

УДК 535.5; 535.327; 548.0:535.6

doi.org/10.15407/fmmit2024.39.118

Кристаллооптичні та волоконно-оптичні методи вимірювання температури: технології та перспективи

Богдан Бондар¹, Михайло Степаняк²

¹аспірант, кафедра КСА, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С.Бандери 12, 79013, Львів, e-mail: bohdan.v.bondar@lpnu.ua

²к.т.н., доцент, кафедра КСА, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С.Бандери 12, 79013, Львів, e-mail: mykhailo.v.stepaniak@lpnu.ua

У даній статті проведено огляд сучасних методів вимірювання температури з використанням кристаллооптичних та волоконно-оптичних термоперетворювачів спрямованих на підвищення точності вимірювань у жорстких умовах. Розглянуто властивості анізотропних кристалів, що дозволяють забезпечити високу точність вимірювань у складних умовах, серед яких підвищені температури, сильні електромагнітні поля та вакуум. Особлива увага приділяється інтерференційним системам, таким як інтерферометри Фабрі-Перо та фотонні кристали, а також волоконно-оптичним сенсорам, зокрема ґраткам Бреґга (FBG). Здійснено порівняльний аналіз переваг і недоліків цих методів порівняно з класичними підходами до вимірювання температури, такими як термомари та терморезистивні сенсори. Показано перспективи використання волоконно-оптичних сенсорів у високотехнологічних галузях, серед яких аерокосмічна індустрія, енергетика та медицина. Окреслено можливості подальшого розвитку технологій для забезпечення більшої точності та стабільності вимірювань у реальному часі.

Ключові слова: анізотропні кристали, волоконно-оптичні сенсори, дистанційне вимірювання температури, ґратки Бреґга, кристаллооптичні методи, оптичні вимірювання, температурні сенсори, Фабрі-Перо інтерферометр, фотонні кристали.

Вступ. Точне вимірювання температури є надважливим завданням для багатьох галузей науки та техніки, серед яких можна виділити енергетику, аерокосмічну індустрію, біомедицину та виробництво напівпровідникових матеріалів. Контроль температури відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності технологічних процесів, якості продукції та безпеки обладнання. Традиційні методи, такі як термомари та термометри опору, широко застосовуються в промисловості, проте вони мають обмеження, серед яких чутливість до зовнішніх впливів, необхідність фізичного контакту та втрата точності за наявності сильних електромагнітних завад. Сучасні вимоги до точності та швидкості вимірювань змушують приділити увагу пошуку нових рішень, серед яких особливий інтерес викликають кристаллооптичні та волоконно-оптичні методи. Анізотропні кристали, що володіють унікальними оптичними властивостями, можуть використовуватися для високочутливих термоперетворювачів. Ці матеріали реагують на зміну температури шляхом зміни показника заломлення, що дозволяє проводити вимірювання на відстані з високою точністю. Кристаллооптичні технології, такі як інтерферометри Фабрі-Перо, дозволяють фіксувати навіть незначні зміни температури у реальному часі. Волоконно-оптичні сенсори, зокрема ґратки Бреґга (FBG), забезпечують стабільність

вимірювань у складних умовах, де підвищені температури або ж сильні електромагнітні поля та радіаційний вплив. Поєднання цих методів відкриває нові можливості для контролю температури в енергетиці, авіації, космічних дослідженнях та медицині.

Метою цієї статті є аналіз сучасних кристалооптичних та волоконно-оптичних методів вимірювання температури, а також виявлення їхніх переваг і недоліків у порівнянні з традиційними підходами. Особливу увагу приділено перспективам застосування інтерференційних систем і волоконно-оптичних сенсорів для вирішення завдань високоточного температурного контролю.

1. Огляд літературних джерел

Інтерферометри Фабрі-Перо широко застосовуються для точного вимірювання температури в екстремальних умовах. Наприклад, у дослідженні [1] описано використання Фабрі-Перо інтерферометра для реального часу вимірювання показника заломлення за допомогою оптофлюїдних технологій. Такі інтерферометри забезпечують стабільність та похибку вимірювання порядку $\pm 0,2^\circ\text{C}$ навіть за температур до 1200°C , що робить їх ключовими в аерокосмічних місіях та ядерній енергетиці [2].

Фотонні кристали демонструють високу чутливість до змін температури та використовуються в середовищах з високою радіацією, таких як ядерні реактори. У дослідженні [3] розглянуто можливості інтеграції фотонних кристалів із магнітними рідинами для вимірювання температури та магнітних полів. Проте складність калібрування та висока вартість залишаються вагомими перешкодами для їхнього широкого застосування.

Гратки Бреґґа забезпечують стабільне вимірювання температури у важкодоступних середовищах, таких як нафтові свердловини та авіаційні турбіни. У [4] розглянуто систему волоконно-оптичних сенсорів із Фабрі-Перо порожниною, що мають високу точність і стійкість до електромагнітних завад. Подібні системи також знаходять застосування для вимірювання тиску та температури спільно [5].

Традиційні термометри та терморезистивні сенсори мають обмеження щодо фізичного контакту із середовищем і вразливість до зовнішніх впливів. Волоконно-оптичні та кристалооптичні сенсори дозволяють отримати значні переваги, забезпечуючи стабільність і точність навіть у складних умовах [6, 7].

Аналіз літературних джерел показав, що оптичні технології, такі як інтерферометри Фабрі-Перо та ґратки Бреґґа, перевершують традиційні методи за точністю та стабільністю. Проте подальші дослідження мають бути спрямовані на зниження вартості та вдосконалення калібрування для промислового застосування.

2. Формулювання задачі

Сучасні методи вимірювання температури стикаються з низкою викликів, зокрема з необхідністю забезпечення стабільних вимірювань у жорстких умовах, таких як високі температури, сильні електромагнітні поля та радіація. Традиційні сенсори, зокрема термометри та терморезистивні сенсори, виявляються недостатньо ефективними в таких середовищах через обмежену точність і потребу в фізичному контакті з об'єктом вимірювання.

Кристаллооптичні та волоконно-оптичні сенсори мають значні можливості у підвищенні точності, стабільності та можливості дистанційного моніторингу. Однак існують певні проблеми, пов'язані з високою вартістю компонентів, складністю калібрування та інтеграції цих систем у промислові процеси.

Основною метою дослідження є аналіз сучасних кристаллооптичних та волоконно-оптичних методів вимірювання температури та виявлення їхніх переваг і недоліків у порівнянні з традиційними підходами із досягненням похибки у вимірюванні порядку $\pm 0,2^\circ\text{C}$ для критичних застосувань. Додатково передбачається визначити перспективи вдосконалення інтерференційних систем Фабрі-Перо і зниження вартості виробництва фотонних кристалів для розширення їх застосування.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- Провести аналіз сучасних кристаллооптичних та волоконно-оптичних методів вимірювання температури.
- Здійснити порівняльний аналіз точності та стабільності цих методів із традиційними підходами, такими як термомпари та терморезистивні сенсори.
- Визначити основні переваги та недоліки інтерференційних систем Фабрі-Перо і волоконно-оптичних сенсорів на основі ґраток Брегга.
- Дослідити перспективи впровадження цих сенсорів у високотехнологічних галузях, таких як енергетика, аерокосмічна індустрія та медицина.
- Окреслити можливості вдосконалення сенсорів для забезпечення більшої точності та стабільності вимірювань у реальному часі.

3. Методи вимірювання температури

3.1 Кристаллооптичні методи вимірювання температури. Кристаллооптичні методи вимірювання температури ґрунтуються на використанні анізотропних кристалів, які змінюють свій показник заломлення під впливом температури. Прикладом є дослідження властивостей кристалів MgO для високоточних сенсорів, де використовуються інтерферометри Фабрі-Перо [8]. Ці властивості дозволяють отримати високу стабільність вимірювань у середовищах із високими температурами та вібраціями, що робить їх корисними для аерокосмічних застосувань. Для інтерференції Фабрі-Перо інтенсивність світла можна подати формулою

$$I = I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi n L}{\lambda}\right) \right), \quad (1)$$

де I – інтенсивність світла, I_0 – максимальна інтенсивність, n – показник заломлення, L – відстань між дзеркалами, λ – довжина хвилі. Формула (1) відображає інтенсивність світла (I) у системі інтерференції Фабрі-Перо залежно від показника заломлення (n), відстані між дзеркалами (L) та довжини хвилі світла (λ). Ця формула є ключовою для визначення змін температури на основі оптичних властивостей матеріалів, оскільки навіть незначні зміни температури впливають на показник заломлення, що дозволяє проводити точні вимірювання у реальному часі. Дана функціональна залежність широко застосовується для високоточного моніторингу у складних умовах, таких як високі температури чи сильні електромагнітні поля [8, 9].

3.2. Волоконно-оптичні сенсори: ґратки Брегга (FBG). Ґратки Брегга інтегруються в оптоволокну, що забезпечує можливість одночасного вимірювання фізичних величин в кількох точках. Ця технологія є незамінною для промислових систем моніторингу температури та тиску в реальному часі. Наприклад, у дослідженні [4] рис. 1 було застосовано систему на основі FBG для моніторингу турбін і нафтових свердловин. Основною перевагою цих сенсорів є їхня стійкість до електромагнітних завад і можливість роботи за високих температур.

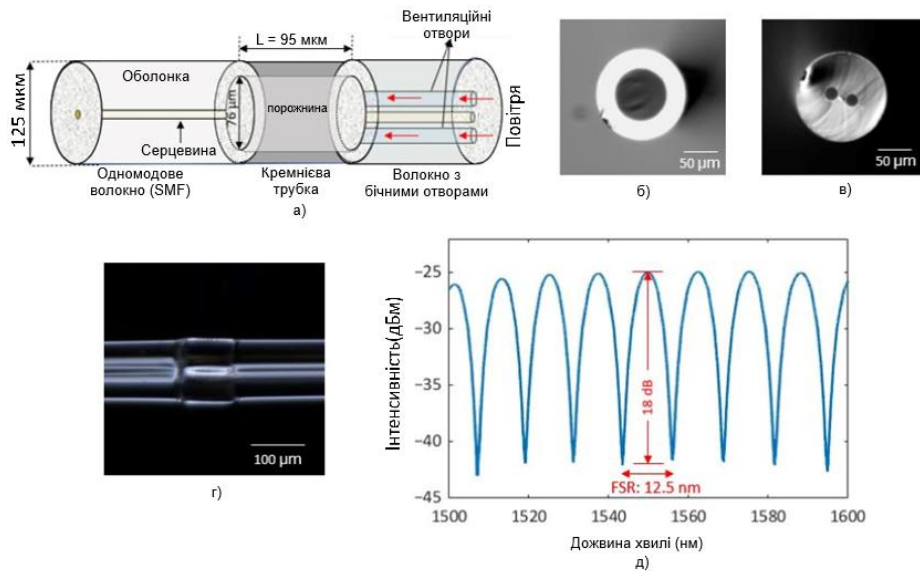


Рис. 1. а) Схематичне зображення сенсора;
б), в) поперечний та повздовжній переріз кварцової трубки та волокна із бічними отворами відповідно;
г) мікроскопічний повздовжній вигляд виготовленого сенсора;
д) спектр відбиття сенсора за нормальної температури та тиску [4]

Результати порівняння характеристик методів подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння ґраток Брегга та інших методів вимірювання [4, 5]

Параметр	Ґратки Брегга (FBG)	Термопар	Терморезистивні сенсори
Похибка методу	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$
Максимальна температура	1000°C	2000°C	500°C
Стійкість до електромагнітних завад	Висока	Низька	Висока
Фізичний контакт з об'єктом	Не потрібен	Потрібен	Не потрібен

3.3. Інтерференційні системи Фабрі-Перо. Інтерферометри Фабрі-Перо активно застосовуються для високоточних вимірювань температури в жорстких умовах. У дослідженні [9, 10] на рис. 2 описано використання інтерферометрів на базі фотонних кристалів, які мають високу стабільність за температур до 1200°C . Ці системи

використовуються не тільки в наукових дослідженнях, але й у промислових умовах для моніторингу турбін та реакторів. Зміна температури визначається за наступною формулою на основі показника заломлення

$$\Delta T = \frac{\Delta n}{\alpha}, \quad (2)$$

де ΔT - зміна температури, Δn – зміна показника заломлення, α – температурний коефіцієнт заломлення [1].

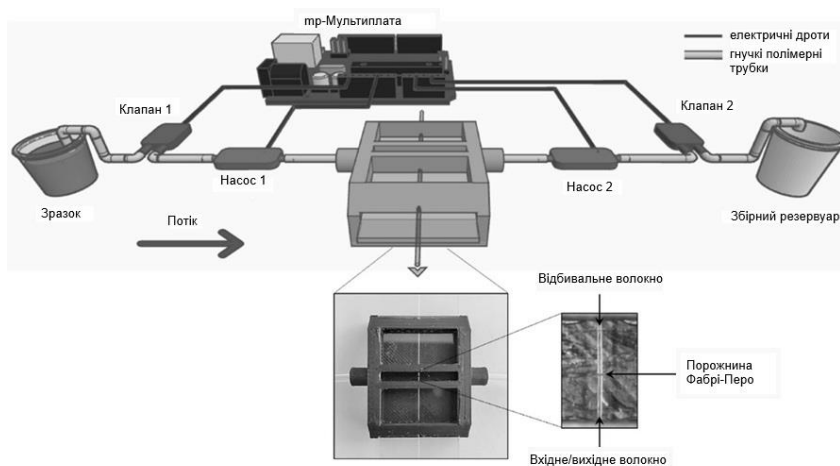


Рис. 2. Експериментальна схема оптично-флюїдної платформи. Вставка показує фотографію оптично-флюїдного волоконного сенсора, виготовленого за допомогою 3D-друку [10]

Системи Фабрі-Перо мають високу стабільність вимірювань завдяки інтеграції фотонних кристалів, що забезпечують точний контроль показника заломлення. Ці системи можуть застосовуватись у вакуумі або середовищах з високим тиском, де традиційні термомпари та інші електронні сенсори можуть виявитися неефективними через втрату чутливості. Інтерферометри з фотонними кристалами знаходять також застосування в медичних дослідженнях для безконтактного вимірювання температури, що робить їх перспективними для біомедичних застосувань.

Попри численні переваги, ці системи стикаються з деякими викликами, серед яких висока вартість компонентів і складність калібрування в умовах змінного навколишнього середовища. Подальші дослідження спрямовані на розробку нових матеріалів із покращеними температурними властивостями, що можуть зменшити вартість виробництва та підвищити доступність цих технологій у промислових масштабах.

3.4. Порівняння з традиційними методами вимірювання. Хоча традиційні методи, такі як термомпари, залишаються популярними через простоту та низьку вартість, у них присутні обмеження в точності та стабільності. Волоконно-оптичні та кристаллооптичні сенсори дозволяють отримати значні переваги, забезпечуючи стабільність і точність навіть у складних умовах із підвищеними температурами та радіацією [7]. Характеристики цих методів вимірювання температури подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння основних методів вимірювання температури

Метод	Похибка методу (°C)	Стійкість до зовнішніх впливів	Переваги	Недоліки
Фабрі-Перо	±0,2	Висока	Висока точність	Висока вартість
Гратки Бреґґа (FBG)	±0,1	Висока	Стійкість до завад	Складність інтеграції
Термопари	±1	Низька	Простота	Вразливість до корозії
Терморезистивні сенсори	±2	Середня	Не потребують контакту	Низька точність у динаміці

4. Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

1. Розробку більш економічних і доступних методів виробництва Фабрі-Перо інтерферометрів та фотонних кристалів.
2. Вдосконалення калібрування та оптимізацію сенсорів для використання у складних промислових умовах.
3. Дослідження нових матеріалів із кращими температурними та оптичними властивостями для підвищення точності вимірювань.
4. Інтеграцію волоконно-оптичних сенсорів у системи Інтернету речей (ІоТ) для дистанційного моніторингу в реальному часі.
5. Розширення застосування сенсорів у медицині для неінвазивного моніторингу температури тіла та візуалізації фізіологічних процесів.

Висновки. На основі проведеного аналізу встановлено, що кристалооптичні та волоконно-оптичні методи забезпечують вищу точність і стабільність вимірювань у порівнянні з традиційними підходами. Наприклад, результати досліджень показують, що похибка вимірювання з використання сенсорів Фабрі-Перо досягає порядку ±0,2°C, що перевищує похибку термопар. Це робить їх незамінними для задач, де необхідна висока чутливість, наприклад, у ядерній енергетиці та аерокосмічних дослідженнях. Крім того, сенсори на основі ґраток Бреґґа дозволяють отримати високу точність та стабільність вимірювань навіть за підвищених температур до 1000°C, що робить їх ефективними для моніторингу в реальному часі у турбінах та нафтових свердловинах. Проте зниження вартості та оптимізація калібрування залишаються ключовими завданнями для подальшого впровадження цих технологій у промисловість.

Література

- [1] J. M. Leça, Y. Magalhães, P. Antunes, V. Pereira, and M. S. Ferreira, 'Optofluidic Fabry-Perot interferometric sensor for the real-time measurement of refractive index', *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2407, no. 1, p. 012021, Dec. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2407/1/012021.
- [2] H. Yu, Y. Wang, J. Ma, Z. Zheng, Z. Luo, and Y. Zheng, 'Fabry-Perot Interferometric High-Temperature Sensing Up to 1200 °C Based on a Silica Glass Photonic Crystal Fiber', *Sensors*, vol. 18, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/s18010273.

- [3] J. Wang *et al.*, ‘Magnetic field and temperature dual-parameter sensor based on magnetic fluid materials filled photonic crystal fiber’, *Opt. Express, OE*, vol. 28, no. 2, pp. 1456–1471, Jan. 2020, doi: 10.1364/OE.377116.
- [4] H. R. Chowdhury and M. Han, ‘Fiber Optic Temperature Sensor System Using Air-Filled Fabry–Pérot Cavity with Variable Pressure’, *Sensors*, vol. 23, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23063302.
- [5] K. M. Fadeev, D. D. Larionov, L. A. Zhikina, A. M. Minkin, and D. I. Shevtsov, ‘A Fiber-Optic Sensor for Simultaneous Temperature and Pressure Measurements Based on a Fabry–Perot Interferometer and a Fiber Bragg Grating’, *Instrum Exp Tech*, vol. 63, no. 4, pp. 543–546, Oct. 2020, doi: 10.1134/S0020441220050024.
- [6] K. Shiokawa *et al.*, ‘Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometers for airglow and auroral studies’, *Earth Planet Sp*, vol. 64, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2012, doi: 10.5047/eps.2012.05.004.
- [7] R. K. Gangwar, S. Kumari, A. K. Pathak, S. D. Gutlapalli, and M. C. Meena, ‘Optical Fiber Based Temperature Sensors: A Review’, *Optics*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2023, doi: 10.3390/opt4010013.
- [8] C. Su *et al.*, ‘Temperature-Decoupled Single-Crystal MgO Fiber-Optic Fabry–Perot Vibration Sensor Based on MEMS Technology for Harsh Environments’, *Micromachines*, vol. 15, no. 5, Art. no. 5, May 2024, doi: 10.3390/mi15050616.
- [9] Y. Zheng *et al.*, ‘Fiber Optic Fabry–Perot Optofluidic Sensor With a Focused Ion Beam Ablated Microslot For Fast Refractive Index and Magnetic Field Measurement’, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 322–326, Mar. 2017, doi: 10.1109/JSTQE.2017.2649462.
- [10] J. M. Leça, Y. Magalhães, P. Antunes, V. Pereira, and M. S. Ferreira, ‘Real-Time Measurement of Refractive Index Using 3D-Printed Optofluidic Fiber Sensor’, *Sensors*, vol. 22, no. 23, Art. no. 23, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22239377.

Crystal-optical and fiber-optic temperature measurement methods: technologies and prospects

Bohdan Bondar, Mykhaylo Stepanyak

This article provides an overview of modern temperature measurement methods using crystal-optical and fiber-optic thermal converters aimed at improving measurement accuracy in harsh conditions. The properties of anisotropic crystals, which ensure high measurement accuracy under challenging conditions, such as elevated temperatures, strong electromagnetic fields, and vacuum, are discussed. Special attention is paid to interferometric systems, such as Fabry-Perot interferometers and photonic crystals, as well as fiber-optic sensors, in particular Bragg gratings (FBG). A comparative analysis of the advantages and disadvantages of these methods compared to classical temperature measurement approaches, such as thermocouples and infrared sensors, is conducted. The prospects of using fiber-optic sensors in high-tech industries, thermoresistive aerospace, energy, and medicine, are highlighted. Opportunities for further development of technologies to ensure greater measurement accuracy and stability in real-time applications are outlined.

Keywords: *anisotropic crystals, Bragg gratings, crystal-optical methods, Fabry-Perot interferometer, fiber-optic sensors, optical measurements, photonic crystals, remote temperature measurement, temperature sensors.*

Отримано 04.09.2024