1161	6320	X		0

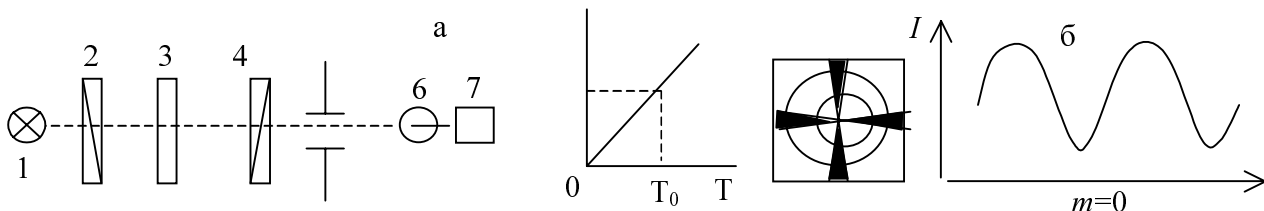


Рис. 1. Блок-схема кристаллооптичного термометра; а): 1 – лазер, 2,4 – поляризатори, 3 – кристаллооптичний перетворювач, 5 – екран з отвором по осі променя, 6 – фотоприймач, 7 – індикатор фотоструму. Видгляд інтерференційної картини в точці інверсії знака двоприменезаломлення та температурна зміна фотоструму (б)

Характеристики методу. На одному зразку можна встановити декілька реперних точок температури, замінивши робочу довжину світлової хвилі, на якій спостерігається інверсія знака двопронезаломлення.

Реперну точку можна встановити за якісною ознакою (мінімум фотоструму або форма коноскопічної картини, характерного для зрізу одновісного кристала, нормального до оптичної осі).

Негальванічний зв'язок перетворювача і приймача, незалежний від ступеня селективності проміжного середовища, як для оптичної пірометрії.

Дає змогу вимірювати температуру деталей, що обертаються або перебувають під високою напругою.

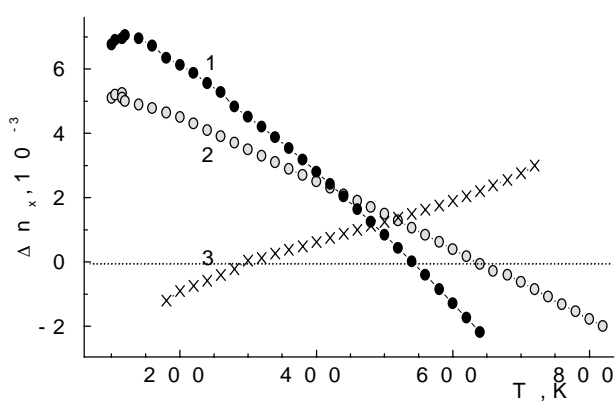


Рис. 2. Температурні залежності двопронезаломлення Δn_x кристалів RbKSO_4 (1), RbNH_4SO_4 (2) і LiKSO_4 (3).

Їх недоліками є:

1. Порівняно висока теплова інерційність (перетворювач – діелектрик).

2. Необхідність градування перетворювача (як вторинний перетворювач температури) та юстувати його відносно лазерного пучка.

Загалом кристалооптичний перетворювач температури, оснований на досконалих монокристалах, наявність внутрішнього репера (точка інверсії знака двопронезаломлення) та оптичний зв'язок перетворювача з індикатором створюють нові можливості з термометрії спеціальних об'єктів.

1. Геращенко О.А., Еромина А.Н., Стадник Б.И. Температурные измерения. – К., 1989.
2. Анатъчук Л.М. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К., 1979.
3. Куритник И.П., Бурханов Г.С., Стадник Б.И. Материалы высокотемпературной термометрии. – М., 1986.
4. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Коган В.В. Измерения температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М., 1986.
5. Романюк М.О. Кристаллооптика. – К., 1997.
6. Romanjuk M.O., Andrievsky V., Kostetsky O., Romanjuk M.M., Stadnyk V. Crystal optical method for temperature measuring. Condensed Matter Physics. 2002. – V.5. – №3 (31). – P. 579–586.
7. Романюк М.О., Костецкий О.М., Романюк М.М. Кристалооптичний спосіб вимірювання температури. Патент України №37789 А від 15.05.2001 р.
8. Винчелл А.Н., Винчелл Г. Оптические свойства искусственных минералов. – М., 1967.
9. Романюк Н.Н., Романюк Н.Н., Костецкий А.М. Поляризационно-оптическое устройство для реверсного счета полос интерференции. АС СССР. №1032329. БИ №28. 1983.
10. Степаняк М.В. Кристалооптичний термометр // Дис. канд. техн. наук ДУ “Львівська політехніка”. Львів, 1997.