

**АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ**

**ANALYTICAL REVIEW OF METHODS AND MEANS OF MEASURING THE
TEMPERATURE OF SMALL SIZES OBJECTS**

*Юрій Кривенчук,
Національний університет "Львівська політехніка", Україна, yurii.p.kryvenchuk@lpnu.ua
У. Кривенчук,
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут метрології вимірювальних і управляючих систем» Україна*

*Yurii Kryvenchuk,
Lviv Polytechnic National University, Ukraine
U. Kryvenchuk,
State Enterprise "Science and Development Institute of Metrology of Measuring and Control Systems",
Ukraine*

Анотація

У статті проведено аналіз основних переваг та недоліків контактних та безконтактних методів та засобів вимірювання температури та проаналізовано можливість їх застосування для вимірювання температури мікро та нанооб'єктів. Враховуючи результати проведеного аналізу, переваги та недоліки розглянутих методів, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимальним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла. Показано доцільність використання методу за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла для побудови засобу вимірювання температури нанооб'єктів, що забезпечує зменшення часу вимірювання та методичної похибки.

Ключові слова: вимірювання температури нанооб'єктів, метод комбінаційного розсіювання світла.

Abstract

The analysis of the main advantages and disadvantages of different contact and contactless methods of temperature measurement is carried out. The possibility of their application for measuring the temperature of small objects is analyzed below. Optimal one seems to be the Raman method and the measuring instrument on its basis.

Means of measuring the temperature based on the Raman method is considered in the paper on the basis of the following dependencies: 1. Dependence of temperature on the intensity ratio of the Stokes and anti-Stokes components of the spectrum of light scattering; 2. Dependence of the shift of the one of the mentioned frequencies on the temperature. Both methods are inherent in a methodological error of measurement caused by the laser beam heating of the object. Applying the first method, the Stokes, and then the anti-Stokes components of the spectrum have been measured. The total measurement time can be up to 40 seconds. Therefore, the anti-Stokes component is measured at a unequal temperature of the sample, which leads to increase in the methodological error of measurement. Studying the second method, only the anti-Stokes component of the spectrum is measured. The measurement duration decreases at least twice, comparing to the first method. So, the heating of the object under study by the laser beam decreases, which reduces the methodological error of measurement of the temperature by the method of the combination of light scattering. At the temperatures 300 ÷ 400 K the intensity of the anti-Stokes line is quite small, therefore the second method regarding the first one is less convenient. At the same time, the intensity of the anti-Stokes line may increase substantially with temperature.

In general, for realizing the temperature measurements of small objects, it is expedient to apply the Raman method by the frequency shift of an anti-Stokes component of the spectrum, which provides a reduction of the measuring time and methodological error.

Keywords: Temperature Measurement, Small Objects, Raman Method, Contactless Thermometry.

Вступ. У сучасній термометрії застосовується велике розмаїття методів та засобів, що спричинене особливостями температури, як вимірюваного параметру, а також експлуатаційними вимогами до засобів вимірювання, діапазоном вимірюваних температур, специфікою об'єктів та умов вимірювання, особливістю фізичних характеристик і використовуваних термометричних властивостей чутливих елементів первинних перетворювачів (ПП) [1, 2, 3, 4].

Стрімкий розвиток нанотехнологій характеризується створенням нових матеріалів, мікро- та наноструктурованих об'єктів, які знаходять широке застосування у різних галузях науки, техніки і

промисловості. Для належного перебігу технологічного процесу при виготовленні таких матеріалів необхідно забезпечити вимірювання та жорсткий контроль температури. При цьому зрозуміло, що до

ТКП-160Сг-М2-Т2	Об'ємне розширення	+100...+200	2,5	20
ТКП-160Сг-М2-ТВ3		+200...+300	2,5	20
ТКП-160Сг-М1-УХЛ2		0...+120	1,5	20

засобів вимірювання температури таких об'єктів ставляться високі метрологічні та експлуатаційні вимоги.

Реалізація процесу коректного вимірювання температури для кожного конкретного випадку вимагає докладного аналізу умов теплової взаємодії системи об'єкт-термометр. В більшості випадків під час вимірювання температури однозначно змінюється теплова картина досліджуваного об'єкту [5, 6]. Тому необхідним є проведення оцінки недоліків та переваг методів та засобів вимірювання температури для визначення найбільш оптимальних методів для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

Метою публікації є огляд та аналіз засобів та методів вимірювання температури для реалізації засобу вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

На практиці знайшли широке застосування такі методи вимірювання температури:

- теплового розширення;
- терморезистивний;
- термоелектричний;
- шумовий;
- акустичний;
- пірометричний;
- комбінаційного розсіювання світла.

Метод теплового розширення. Метод теплового розширення базується на залежності геометричних розмірів об'єкта від температури. Теплове розширення притаманне усім речовинам у всіх агрегатних станах. Коли речовина нагрівається, її частинки починають інтенсивніше рухатися, що приводить до збільшення середніх відстаней між ними. [1, 7, 8, 9, 12]. Засоби вимірювання температури на основі теплового розширення можуть використовувати ефект як лінійного так і об'ємного розширення. У таблиці 1 представлено перелік типових засобів вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення, та їх основних метрологічних та технічних характеристик.

Table 1. Means of temperature measurement, which are based on the effect of thermal expansion

Таблиця 1. Засоби вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення

Назва	Принцип роботи	T, °C	δT, %	Інерційність, с
ТБУ-100	Прогинання пластини	0...+200	2,5;	20
Watts T63/50 (F+R801 OR 63mm 0-120°C)		0...+120	2	20
ТТЖ, ТТЖ-У, ТСЖТ, СП-2	Зміщення меніску у капілярі	-35...+50	1	10
ТТЖ М		0...+100	1	10
ТКП-160Сг-М2-УХЛ2	Об'ємне розширення	0...+120	1,5	20

ТКП-160Сг-М1-Т2		+100...+200	2,5	20
ТКП-160Сг-М1-ТВ3		+200...+300	2,5	25

продовження таблиці 1

Переваги методу:

- зручність застосування;
- відносно широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- складне конструктивне виконання;
- невисока точність;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

Терморезистивний метод. Принцип дії терморезистивних первинних перетворювачів базується на використанні властивості зміни електричного опору матеріалів в функції зміни температури. Для створення терморезистивних первинних перетворювачів використовуються матеріали, які мають значний питомий електричний опір, високу стабільність температурного коефіцієнту електричного опору, високу відтворюваність електрофізичних параметрів, стабільність хімічних і фізичних властивостей при нагріванні та є інертні до впливу досліджуваного середовища.

У таблиці 2 представлено основні типові терморезистивні засоби вимірювання температури, та їх основні метрологічні та технічні характеристики.

Table 2. The main types of thermosetting means for measuring temperature

Таблиця 2. Основні типи терморезистивних засобів вимірювання температури

Назва	T, °C	ΔT , °C	Інерційність, с
ЕЧМ-0183	-50...150	$(0.50C + 6.5 \times 10^{-3} t)$	9
ТОМІ-0591	-30...60	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	240
ТСМ-0890	-50...150	$\pm(0,25+0,0035 t)$	20
ТСМ-1290	-50...150	$\pm(0,25+0,0035 t)$	120
ТСМ-0987	-50...100	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	70
ТСМР-1291	0...100	$(0.250C + 3.5 \times 10^{-3} t)$	20
ТСМ-8045P	-50...75	$(0.50C + 6.5 \times 10^{-3} t)$	15
ЕЧП-0183	-200...750	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	1,5
ТСП-341-01	0...400	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	20
ТСП-1388	-50...120	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	3
ТСП-1290	-50...150	$\pm(0,3+0,005 t)$	120
ТСП-0690	-50...150	$\pm(0,3+0,005 t)$	10
ТСП-1390	50...400	$\pm(0,3+0,005 t)$	20
ТСП-8045P	-50...75	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	15
ТСП-8050	-40..40 (повітря) -2...35 (вода)	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	150
ТСП-8052	-200...600	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	8
ТСП-0690	-50...150	$(0.30C + 5.0 \times 10^{-3} t)$	10

Переваги методу:

- зручність застосування;
- широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- наявність саморозігрівання чутливого елемента;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень

Термоелектричний метод. Для вимірювання температури, зокрема, об'єктів малих розмірів застосовують термоелектричні первинні перетворювачі, в основі роботи яких лежить термоелектричний ефект, а саме: в замкнутому контурі з двох різнорідних напівпровідників або провідників виникає е.р.с., у разі, якщо місця з'єднань перебувають за різних температур. У таблиці 3 представлено типові термоелектричні засоби вимірювання температури та їх метрологічні та технічні характеристики.

Table 3. Typical thermoelectric means for measuring temperature

Таблиця 3. Типові термоелектричні засоби вимірювання температури

Назва	T, °C	ΔT , °C	Інерційність, с
ТХА-1090	-50...400	До 333 °C $\pm 2,5$ понад 333 °C $\pm 0,0075t$	30
ТХК-1090	-50...400	До 300 °C $\pm 2,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075t$	30
ТХК-1190	-50...400	До 300 °C $\pm 2,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075t$	5
ТХА-1590	-50...400	- 50 °C ... 375 °C $\pm 1,5$ понад 375 °C $\pm 0,004 t $	0,3
ТХК-1590	-50...400	- 50 °C ... 375 °C $\pm 1,5$ понад 375 °C $\pm 0,004 t $	0,3
ТХА-1690	-50...400	- 50 °C ... 333 °C $\pm 1,5$ понад 333 °C $\pm 0,0075 t $	1,0
ТХК-1690	-50...400	- 50 °C ... 300 °C $\pm 1,5$ понад 300 °C $\pm 0,0075 t $	1,0
ТХК-2388	-40...600	0,7+0,005 t	180
ТХК-2988М	-40...550	0,7+0,005 t	60
ТХК-3088	0...300	2,5	5
ТПП-1788	0...1300	1,5	5
ТВР-301-01	1200...1550	$\pm 0,004t$	5
ТПР-1988	600...1600	$\pm 2,40C$	50
ТВР-0688	1200...1800	$\pm 0,004t$	2
ТПР-0573	600...1350	$\pm 2,40C$	180
ТПР-0290	1000...1800	$\pm 0,004t$	2

Таким чином вихідна напруга термопари залежать від різниці температур її з'єднань (робочого з'єднання та з'єднання порівняння).

Переваги методу:

- зручність застосування;
- широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- необхідність термостатування температури з'єднань порівняння;
- незначний вплив теплопровідності матеріалів термоелектродів на результат вимірювання;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень

Шумовий метод. До контактних методів вимірювання температури також належить і шумовий метод, в основі якого лежить отримана Х. Найквістом залежність середнього значення квадрату шумової напруги (СЗКШН) на електрично ненавантаженому опорі від температури, що отримана методом статистичної термодинаміки незалежно від конкретних фізико-хімічних властивостей матеріалу первинного перетворювача.

У таблиці 4 представлено основні методи вимірювання СЗКШН, що базуються на використанні шумового методу.

Table 4. The main means of measuring temperature based on the use of noise method

Таблиця 4. Основні засоби вимірювання температури, що базуються на використанні шумового методу

Метод вимірювання СЗКШН	T, K	δT , %	Швидкодія
Імпульсний порівняння	77 - 273K	$\pm 0.1K$	

Імпульсний порівняння	273 - 900К	$\pm 0.1 - 0.3\text{К}$	28 с
Кореляційний порівняння	800 - 2500К	$\leq \pm 1\%$	10 с
Кореляційний порівняння	2 - 4К	$\leq \pm 0.01\%$ $\pm 0.3\text{мК}$	9 год
Кореляційний порівняння	4 - 1600К	$\pm 1\%$ $\pm 0.01\%$	2 с 12 циклів по 8 год
Кореляційний прямого вимірювання	273-473К	$\pm 10\text{мК}$ (оцінка)	60 год
Кореляційний прямого вимірювання	273 - 373К	$\pm 3\text{К}$	0.25 год
Потужність шуму	725 - 1275К	$\pm 1\%$	10 с
Потужність шуму	725 - 1275К	$\pm 0.5\%$	1 - 100 с
Детектор rf-SQUID	2.2мК - 4.2К	$\pm 10\% \pm$ $\pm 1\%$	1200 с 4000 с
Детектор rf-SQUID	1 - 4.2К 4.2 - 7.2К	$\pm 0.23\%$ $\pm 0.2\%$	5 год 3.5 год
Детектор rf-SQUID	0.2 - 0.4К	$\pm 0.22\%$	0.5 год
Порівняння	4 - 300К	$\leq \pm 1\%$	5 с
Порівняння	500 - 1000К	$\pm 0.02\%$ (оцінка)	

Переваги методу:

- результат вимірювання температури не залежить від матеріалу чутливого елемента первинного перетворювача.
- Широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

- низька завадостійкість засобу вимірювання за рахунок незначного рівня вихідного сигналу первинного перетворювача;
- тривалий час вимірювання;
- додаткова похибка за рахунок залежності опору від температури;
- спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

Акустичний метод. Акустична термометрія базується на температурній залежності швидкості поширення акустичних коливань у речовині. При цьому, в якості первинного перетворювача можуть використовувати як гази так і рідини і тверді речовини. Діапазон вимірювання визначається стійкістю матеріалу чутливого елемента первинного перетворювача до температури та можливістю поширення у матеріалі акустичних коливань.

Акустичні перетворювачі температури використовуються переважно для вимірювання середніх і високих температур та складаються з випромінювача і приймача акустичних хвиль (просторово рознесених). Термометри такого типу серійно не виготовляються, існують лише лабораторні та одиничні варіанти реалізації засобу вимірювання. В таблиці 5 представлено типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом.

Table 5. Typical characteristics of measuring instruments of temperature by acoustic method

Таблиця 5. Типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом

Агрегатний стан чутливого елемента	T, °C	$\delta T, \%$	Інерційність, мс
Твердий	-200...3000	0,1	2

Рідкий			
Газоподібний			

Переваги методу:

- широкий діапазон вимірювання температури;
- можливість довготривалої роботи в агресивних середовищах тривалий час;
- в якості первинного перетворювача може використовуватися сам об'єкт вимірювання;

Недоліки методу:

- необхідність індивідуального градування первинного перетворювача.

Пірометричний метод. В основі пірометрії лежить формула Планка, яка описує залежність спектральної густини енергії потоку випромінювання абсолютно чорного тіла від температури та довжини хвилі. Найпоширенішими є такі типи засобів пірометрії:

- візуальні оптичні;
- повного випромінювання (радіаційні);
- часткового випромінювання;
- спектрального відношення.

Серед згаданих вище пірометрів найбільш перспективними з метрологічної точки зору є пірометри спектрального відношення, оскільки для них вплив невизначеності реального числового значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта незначно впливає на результат вимірювання.

Пірометричним методом вимірювання температури властиві методичні похибки, які постають у зв'язку з тим, що фізичні закони, які лежать в основі цих методів, справджуються лише для абсолютно чорного випромінювача. Будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше ніж чорне тіло, нагріте до тієї ж температури, а тому - пірометричні засоби для вимірювання температури, відградувані за моделлю абсолютно чорного тіла, покажуть меншу температуру, ніж дійсна термодинамічна.

У таблиці 6 представлено основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії.

Table 6. Main characteristics of typical measuring instruments of pyrometry

Таблиця 6. Основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії

Назва	$T, ^\circ C$	$\delta T, \%$	Інерційність, с
ПП-1	-20...+2000	± 1	1.0
ПТ-1	-40...+1100	± 1	0,5
ПД-9	400...1400	± 1	1.0, 0.2, 0.1
СТ-2	300...2000	± 1	1.0, 0.2, 0.1
ПД-4	800...2500	± 0.5 ± 0.2	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-5	400...1400	± 0.5	0.5
ПД-6	300...1000	± 0.5	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-7	300...2500	± 0.5	1.0, 0.2, 0.1, 0.05
ПД-10	300...2500	± 1	1.0, 0.2, 0.1, 0.05

Переваги методу:

- можливість вимірювання, зокрема надвисоких температур;
- не створюється температурне поле об'єкта досліджень;
- можливість вимірювання температури віддалених та важкодоступних об'єктів.

Недоліки методу:

- відсутність інформації про реальне значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта суттєво збільшує похибку вимірювання температури.
- вплив оптичних властивостей середовища на результат вимірювання температури.

Метод комбінаційного розсіювання світла. Метод базується на залежності параметрів спектру комбінаційного розсіювання світла (КРС) від температури [10, 11, 13]. Спектри комбінаційного розсіювання проявляються при електронній поляризації молекул, яка викликана ультрафіолетовим або видимим світлом (100-800 нм). При цьому поляризує випромінювання не повинно поглинатися досліджуваною речовиною і має бути монохроматичним (до прикладу лазер). У спектрі комбінаційного розсіювання коливальні частоти спостерігаються у вигляді комбінаційних зміщень лінії з частотою ν_0 (частота поляризує випромінювання) [12, 14, 15].

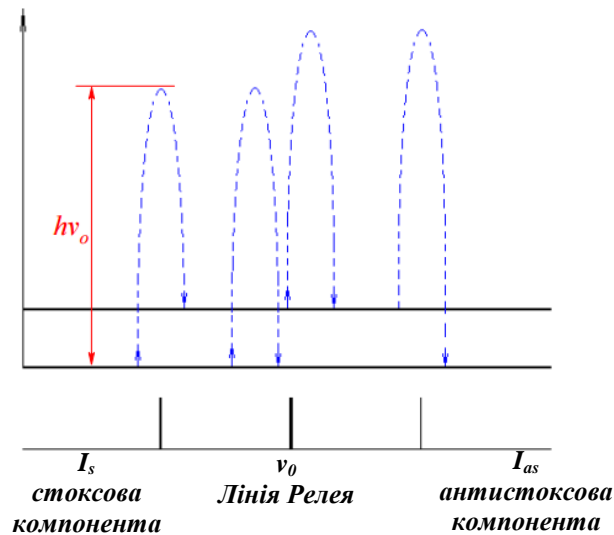


Figure 1. - Energy transitions of molecules in the process of combining light scattering

Рисунок 1. - Енергетичні переходи молекул в процесі комбінаційного розсіювання світла

Взаємодіючи з фотоном $h\nu_0$ молекула збуджується до нестійкого стану. Більшість збуджених частинок швидко релаксують – повертаються в основний стан, випромінюючи квант $h\nu_0$, що відповідає релєвському розсіюванню (рисунок 1.). Однак частина збуджених молекул релаксують не до основного, а до першого збудженого коливального стану. При цьому випромінюється квант з меншою енергією: $h(\nu_0 - \nu_i)$, що відповідає у спектрі стоксовій компоненті. Якщо до взаємодії з фотоном молекула була у збудженому коливальному стані, то при релаксації може повернутись до основного коливального рівня, випромінюючи квант з більшою енергією: $h(\nu_0 + \nu_i)$, що відповідає у спектрі антискотсовій компоненті (рисунок 1).

Засоби вимірювання температури на основі методу КРС можна побудувати за такими залежностями:

- ✓ залежності температури від співвідношення інтенсивностей стоксової (I_s) та антискотсової (I_{as}) компонент спектру КРС;
- ✓ залежності зсуву частоти КРС від температури;

Обидва способи мають методичну похибку вимірювання температури, яка пов'язана із нагріванням досліджуваного об'єкту лазерним променем. Під час вимірювання температура досліджуваного об'єкту постійно зростає за рахунок енергії отриманої від лазерного променя.

При використанні першого способу спочатку вимірюється стоксова, а потім антискотсова компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла. Загальний час вимірювання може сягати до 40 с. Тому вимірювання антискотсової компоненти відбувається за іншої температури досліджуваного зразка, що призводить до суттєвого зростання методичної похибки вимірювання температури методом КРС.

У другому способі вимірюється лише антискотсова компонента спектру КРС (рисунок 2), яка із зміною температури змінює значення еквівалентної частоти антискотсової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Час вимірювання зменшується, як мінімум вдвічі порівняно з першим методом, зменшується нагрів досліджуваного об'єкту лазерним променем, що дає змогу зменшити методичну похибку вимірювання температури методом КРС. Відомо, що при температурах 300÷400 К інтенсивність антискотсової лінії дуже мала, тому метод термометрії за відношенням I_s / I_{as} менш зручний, ніж метод за зсувом частоти КРС [16, 18].

З вимірювальних характеристик термометрії КРС найбільш важливою є висока просторова роздільна здатність, яка близька до половини довжини хвилі зондуєчого світла. При іонному або електронному бомбардуванні поверхні можлива генерація нерівноважних фотонів. При цьому інтенсивність антискотсової лінії КР може істотно збільшитися, що проявиться в аномально низькому відношенні I_s / I_{as} для даної температури.

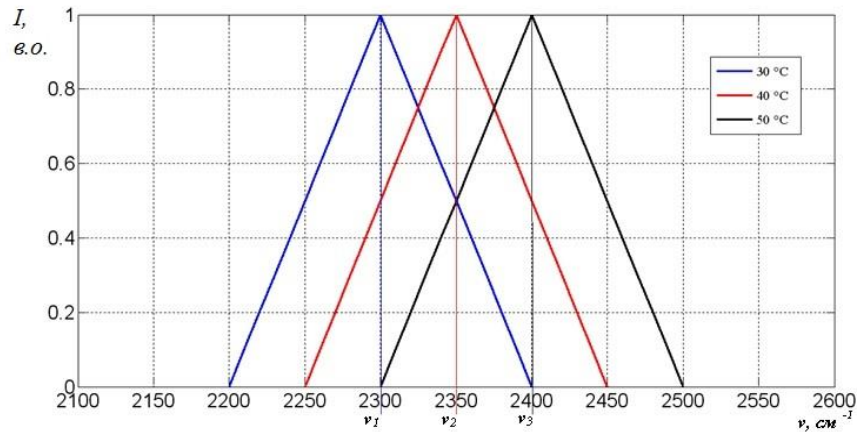


Figure 2. - Dependence frequency shift equivalent components antystoksovoyi Raman spectrum of temperature

Рисунок 2. - Залежність зсуву еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від температури

Проблема реєстрації таких станів полягає в тому, що при зіткненні однієї частинки з поверхнею нерівність локалізована в дуже малих просторово-часових інтервалах (на довжинах порядку 10^{-7} см і часі 10^{-12} с), і при усередненні за площею зондуєчого пучка і за часом зондування реєстрований ефект може бути надзвичайно малий [18, 19].

При використанні комбінаційного розсіювання для діагностики іноді виникають суттєві проблеми з реєстрацією спектру розсіяного випромінювання, яка ведеться в режимі рахунку фотонів, внаслідок дуже низької ефективності спонтанного комбінаційного розсіювання, доводиться скорочувати час накопичення сигналу, застосувавши більш потужніший лазер, але при цьому важче виділити слабкий сигнал на фоні шумів. Ще може призводити до нагрівання досліджуваного зразка. Для термометрії поглинаючих зразків малої теплоємності застосування потужного лазера можливо при високих температурах, коли потужність теплових джерел, що нагрівають і охолоджують зразок, значно вища від потужності зондуєчого пучка, що поглинається в зразку [20, 21, 22].

Переваги методу:

- не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкту;
- можливість вимірювання температури у віддалених та трудно доступних місцях;
- завадостійкість до електромагнетних полів.

Недоліки методу:

- методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкту лазером.

Table 7. Advantages and disadvantages of the most common methods of measuring temperature

Таблиця 7. Переваги та недоліки найбільш поширених методів вимірювання температури

<i>Метод вимірювання температури</i>	<i>Переваги методу</i>	<i>Недоліки методу</i>	Спотворює температурне поле об'єкта досліджень
Теплове розширення	Зручність застосування, широкий діапазон вимірювання	Складне конструктивне виконання, невисока точність	
Терморезистивний		Значний коефіцієнт саморозігріву	
Термоелектричний		Необхідність термостатування температури злутів порівняння, тепловідвід вздовж термоелектродів	
Теплових шумів	Результат вимірювання не залежить від використовуваного робочого тіла	Проблеми реалізації завадостійкої лінії зв'язку,	
Акустичний метод		Складність реалізації первинного перетворювача	

Пірометричний метод	Можливість вимірювання, зокрема, надвисоких температур; не спотворює температурне поле об'єкта досліджень; можливість вимірювання температури віддалених та важкодоступних об'єктів	Відсутність інформації про реальне значення коефіцієнта випромінюючої здатності об'єкта, що суттєво збільшує похибку вимірювання температури; вплив оптичних властивостей середовища на результат вимірювання температури
Метод комбінаційного розсіювання світла	Не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкту; можливість вимірювання температури у віддалених та труднодоступних місцях; завадостійкість до електромагнетних полів.	Методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкту лазером.

Враховуючи результати проведеного аналізу, переваги та недоліки розглянутих методів, для вирішення поставленої мети оптимальним та перспективним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектру.

Висновки.

1. Проведено аналіз основних переваг та недоліків контактних і безконтактних методів вимірювання температури. Проаналізовано можливість їх застосування для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

2. Враховуючи результати проведеного аналізу, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимальним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла.

3. Для реалізації засобу вимірювання температури об'єктів малих розмірів доцільним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектру, що забезпечує зменшення часу вимірювання та методичної похибки.

Література

1. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. Вимірювання температури: теорія та практика. Бескид Біт, Львів, 2006.
2. Lo H. W., Compaan A. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44, № 24. P. 1604.
3. Лах В.І., Гук О.П., Лах О.І., Гаєвська О.Є. Засоби контактної термометрії. Порядок вибору та встановлення / ГР 3-021-2003. - К.: Вид-во Держспоживстандарту, 2004 – 21 с.
4. Compaan A., Lee M. C, Lo H. W. et al. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54, № 10. P. 5950.
5. Schuster G., Hechtfisher B., Fellmuth B. // Rep. Prog. Phys. 1994. V. 57. P. 187.
6. Dai S., Young J.P., Begun CM., Mamantov G. // Appl. Spectrosc. 1992. V. 46, № 2. P. 375.
7. LaPlant F., Laurence C, Ben-Amotz D. // Appl. Spectrosc. 1996. V. 50, № 8. P. 1034.
8. Cui J.B., Amtmann K., Ristein J., Ley L. // J. Appl. Phys. 1998. V. 83, № 12. P. 7929.
9. Zou J., Wang S., Yang Z. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2000. V. 21, № 5. P. 793.
10. Peacock N. J., Robinson D. C, Forrest M. J. et al. // Nature. 1969. V. 224, № 5218. P. 488.
11. Alexander Dmitriyev. «Laser pyrometry offers practical temperature measurement». Heat treating progress, 2005
12. Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C. A. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71, № 8. P. 2959.
13. Peter J. Hesketh. «Bio Nano Fluidic MEMS». Springer Science & Business Media, NY, 2007
14. Jellison C E., Jr., Lowdnes D. H., Wood R. F. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28, № 6. P. 3272.
15. Kip B.J., Meier R.J. // Appl. Spectr. 1990. V. 44, № 4. P. 707.
16. Коливна спектроскопія / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chem.lnu.edu.ua/kah/Patsay/fmd/lecture-5.pdf>
17. Wang Xinwei. Experimental Micro Nanoscale Thermal Transport. // John Wiley & Song, Canada, 2012
18. L. Michalski. Temperature Measurement. Second edition. // John Wiley & Song, Canada, 2012
19. Boyraz, Özdal; Jalali, Bahram. Demonstration of a silicon Raman laser // Optics Express (2004), 5269–5273 p. 20.
20. B. Stadnyk. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 8. Elaboration of Raman Method / B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Sehed, Yu. Kryvenchuk // Sensors & Transducers, Vol. 189, Issue 6, June 2015, pp. 116-120.
21. Кривенчук Ю. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометрії поверхні мікрооб'єктів / Сегеда О., Яцишин С., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 28-31.
22. Луцик Я.Т. Енциклопедія термометрії/ Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. – Львів 2003. – 280-285 с.
23. S. Yatsyshyn. Handbook of Thermometry and Nanothermometry/ S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, L. Byniak – IFSA 2015.

References

- [1] Ya.Lutsyk, O. Lah, O.Huk, B. Stadnyk, Measuring Temperature: Theory and Practice, Lviv, Ukraine: Beskyd-Bit, 2006.
- [2] C. Swinkels, G. Kroesen, in Proc. 14th Int. Symp. on Plasma Chem., Aug. 2-6. 1999. Prague, Czech Rep., vol.2, 1999, pp.519-535,

- [3] V. Lah, O. Huk, O. Lah, O. Hayevska, Means of Contact Thermometry. The procedure for selecting and installing, HR 3-021-2003, Kyiv, Ukraine: Derzhspozhyvstandart, 2004.
- [4] M. London, F. Thevenot, "Thermal conductivity of SiC-AlN ceramic materials", J. Europ. Ceram. Soc., vol.8, no.5, p.271-277, 1991.
- [5] J. Serrano, L. Phinney, S. Kearney, "Micro-Raman thermometry of thermal flexure actuators", J. Micromech. Microeng., vol.16, p.1128-1134, 2006.
- [6] B. Hiittner, "Femtosecond Laser Pulse Interactions with Metals", in The Theory of Laser Materials Processing. Dordrecht, Germany: Springer Science, 2009, pp.315-337.
- [7] H. Brugger, P. Epperlein, "Mapping of local temperatures on mirrors of GaAs/AlGaAs laser diodes", Appl. Phys. Lett., vol.56, p.1049-1051, 1990.
- [8] J. Hicks, L. Urbach, E. Plummer, H. Dai, "Can Pulsed Laser Excitation of Surfaces be Described by a Thermal Model", Proc. SPIE, vol.1208, p.127, 1990.
- [9] J. Cui, K. Amtmann, J. Ristein, L. Ley, "Noncontact temperature measurements of diamond by Raman scattering spectroscopy", J. Appl. Phys., vol.83, no.12, p.7929-7933, 1998.
- [10] K. Suzuki, M. Sasaki, "Microstructure and mechanical properties of liquid-phase-sintered SiC with AlN and Y2O3 additions", Ceram. Int., vol.31, no.5, p.749-755, 2005.
- [11] Illuminate Your Unknown Sample with Handheld Raman Analyzers, ThermoFisher Scientific. [On-line]. Available: <http://info3.thermofisher.com/RamanAnalyzers?gclid=>.
- [12] S. Kearney, L. Phinne, M. Baker, "Spatially resolved temperature mapping of electrothermal actuators by surface Raman scattering", J. Microelectromech. Systems, vol.15, no.2, p.314-321, 2006.
- [13] G. Landsberg, L. Mandelstam, Eine neue Erscheinung bei der Lichtzertreuung, Naturwissenschaften, 1928.
- [14] W. Xinwei, Experimental Micro Nanoscale Thermal Transport. John Wiley & Song, Canada, 2012
- [15] J. Zhang, K. Hoshino, Molecular Sensors and Nanodevices. Springer Science & Business Media, USA, 2013.
- [16] Oscillation spectroscopy [On-line]. Available: <http://chem.lnu.edu.ua/kah/Patsay/fmd/lecture-5.pdf>
- [17] I. Basarab-Horwath, M. Dorozhovets, "Measurement of the Temperature Distribution in Fluids Using Ultrasonic Tomography", IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, vol.3, p.1891-1894, 1994.
- [18] N. Isaacs, E. Bales, M. Bomberg, G. Courville, "Engineering Application of Heat Flux Sensors in Buildings. Technical Note", Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885, Philadelphia, USA: Amer. Soc. for Testing and Mat., 1985. pp.122-128.
- [19] E. Schmidt, "Ein neuer Warmeflussmesser und seine praktische Bedeutung in der Wärmeschutztechnik", Mitt. Forschungswissens für Wärmeschutz, Miinchen, Germany, 1923.
- [20] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Sehed, Yu. Kryvenchuk, "Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 8. Elaboration of Raman Method", Sensors & Transducers, vol.189, iss.6, p.116-120, 2015.
- [21] O. Sehed, S. Yatsyshyn, Yu. Kryvenchuk, "Raman Method of micro objects thermometry", Measuring Equipment and Metrology, no.73, p.28-31, 2012.
- [22] Ya. Lutsyk, L. Buniak, Yu. Rudavsky, B. Stadnyk, Encyclopedia of thermometry. Lviv, Ukraine: Lviv Polytech. Publ. House, 2003.
- [23] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Ya. Lutsyk, L. Byniak, Handbook of Thermometry and Nanothermometry. Barcelona, Spaine: IFSA Publishing, 2015.