

ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Рак Володимир Степанович, 2013

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра МСС,
м. Львів, вул. С. Бандери 12

Показані недоліки існуючих та запропоновано структурну схему альтернативного волоконно-оптичного високотемпературного термоперетворювача з частотною формою вихідного сигналу. Створена його математична модель, за допомогою якої визначено можливі значення чутливості.

Показаны недостатки существующих и предложена структурная схема альтернативного волоконно-оптического высокотемпературных термопреобразователей с частотной формой выходного сигнала. Создана его математическую модель, с помощью которой определены возможные значения чувствительности.

Showing shortcomings of existing thermometers. Proposed structural scheme of the high-temperature alternative fiber optic thermometer with frequency form of the output signal. Created mathematical model which determin the possible values of sensitivity.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Існуючі термоперетворювачі виготовляють переважно з металів, які окислюються при високих температурах, що негативно відбивається на їх метрологічних характеристиках. Платино-родієві термомпари є досить дорогими. Крім того вихідний сигнал металевих термоперетворювачів має аналогову форму та є малопотужним, що також спричинює втрату вимірювальної інформації. Тому пошук нових матеріалів стійких до високих температур та завадостійких методів вимірювання є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найпоширенішими термоперетворювачами є термоелектричні та терморезистивні. Принцип роботи перших полягає в перетворенні температури у термо е.р.с. на основі ефекту Зеебека. В основу роботи терморезистивних перетворювачів покладено залежність опору провідника від температури.

На сьогоднішній день проведено глибокі теоретичні та експериментальні дослідження принципів роботи та способів використання таких термоперетворювачів. Оптимізовано процентний склад матеріалів та сплавів, з яких виготовляють термоперетворювачі, стандартизовані їх номінальні статичні характеристики (НСХ), промисловість освоїла випуск таких термоперетворювачів. Вони можуть працювати в діапазоні температур від -200 до 1300 °С, платинородієві термомпари короткочасно можуть вимірювати температуру, що сягає 1800 °С, а вольфрамові 2500 °С, правда останні характеризуються істотним розкидом НСХ [1].

Напівпровідникові термоперетворювачі мають більшу від металевих чутливість, але їм властиві значний розкид НСХ та менший діапазон вимірювання.

Є ще пірометричний метод вимірювання температур. Найкращий з вітчизняних є пірометр спектрального відношення “Веселка”. Він відрізняється високою чутливістю і точністю. Основна його похибка становить $0,6$ %. Однак таким пірометром не можна вимірювати температуру меншу ніж 750 °С. Діапазон вимірювання його різних модифікацій становить $750 - 2900$ °С [2].

Якщо розглядати контактні термоперетворювачі, то їм властива аналогова форма вихідного інформативного параметру. Потужність вихідного сигналу є незначною, тому виникає потреба у його ретельному екрануванні для того, щоб захистити від впливу електромагнітних завад. В подальшому аналоговий сигнал перетворюється та опрацьовується у цифровій формі. Таке перетворення та опрацювання дало можливість налагодити промислове виготовлення термоперетворювачів з похибкою $0,1 - 0,2$ % [2].

Працюючи у важких температурних умовах високотемпературні металеві термоперетворювачі окислюються, що негативно позначається на довготривалій стабільності їх НСХ.

Мета наукової роботи. Пошук матеріалів, що не окислюються при високих температурах, не піддаються впливові радіоактивного випромінювання (робота на АЕС), є безпечними з точки зору впливу високих напруг, вихідний інформативний параметр яких буде стійким до впливу електромагнітних завад дасть можливість збільшити термін використання термоперетворювачів, підвищить стабільність їх НСХ та усуне втрати інформації в умовах високого рівня електромагнітних завад.

Створення методів вимірювання з безпосереднім перетворенням вхідної вимірювальної інформації у вихідну, представлену у цифровій (частотній) формі та високою потужністю дасть можливість мінімізувати втрати вимірювальної інформації та спростити її подальше опрацювання направленим на лінеаризацію та представлення у формі зручній для споживача.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом, що задовольняє вказані вимоги є кварц, вірніше не сам кварц, а оптичні волокна виготовлені з нього. Їх виготовляють з надчистого, надпрозорого, щирого діоксиду кремнію, або плавленого кварцу [3]. Оптичні волокна мають кварцове осердя та кварцову оптичну оболонку, що покриває осердя. В кварц додають домішки, щоб отримати потрібний показник заломлення. Наприклад германій та фосфор збільшують показник заломлення, а бор та фтор його зменшують. Оптичні волокна є одномодові та багатомодові, ступінчасті та градієнтні.

Діаметр осердя одномодових волокон 5 – 10 мкм, зовнішній діаметр оптичної оболонки є стандартизований і дорівнює 125 мкм. Діаметр осердя багатомодових волокон 50, 62,5 та 100 мкм. Діаметр оптичної оболонки для перших двох 125 мкм, для останньої 140 мкм. Волокна мають додаткову захисну оболонку довкола оптичної. Вона являє собою один або декілька шарів полімера, що захищають осердя та оптичну оболонку від механічних впливів, які можуть зашкодити розповсюдженню світла. Захисна оболонка не впливає на розповсюдження світла.

В багатомодових оптичних волокнах світло розповсюджується прямолінійно, відбиваючись від поверхні, що лежить на межі між осердям та оптичним волокном. В градієнтних оптичних волокнах світло розповсюджується в осерді, плавно змінюючи свій напрям. Це пояснюється поступовим зменшенням коефіцієнту заломлення від осердя до оболонки. У ступінчастих світловодах коефіцієнт заломлення осердя та оптичної оболонки змінюється різко, ступінчасто. Різниця між коефіцієнтами заломлення осердя та оболонки становить приблизно 1 % (1,47 для осердя, 1,46 для оболонки) [3].

Оптичні волокна характеризуються:

1. Малими втратами енергії (найкращі зразки 0,2 дБ/км) [4].
2. Малим діаметром та вагою.
3. Механічною міцністю (оптичне волокно витримує у 2 рази більше навантаження ніж стальна проволочка такого ж діаметру) [3].
4. Еластичністю (радіус згину 2 мм).
5. Електромагнітною завадостійкістю.
6. Вибухобезпечністю.
7. Електроізоляційною міцністю (волокно довжиною 20 см витримує напругу 20 кВ).
8. Високою корозійною стійкістю до хімічних розчинників, олів та води.

Високі температури прискорюють процес окислення металів, що стосується кварцових волокон, то їх важко окислити сильніше, оскільки кварц є діоксидом кремнію.

При радіоактивному опроміненні втрати енергії в оптичних волокнах зростають. Домішки фосфору або бору у волокну під дією радіації створюють дефекти у кристалічній ґратці, а ті в свою чергу збільшують поглинання енергії при передачі світла. Найкращу радіаційну стійкість мають волокна з осердям з кварцового скла. Втрати, що виникають у такому волокну плавно зростають зі збільшенням опромінення і при 200 рад сягають 50 дБ/км. Однак на довжині хвилі 1,5 мкм воно дорівнює 1 дБ/км [4].

В порівнянні з іншими матеріалами кварц є найстійкішим до впливу температури. У [5] сказано, що температурна стійкість нагріванню кварцового скла дорівнює 1500 °С, температура розм'якшення 1750 °С, а температура плавлення приблизно 1900 °С [3].

У таблиці 1 подані значення температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) кварцу в залежності від температури [6].

Таблиця 1

Залежність ТКЛР кварцу від температури.

Темп. К (°С)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹	Темп. К (°С)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹	Темп. К (°С)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹
213 (-60)	2,0	573(300)	5,9	873(600)	5,6
323 (50)	4,0	623(350)	5,8	923(650)	5,5
373(100)	5,0	673(400)	5,8	973(700)	5,4
423(150)	5,5	723(450)	5,8	1023(750)	5,3
473(200)	5,6	773(500)	5,7	1073(800)	5,2
523(250)	5,7	823(550)	5,7		

Враховуючи оптичні, механічні, температурні властивості кварцових волокон та вимоги до форми вихідного інформативного сигналу запропоновано функціональну схему цифрового вимірювача температури (ЦВТ), що зображена на рис. 1.

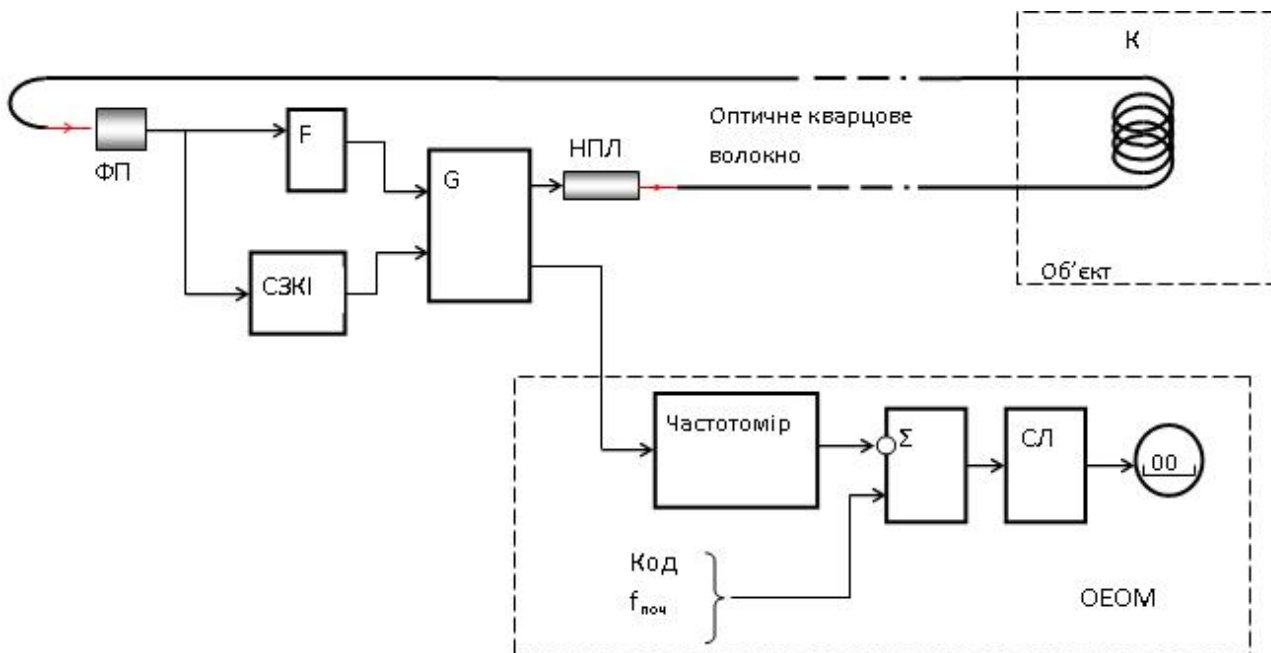


Рис. 1. Структурна схема ЦВТ

Вона містить генератор короткочасних одиночних імпульсів G. Цей генератор на протязі тривалості імпульсу інжектує заряди у р-n перехід напівпровідникового лазера НПЛ. Лазер генерує імпульс випромінювання, що дорівнює тривалості імпульсу генератора G. Світловий імпульс оптичним кварцовим волокном, намотаним на котушку K передаються до об'єкта дослідження та повертаються назад. Фотоприймач ФП перетворює світловий імпульс у імпульс напруги, що подаються на формувач напруги F. Сформований за певними вимогами імпульс подається на вхід генератора G для запуску наступного імпульсу. Таким чином відбувається циркуляція світлових імпульсів та імпульсів напруги у вимірювальному колі. Для запуску схеми та контролю за наявністю імпульсів встановлено схему запуску та контролю імпульсів (СЗКІ). Вимірювальні імпульси з частотою, що залежить від температури об'єкта дослідження $f(t)$ подаються на вхід частотоміра. Цифрове значення частоти подається на вхід різницевої схеми. На інший вхід цієї схеми подано код початкової частоти $f_{поч}$. Різницева схема знаходить різницю

$\Delta f = f_{поч} - f(t)$. У схемі лінеаризації СЛ відбувається лінеаризація та перетворення значення цієї різниці у значення температури, відображене схемою індикації СІ.

Розглянемо детальніше період повторення $T(t)$ частоти $f(t)$. Тривалість цього імпульсу складається з трьох частин, зображених на рис. 2.

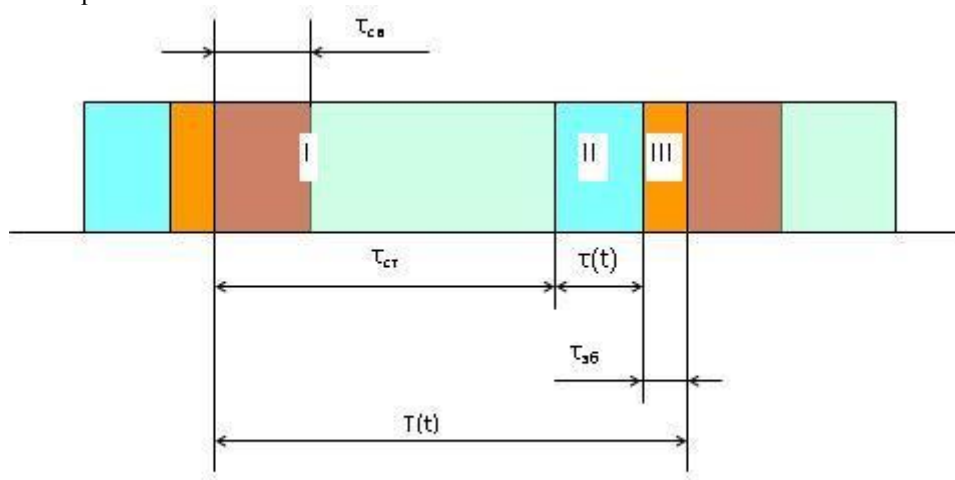


Рис. 2. Структура періоду частоти $f(t)$.

Перша частина на рис. 2 позначена як $\tau_{ст}$. Це сталий час за який світловий імпульс від лазера пробігає до об'єкта і повертається назад до фотоприймача ФП.

Друга частина на рис. 2 позначена як $\tau(t)$. Це змінна частина періоду, значення якої визначається видовженням оптичного волокна та зміною коефіцієнта заломлення кварцового волокна при зростанні температури.

Третя частина це часова затримка $\tau_{зб}$ між збудженням наступного світлового імпульсу від світлового імпульсу, що повернувся оптичним волокном. $\tau_{зб}$ - це сумарний часовий інтервал відклику таких елементів вимірювального кола як фотоприймач ФП, формувач імпульсів F, генератор G та напівпровідниковий лазер.

Як $\tau_{св}$ на рисунку позначено тривалість світлових імпульсів.

Фотоприймач є лавинним кремнієвим фотодіодом з ємністю переходу 1,5 пФ, що дозволяє йому реалізувати частотний діапазон до 10 ГГц. При таких частотах можна сподіватися, що час відклику на вхідний світловий імпульс буде дорівнювати 0,1 нс. Враховуючи непередбачувані обставини збільшимо цей час втричі до 0,3 нс.

Як формувач імпульсів використано логічний елемент цифрових мікросхем 1530 серії, або аналогічні американські (SN54AS00FH, SN54AS00FK). Затримка одного такого логічного елемента становить 1 нс.

Модуляція випромінювання напівпровідникового лазера здійснюється шляхом імпульсної модуляції струму інжекції на частотах, що сягають декількох ГГц. Отже час відклику напівпровідникового лазера щонайбільше повинен бути 0,5 нс (частота модуляції 2 ГГц). Найдоступнішими є напівпровідникові лазери з потужністю 1 мВт.

Отже принципова схема, що об'єднує фотоприймач ФП, формувач імпульсів F, генератор одиночних імпульсів G та напівпровідниковий лазер НПЛ матиме вигляд (рис. 3):

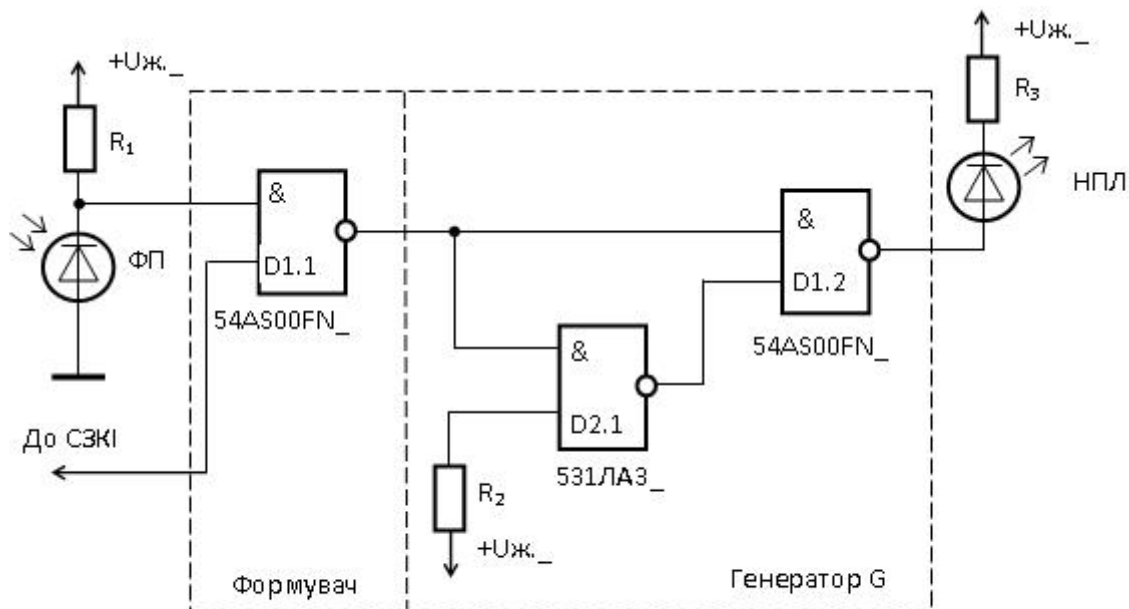


Рис. 3. Схема формувача та генератора одиночних імпульсів

Просумувавши часи відклику кожного елемента цієї схеми отримаємо її загальну затримку (0,3 нс, 1нс, 1 нс, 0,5 нс), що дорівнює 2,8 нс, додамо ще 1,2 нс на непередбачувані обставини (ємність доріжок друкованої плати) і загалом отримаємо $\tau_{зб}=4$ нс.

Оцінимо значення сталої частини періоду повторення імпульсів $\tau_{ст}$. ТКЛР кварцу у діапазоні від -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$ має значення від $2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ до $4 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Прийнемо, що він дорівнює $3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Нехай загальна довжина оптичного волокна, що передає світлові імпульси до котушки дорівнює 1,6 м. Довжина оптичного волокна намотаного на котушку 0,4 м, разом 2 м.

Визначимо скільки часу потрібно світловому імпульсу, щоб пробігти цю відстань. Коефіцієнт заломлення n вказує у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша від швидкості у середовищі

$$n = \frac{c}{V_c}, \quad (1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

V_c – швидкість світла у середовищі;

n – коефіцієнт заломлення осердя кварцового волокна дорівнює $n=1,47$.

Зробивши відповідні перетворення та підставивши числові значення з (1) визначимо, що швидкість світла в осерді кварцового волокна при температурі 20°C $V_c(20^\circ\text{C}) = 2,04 \cdot 10^8$ м/с.

Тепер визначимо τ_{ct} . Для цього загальну довжину оптичного волокна розділимо на швидкість його розповсюдження.

$$\tau_{cm} = \frac{l_1 + l_2}{V_c(20^\circ\text{C})}, \quad (2)$$

де l_1 – довжина оптичного волокна $l_1 = 1,6$ м;

l_2 – довжина оптичного волокна намотаного на катушку $l_2 = 0,4$ м.

Підставивши числові значення у (2) отримаємо $\tau_{cm} = 9,8 \cdot 10^{-9}$ с, або 9,8 нс.

Оцінимо яка буде початкова частота f_{noch} циркуляції імпульсів. Для цього до τ_{ct} додамо $\tau_{зб}$

$$f_{noch} = \frac{1}{\tau_{cm} + \tau_{зб}}. \quad (3)$$

$f_{noch} = 7,246377 \cdot 10^7$ Гц, або 72,463770 мГц.

Значення цієї частоти подано у вигляді коду на один з входів суматора (рис. 1).

Оцінимо як зміниться частота циркуляції імпульсів при зростанні температури до 100°C .

На зміну часу $\tau(t)$ впливає два чинники. Перший – це температурне видовження оптичного волокна $\Delta l(t)$. Його можна визначити

$$\Delta l(t) = \alpha \cdot \Delta t \cdot l_2, \quad (4)$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення кварцу;

Δt – зміна температури у $^\circ\text{C}$.

Другим чинником є зміна коефіцієнта заломлення кварцового оптичного волокна на який опосередковано діє таж температура.

$$\Delta n(t) = \frac{dn}{dt} \cdot \Delta t + \Delta n_{pr}(t), \quad (5)$$

де $\frac{dn}{dt}$ – температурний коефіцієнт зміни коефіцієнта заломлення кварцу [4], $\frac{dn}{dt} = 0,68 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

$\Delta n_{pr}(t)$ – зміна коефіцієнта заломлення внаслідок фото пружності.

Цю зміну можна визначити використавши коефіцієнти Покеляса p_{ij} [4]

$$\Delta n_{pr}(t) = \frac{n^3}{2} \cdot [p_{11} \cdot \varepsilon_1(t) + p_{12} \cdot \varepsilon_2(t) + \varepsilon(t)], \quad (6)$$

де $\varepsilon(t)$ – відносна деформація спричинена температурою $\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_2} = \alpha \cdot \Delta t$;

p_{11}, p_{12} – коефіцієнти Покеляса, $p_{11}=0,121, p_{12}=0,270$;

$\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ – відносна деформація у поперечному напрямку

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \varepsilon(t) \cdot \nu, \quad (7)$$

де ν – коефіцієнт Пуансона, $\nu=0,164$.

Підставивши (6) у (5) знайдемо значення $\Delta n(t)$ при зміні температури від 50°C до 100°C (рис. 1).

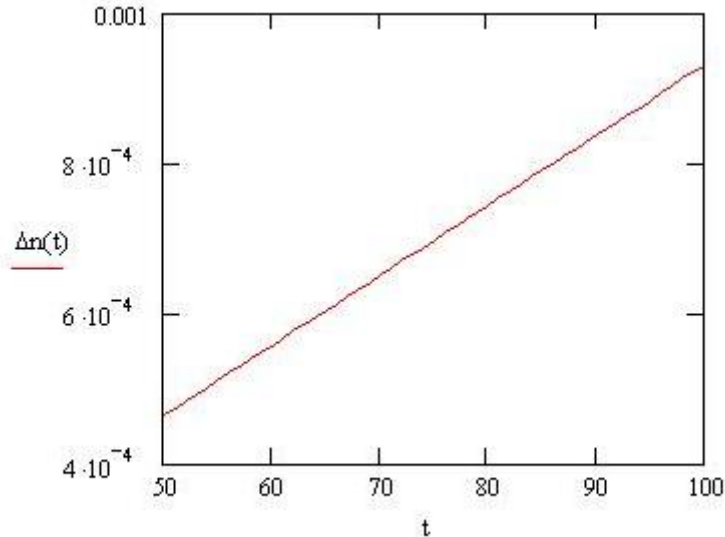


Рис.1. Зміна коефіцієнта заломлення кварцового оптичного волокна.

Коефіцієнт заломлення можна розглядати як суму

$$n(t) = n + \Delta n(t). \quad (8)$$

Враховуючи (1) визначимо змінну частина періоду $\tau(t)$, яка є функцією видовження оптичного волокна та коефіцієнта заломлення при зростанні температури.

$$\tau(t) = \frac{\Delta l(t)}{V_c} = \frac{\Delta l(t) \cdot n(t)}{c} = \frac{\Delta l(t) \cdot [n + \Delta n(t)]}{c}. \quad (8)$$

На рис. 1 видно, що значення $\Delta n(t)$ не перевищує 0,001 тоді як $n=1,47$, тому з (8) можна зробити висновок, що основним чинником, який визначатиме $\tau(t)$ є добуток $\Delta l(t) \cdot n$.

Отже можна вважати, що

$$\tau(t) \approx \frac{\Delta l(t) \cdot n}{c} \quad (9)$$

Оцінимо зміну частоти спричинену збільшенням довжини волокна при зростанні температури. Для цього у знаменник (3) поставимо ще $\tau(t)$

$$f(t) = \frac{1}{\tau_{cm} + \tau_{зб} + \tau(t)}, \quad (10)$$

При зростанні температури від 50 °C до 100 °C зміна частоти $\Delta f = -231,7$ Гц. Чутливість термперетворювача S буде дорівнювати

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta T}, \quad (11)$$

$$S = 4,6 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$$

Від 100 °С ТКЛР кварцу (таб. 1) є рівним або більшим $5 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. При 300 °С його значення максимальне і сягає $5,9 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. За поданими вище формулами оцінено чутливість термоперетворювача при максимальному ТКЛР. Вона дорівнює $-6,1 \frac{\text{Гц}}{\text{К}}$.

Висновки: Вплив температури на зміну коефіцієнта заломлення оптичного волокна є нехтовно малий, тому основним чинником, що визначає зміну частоти перетворювача як функції температури є ТКЛР кварцу.

При незначних значеннях ТКЛР кварцу і відповідно невеликих видовженнях оптичного волокна перехід до високих частот дає змогу виділити ці видовження спричинені температурою і відчуті їх з чутливістю, що приблизно становить -5 Гц/К .

Кварц є діоксидом кремнію, тому його використання у чутливому елементі термоперетворювача усуне вплив окислення при високих температурах і сприятиме довготривалій стабільності НСХ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. Енциклопедія термометрії//Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2003. – 428 с.
2. За ред. проф. Є. С. Поліщука. Метрологія та вимірювальна техніка// Підручник. Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.
3. Гуртов В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика // Учебное пособие. Петрозаводск: Изд во ПетрГУ, 2005. — 100 с.
4. Под ред. Окоси Т. Пер. с япон. Волоконно-оптические датчики//Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
5. Гофман Ю. В. Законы, формулы, задачи физики// Справочник. Киев: “Наукова думка”, 1977. – 576 с.