

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

© Кривенчук Юрій¹, Кривенчук Уляна², 2017

¹ Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра систем штучного інтелекту,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

yurii.p.kryvenchuk@lpnu.ua, yurkokryvenchuk@gmail.com

² Державне підприємство “Науково-дослідний інститут
метрології вимірювальних і управляючих систем”,
вул. Кривоноса, 6, 79008, Львів, Україна

Проаналізовано основні переваги та недоліки контактних та безконтактних методів і засобів вимірювання температури та можливість їх застосування для вимірювання температури мікро- та нанооб'єктів. Враховуючи результати виконаного 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.

Проанализированы основные преимущества и недостатки контактных и бесконтактных методов и средств измерения температуры и возможность их применения для измерения температуры микро- и нанообъектов.

Учитывая результаты проведенного анализа, преимущества и недостатки рассмотренных методов, для измерения температуры объектов малых размеров оптимальным является применение метода комбинационного рассеяния света. Показана целесообразность использования метода по сдвигу частоты комбинационного рассеяния света для построения средства измерения температуры нанообъектов, что обеспечивает уменьшение времени измерения и методической погрешности.

Ключевые слова: измерение температуры нанообъектов, метод комбинационного рассеяния света.

The article reviews and analyzes the most common methods of measuring temperature. Also, the possibility of applying these methods to measuring the temperature of Nano objects has been studied. As a consequence, it is determined that the method of combining light scattering is best suited for solving such an engineering problem. Means of measuring the temperature based on the method of the combination of light scattering can be constructed according to 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. the dependence of the shift of the frequency of the combination of light scatter from the temperature. Both methods have a methodological error in measuring the temperature which is associated with the heating of the object being studied by a laser beam. During the measurement, the temperature of the object being studied is constantly increasing due to the energy received from the laser. When using the first method, the Stokes, and then the anti-Stokes components of the spectrum of light scattering are first measured. The total measurement time can be up to 40 seconds. Therefore, the anti-Stokes component is measured at a different temperature of the test sample, which leads to a significant increase in the methodological error of measuring the temperature by the method of the combination of light scattering.

In the second method, only the anti-Stokes component of the spectrum of the combination scattering of light is measured, which changes the temperature of the equivalent frequency of the spectrum of light scattering. The measuring time decreases at least twice as compared to the first method, 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. It is known that at temperatures of 300 ÷ 400 K the intensity of the anti-Stokes line is very small, therefore the method of thermometry in relation to I_s / I_{as} is less convenient than the method of shifting the

frequency of light scattering. From the measuring characteristics of the thermometry of the combination light scattering, the most important is the high spatial resolution, which is close to half the wavelength of the probe light. When ion or electron bombardment of the surface is possible generation of non-equilibrium photons. At the same time, the intensity of the anti-Stokes line of the combination light scattering may increase substantially, which is manifested in an abnormally low ratio of I / I_{as} for the given temperature. The problem of registering such states lies in the fact that in the collision of one particle with the surface, the inequality is localized in very small station-temporal intervals. (at the lengths of the order of 10^{-7} cm and the time 10^{-12} s), and when the averaging over the area of the probe beam and the time of sounding, the recorded effect can be extremely small.

Keywords: temperature measurement of nano objects, method of light scattering.

Вступ. У сучасній термометрії застосовується велике розмаїття методів та засобів, що спричинено особливостями температури як вимірюваного параметра, 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) [1–4].

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 виготовлення таких матеріалів необхідно забезпечити вимірювання та жорсткий контроль температури. Зрозуміло, що до засобів вимірювання температури таких об'єктів ставлять високі метрологічні та експлуатаційні вимоги.

Реалізація процесу коректного вимірювання температури для кожного конкретного випадку потребує докладного аналізу умов теплової взаємодії системи об'єкт–термометр. Здебільшого під час вимірювання температури однозначно змінюється тепла картина досліджуваного об'єкта [5, 6]. Тому необхідне оцінювання недоліків та переваг методів і засобів вимірювання температури для визначення найоптимальніших методів для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

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

На практиці широко застосовують такі методи вимірювання температури:

- теплового розширення;
- терморезистивний;
- термоелектричний;

- шумовий;
- акустичний;
- пірометричний;
- комбінаційного розсіювання світла.

Метод теплового розширення. Метод теплового розширення ґрунтується 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 призводить 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 табл. 1 наведено перелік типових засобів вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення, та їх основних метрологічних та технічних характеристик.

Переваги методу:

- Ø зручність застосування;
- Ø порівняно широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

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

Терморезистивний метод. Принцип дії терморезистивних первинних перетворювачів ґрунтується на використанні властивості зміни електричного опору матеріалів у функції зміни температури. Для створення терморезистивних первинних перетворювачів використовують матеріали зі значним питомим електричним опором, високою стабільністю температурного коефіцієнта електричного опору, високою відтворюваністю електрофізичних параметрів, стабільністю хімічних і фізичних властивостей під час нагрівання та інертні до впливу досліджуваного середовища.

Таблиця 1

Засоби вимірювання температури, які ґрунтуються на ефекті теплового розширення

Table 1

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

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 меніска у капілярі	-5...+50	1	10
ТТЖ М		0...+100	1	10
ТКП-160Сг-М2-УХЛ2	Об'ємне розширення	0...+120	1,5	20
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
ТКП-160Сг-М1-Т2		+100...+200	2,5	20
ТКП-160Сг-М1-ТВ3		+200...+300	2,5	25

Таблиця 2

Основні типи терморезистивних засобів вимірювання температури

Table 2

The main types of thermosetting means for measuring temperature

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-8045Р	-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-8045Р	-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

Таблиця 3

Типові термоелектричні засоби вимірювання температури

Table 3

Typical thermoelectric means for measuring temperature

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

У табл. 2 подано основні типові терморезистивні засоби вимірювання температури та їх основні метрологічні та технічні характеристики.

Переваги методу:

Ø зручність застосування;

Ø широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

Ø саморозігрівання чутливого елемента;

Ø спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

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

Отже, вихідна напруга термопари залежить від різниці температур її з'єднань (робочого з'єднання та з'єднання порівняння).

Переваги методу:

Ø зручність застосування;

Ø широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

Ø необхідність термостатування температури з'єднань порівняння;

Ø незначний вплив теплопровідності матеріалів термоелектродів на результат вимірювання;

Ø спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

Шумовий метод. До контактних методів вимірювання температури також належить шумовий метод, в основу якого покладено залежність X . Найквіста – середнього значення квадрата шумової напруги (СЗКШН) на електрично ненавантаженому опорі від температури, отриману методом статистичної термодинаміки незалежно від конкретних фізико-хімічних властивостей матеріалу первинного перетворювача.

У табл. 4 подано основні методи вимірювання СЗКШН, що ґрунтуються на використанні шумового методу.

Таблиця 4

Основні засоби вимірювання температури, що ґрунтуються на використанні шумового методу

Table 4

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

Метод вимірювання СЗКШН	T, К	δT , %	Швидкодія
Імпульсний порівняння	77–273	$\pm 0,1$	
Імпульсний порівняння	273–900	$\pm 0,1-0,3$	28 с
Кореляційний порівняння	800–2500	$\leq \pm 1\%$	10 с
Кореляційний порівняння	2–4	$\leq \pm 0,01\%$ $\pm 0,3\text{мК}$	9 год
Кореляційний порівняння	4–1600	$\pm 1\%$ $\pm 0,01\%$	2 с 12 циклів по 8 год
Кореляційний прямого вимірювання	273–473	$\pm 10\text{м}$ (оцінка)	60 год
Кореляційний прямого вимірювання	273–373	± 3	0,25 год
Потужність шуму	725–1275	$\pm 1\%$	10 с
Потужність шуму	725–1275	$\pm 0,5\%$	1–100 с
Детектор rf-SQUID	2,2 мК–4,2	$\pm 10\% \pm$ $\pm 1\%$	1200 с 4000 с
Детектор rf-SQUID	1–4,2 4,2–7,2	$\pm 0,23\%$ $\pm 0,2\%$	5 год 3,5 год
Детектор rf-SQUID	0,2–0,4	$\pm 0,22\%$	0,5 год
Порівняння	4–300	$\leq \pm 1\%$	5 с
Порівняння	500–1000	$\pm 0,02\%$ (оцінка)	

Таблиця 5

Типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом

Table 5

Typical characteristics of measuring instruments of temperature by acoustic method

Агрегатний стан чутливого елемента	T, °C	δT , %	Інерційність, мс
Твердий	–00...3000	0,1	2
Рідкий			
Газоподібний			

Переваги методу:

Ø результат вимірювання температури не залежить від матеріалу чутливого елемента первинного перетворювача;

Ø широкий діапазон вимірювання температури.

Недоліки методу:

Ø низька завадостійкість засобу вимірювання за рахунок незначного рівня вихідного сигналу первинного перетворювача;

Ø тривалий час вимірювання;

Ø додаткова похибка за рахунок залежності опору від температури;

Ø спотворення температурного поля об'єкта досліджень.

Акустичний метод. Акустична термометрія ґрунтується на температурній залежності швидкості поширення акустичних коливань у речовині. Як первинні перетворювачі можна 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 використовують переважно для вимірювання середніх і високих температур, вони складаються з випромінювача і приймача акустичних хвиль (просторово рознесених). Термометри такого типу серійно не виготовляють, існують лише лабораторні та одиничні варіанти

реалізації засобу вимірювання. У табл. 5 подано типові характеристики засобів вимірювання температури акустичним методом.

Переваги методу:

- Ø широкий діапазон вимірювання температури;
- Ø можливість довготривалої роботи в агресивних середовищах тривалий час;
- Ø як первинний перетворювач може використовуватися сам об'єкт вимірювання.

Недоліки методу:

- Ø необхідність індивідуального градування первинного перетворювача.

Пірометричний метод. В основу пірометрії покладено формулу 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 найперспективнішими з метрологічного погляду є пірометри спектрального відношення, оскільки для них вплив невизначеності реального числового значення коефіцієнта випромінювальної здатності об'єкта незначно впливає на результат вимірювання.

Пірометричними методами вимірювання температури властиві методичні похибки, які виникають у зв'язку з тим, що фізичні закони, на яких оснований ці методи, справджуються лише для абсолютно чорного випромінювача. Будь-яке фізичне тіло випромінює менше

енергії, ніж чорне тіло, нагріте до тієї самої температури, а тому пірометричні засоби для вимірювання температури, відградувані за моделлю абсолютно чорного тіла, покажуть меншу температуру, ніж дійсна термодинамічна.

У табл. 6 подано основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії.

Переваги методу:

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

Недоліки методу:

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

Метод комбінаційного розсіювання світла. Метод ґрунтується на залежності параметрів спектра комбінаційного розсіювання світла (КРС) від температури [10, 11, 13]. Спектри комбінаційного розсіювання проявляються за електронної поляризації молекул, спричинених ультрафіолетовим або видимим світлом (100–800 нм). Поляризує випромінювання не повинно поглинатися досліджуваною речовиною і має бути монохроматичним (наприклад, лазер). У спектрі комбінаційного розсіювання коливальні частоти спостерігаються у вигляді комбінаційних зміщень лінії з частотою ν_0 (частота поляризує випромінювання) [12, 14, 15].

Таблиця 6

Основні характеристики типових засобів вимірювання пірометрії

Table 6

Main characteristics of typical measuring instruments of pyrometry

Назва	T, °C	δT , %	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	$\pm 0,5$ $\pm 0,2$	1,0, 0,2, 0,1, 0,05
ПД-5	400...1400	$\pm 0,5$	0,5
ПД-6	300...1000	$\pm 0,5$	1,0, 0,2, 0,1, 0,05
ПД-7	300...2500	$\pm 0,5$	1,0, 0,2, 0,1, 0,05
ПД-10	300...2500	± 1	1,0, 0,2, 0,1, 0,05

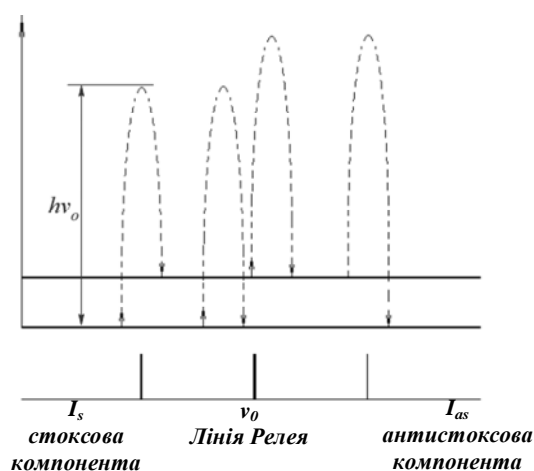


Рис. 1. Енергетичні переходи молекул під час комбінаційного розсіювання світла

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

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 релієвському розсіюванню (рис. 1). Однак частина збуджених молекул релаксують не до основного, а до першого збудженого коливального стану, 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 після релаксації може повернутись до основного коливального рівня, випромінюючи квант з більшою енергією: $h(\nu_0 + \nu_i)$, що відповідає у спектрі антистоксовій компоненті (рис. 1).

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

• залежності температури від співвідношення інтенсивностей стоксової (I_s) та антистоксової (I_{as}) компонент спектра КРС;

• залежності зсуву частоти КРС від температури,

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

У разі використання першого способу спочатку вимірюють стоксову, а потім антистоксову компоненти спектра комбінаційного розсіювання світла. Загальний час вимірювання може сягати 40 с. Тому вимірювання

антистоксової компоненти відбувається за іншої температури досліджуваного зразка, що призводить до істотного зростання методичної похибки вимірювання температури методом КРС.

У другому способі вимірюється лише антистоксова компонента спектра КРС (рис. 2), яка зі зміною температури змінює значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектра комбінаційного розсіювання світла.

Час вимірювання зменшується як мінімум вдвічі порівняно з першим методом, а також зменшується нагрівання досліджуваного об'єкта лазерним променем, що дає змогу зменшити методичну похибку вимірювання температури методом КРС. Відомо, що за температур 300÷400 К інтенсивність антистоксової 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 найважливішою є висока просторова роздільна здатність, яка близька до половини довжини хвилі зондувального світла. У разі іонного або електронного бомбардування поверхні можлива генерація нерівноважних фотонів. Інтенсивність антистоксової лінії КР може істотно збільшитися, що проявиться в аномально низькому відношенні I_s/I_{as} для цієї температури.

Проблема реєстрації таких станів полягає в тому, що в разі зіткнення однієї частинки з поверхнею нерівність локалізована в дуже малих просторово-часових інтервалах (на довжинах близько 10^{-7} см і за часу 10^{-12} с), і у разі усереднення за площею зондувального пучка і за часом зондування реєстрований ефект може бути надзвичайно малий [18, 19].

Якщо використовують комбінаційне розсіювання для діагностики, іноді виникають істотні проблеми з реєстрацією спектра розсіяного випромінювання, яка ведеться в режимі підрахунку фотонів. Внаслідок дуже низької ефективності спонтанного комбінаційного розсіювання доводиться зменшувати час накопичення сигналу, застосувавши потужніший лазер, але важче виділити слабкий сигнал на фоні шумів. Це може призводити до нагрівання досліджуваного зразка. Для термометрії поглинальних зразків малої теплоємності застосування потужного лазера можливе за високих температур, коли потужність теплових джерел, що нагрівають і охолоджують зразок, значно вища від потужності зондувального пучка, що поглинається в зразку [20, 21, 22].

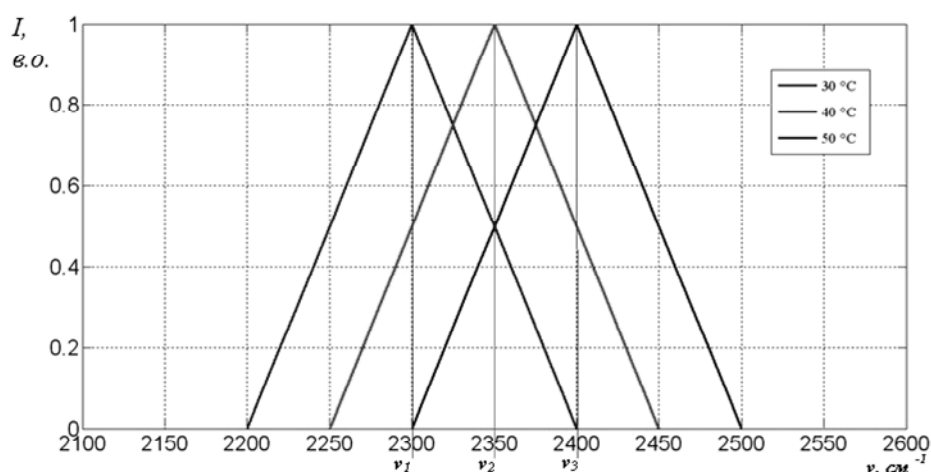


Рис. 2. Залежність зсуву еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектра комбінаційного розсіювання світла від температури

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

Таблиця 7

Преваги та недоліки найпоширеніших методів вимірювання температури

Table 7

Advantages and disadvantages of the most common methods of measuring temperature

Метод вимірювання температури	Преваги методу	Недоліки методу	
Теплове розширення	Зручність застосування, широкий діапазон вимірювання	Складне конструктивне виконання, невисока точність	Спотворює температурне поле об'єкта досліджень
Терморезистивний		Значний коефіцієнт саморозігрівання	
Термоелектричний		Необхідність термостатування температури злотов порівняння, тепловідведення 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 випромінювальної здатності об'єкта, що істотно збільшує похибку вимірювання температури; вплив оптичних властивостей середовища на результат вимірювання температури	
Метод комбінаційного розсіювання світла	Не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкта; можливість вимірювання температури у віддалених та важкодоступних місцях; завадостійкість до електромагнетних полів	Методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкта лазером	

Переваги методу:

Ø не залежить від стану поверхні досліджуваного об'єкта;

Ø можливість вимірювання температури у віддалених та важкодоступних місцях;

Ø завадостійкість до електромагнетних полів.

Недоліки методу:

Ø методична похибка вимірювання температури за рахунок нагрівання досліджуваного об'єкта 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 спектра.

Висновки

1. Проаналізовано основні переваги та недоліки контактних і безконтактних методів вимірювання температури, а також можливість їх застосування для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

2. Враховуючи результати проведеного аналізу, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимально використовувати метод комбінаційного розсіювання світла.

3. Для реалізації засобу вимірювання температури об'єктів малих розмірів доцільно застосовувати метод комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти антистоксової компоненти спектра, що забезпечує зменшення часу вимірювання та методичної похибки.

1. Луцик Я. Т., Гук О. П., Лах О. І., Стадник Б. І. *Вимірювання температури: теорія та практика*. – Львів: Бескид Біт, 2006. 2. Lo H. W., Compaan A. // *Phys. Rev. Lett.* 1980. Vol. 44, № 24. P. 1604. 3. Лах В. І., Гук О. П., Лах О. І., Гаєвська О. С. *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. – Vol. 54, No. 10. – P. 5950. 5. Schuster G., Hechtfisher B., Fellmuth B. // *Rep. Prog. Phys.* – 1994. –

Vol. 57. – P. 187. 6. Dai S., Young J. P., Begun CM., Mamtanov G. // *Appl. Spectrosc.* – 1992. – Vol. 46, No. 2. – P. 375. 7. LaPlant F., Laurence C, Ben-Amotz D. // *Appl. Spectrosc.* – 1996. – Vol. 50, No. 8. – P. 1034. 8. Cui J. B., Amtmann K., Ristein J., Ley L. // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 83, No. 12. – P. 7929. 9. Zou J., Wang S., Yang Z. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.* – 2000. – Vol. 21, No. 5. – P. 793. 10. Peacock N. J., Robinson D. C, Forrest M. J. et al. // *Nature.* – 1969. – Vol. 224, No. 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. – Vol. 71, No. 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. – Vol. 28, No. 6. – P. 3272. 15. Kip B. J., Meier R. J. // *Appl. Spectr.* – 1990. – Vol. 44, No. 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. Michalski L. *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. 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.