

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Кривенчук Юрій Павлович



УДК 536.51.083:535-92

**ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ЗСУВОМ ЧАСТОТИ
КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСПІВАННЯ СВІТЛА**

05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
Микитин Ігор Петрович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,

доктор технічних наук, професор
Томас Фрєогліх (Thomas Fröhlich),
Технічний університету міста Ільменау (*Німеччина*),
завідувач кафедри вимірювальних процедур та
сенсорної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Назаренко Леонід Андрійович,
Харківська національна академія міського
господарства МОН України,
завідувач кафедри світлотехніки та джерел світла;

кандидат технічних наук, доцент
Паракуда Василь Васильович
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут
метрології, вимірювальних і управляючих систем»,
генеральний директор.

Захист відбудеться: “31” березня 2017 р. о 14⁰⁰ год. На засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 28а, ауд. 711 V навч. корп.)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка»: 79013, Львів-13, вул. Професорська 1.

Автореферат розісланий 27 лютого 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
Вченої ради, д.т.н.



Я.Т.Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з вдосконаленням засобів та методів вимірювальної техніки. Це цілком стосується і термометрії, яка невпинно розвивається. Розширюється діапазон вимірювання, розробляються нові методи та засоби вимірювання температури, які забезпечують необхідні їх метрологічні характеристики, оскільки точність підтримання температурного режиму в більшості технологічних процесів є основним параметром, від якого залежить якість кінцевого продукту.

Як в Україні, так і за кордоном, останнім часом широко застосовуються різноманітні вироби та сенсори, розроблені на базі мікро- та наноструктурованих матеріалів. Розроблено цілу низку компонентів електронної техніки які є в сотні разів меншими за своїх попередників. До прикладу, в Японії виготовляються конденсатори на основі наноструктурованих матеріалів, які є за розмірами в 1000 разів меншими від аналогічних за ємністю конденсаторів, виготовлених за традиційними технологіями. В процесі виготовлення таких мініатюрних компонентів електронної техніки необхідно докладно контролювати температуру. Характеристики існуючих засобів вимірювань не цілком задовольняють цим вимогам. Тому, актуальним є пошук нових методів та засобів вимірювання температури мініатюрних об'єктів. Одним із перспективних напрямків для вирішення цієї проблеми є застосування методу комбінаційного розсіювання світла.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки в Україні, а саме: за держбюджетною науково-дослідницькою роботою Міністерства освіти і науки України – фаховий напрямок “Метрологія і приладобудування”; тема: “Вимірювання температури мікро- та наноструктурованих об'єктів методом комбінаційного розсіювання світла” (ДБ\КРС, 2015-2016 р., № ДР 0115U000431).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток та вдосконалення методів і засобів безконтактного вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання:

1. Проаналізовано існуючі методи та засоби вимірювання температури.
2. Запропоновано критерії оптимального вибору методу вимірювання температури малорозмірних об'єктів.
3. На основі запропонованих критеріїв підтверджено доцільність застосування методу комбінаційного розсіювання світла для вимірювання температури малорозмірних об'єктів.

4. Проведено дослідження характеристик оптичних схем з метою застосування їх в засобах вимірювання температури на основі методу комбінаційного розсіювання світла.

5. Синтезовано програмно-математичні моделі функцій перетворення оптичних елементів та оптичних схем.

6. Розроблено моделі представлення антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

7. Досліджено залежність довірчої відносної похибки від методу визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла, роздільної здатності за частотою спектроаналізатора, при випадковій, лінійній та нелінійній складових похибки передавальної характеристики елементів оптичної схеми.

8. Досліджено залежності непевності результату вимірювання температури від непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

9. Отримано інтерполяційні залежності температури від еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Об'єктом дослідження є метод вимірювання температури мікро- та наноструктурованих об'єктів за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла.

Предметом дослідження є залежність зсуву спектру комбінаційного розсіювання світла від температури.

Методи дослідження. В роботі використовуються метод Монте-Карло, методи підвищення точності вимірювальних засобів, теорія похибок та опрацювання результатів вимірювань, методологія оцінювання непевності результатів вимірювань, методи математичного та програмного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше синтезовано моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла, що дає змогу провести теоретичні дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання температури, побудованих на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

2. Вперше отримано залежності непевності визначення температури від непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти для різних матеріалів, що дозволяє поставити вимоги до непевності визначення еквівалентної частоти спектру за заданої непевності вимірювання температури.

3. Вперше отримано залежність непевності визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від

роздільної здатності спектроаналізатора, методу визначення еквівалентної частоти спектру із врахуванням випадкової, лінійної та нелінійної похибок елементів оптичного кола, що дозволяє оптимізувати параметри вхідного кола засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла, та вимоги до роздільної здатності за частотою спектроаналізатора.

4. Удосконалено моделі функцій перетворення оптичних елементів та оптичних схем, які дозволяють спростити теоретичні дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання температури, побудованих на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Отримано інтерполяційні вирази температурної залежності еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла для різних матеріалів.

2. Запропоновано методи градування засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за спектром та температурою, що дозволяє покращити метрологічні характеристики засобу вимірювання.

3. Результати дисертаційних досліджень використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» на кафедрі Інформаційно-вимірювальних технологій у лекційних курсах «Методи та засоби нановимірювань та нанотехнологій», «Нанотехнології та вимірювальна техніка» та «Основи термометрії», при проведенні лабораторних, практичних і науково-дослідних робіт студентів.

Особистий внесок здобувача. Більшість теоретичних та експериментальних досліджень виконано автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належить участь у визначенні задач, теоретичних дослідженнях, розробленні способів та методів, моделюванні, а також в експериментальній перевірці та реалізації результатів досліджень. Зокрема: [1] – розроблено схему вимірювання температури кремнієвої підкладки в реакторі іонно-плазмового напилення з використанням термометрів випромінення; [2] – проведено експериментальні дослідження, проаналізовано основні похибки вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [3] – досліджено вплив геометричної форми досліджуваного об'єкту на похибку вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [4] – на основі експериментальних даних досліджено залежність зсуву частоти комбінаційного розсіювання світла від температури; [5] – досліджено залежності похибки вимірювання температури від

багатомодовості джерела когерентного монохроматичного світла; [6] – досліджено вплив відстані між досліджуваним об’єктом та оптичним входом спектрофотометра на непевність вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла; [7] – синтезовано програмну модель та досліджено непевності визначення частоти зсуву комбінаційного розсіювання світла трьома методами; [8] – синтезовано програмно-математичну модель розподілу температури в твердому тілі.

Внесок автора в цих роботах був визначальним. У процесі виконання науково-дослідних робіт, під час розроблення та реалізації програмних схем було залучено співавторів. У цих випадках частка участі здобувача відображена у звітах та відзначена у відповідних документах.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на восьми науково-технічних конференціях та семінарах в тому числі на міжнародних.

1. IX Міжнародна науково-технічна конференція “Методи і засоби вимірювань фізичних величин” – “Температура-2012”, Львів. – 2012.
2. Міжнародна науково-технічна конференція “Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань” - “Системи - 2013”, Львів. – 2013.
3. XIX Międzynarodowa konferencja metrologów MKM’2014 , Gdańsk – Sztokholm , 2014
4. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2015», м. Славське 2015.
5. 20-th International Jubilee Modeling School of AMSE-UAPL Ukraine, Shatsk, 2015
6. Міжнародна науково-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: Досвід, проблеми та перспективи», Львів, 2015,
7. Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті”, м. Львів 2015
8. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016», м. Славське 2016.

Публікації. За тематикою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, серед яких 8 статей у наукових журналах та збірниках наукових праць; з них 8 праць опубліковано у фахових виданнях, а три – в наукометричних виданнях, індексованих в Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та п’яти додатків, викладена на 134 сторінках друкованого тексту, містить 49 рисунків, 14 таблиць та список використаних джерел із 161 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено актуальність проблеми, обґрунтовано мету та основні завдання досліджень. Показано зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів та показано їх практичну цінність, а також наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та основні праці, опубліковані за темою дисертації.

У першому розділі подано аналітичний огляд літературних джерел та публікацій за напрямом дисертаційного дослідження. Розглянуто деякі методи контактної і безконтактної термометрії та проведено аналіз можливості застосування їх для вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

Як показує проведений аналіз, найбільшого розвитку та широкого впровадження заслуговують безконтактні методи вимірювання температури, з огляду на їх специфіку, оскільки вони мають, дуже важливу особливість поміж інших методів вимірювання температури – дають можливість вимірювати температуру важкодоступних та віддалених об'єктів. Однак, що стосується безконтактної термометрії, то прогрес фундаментальних наукових досліджень у цій галузі за останні кілька десятиріч є незначним. На сьогоднішній день існує ряд суттєвих невирішених проблем, що не дають можливості підвищити точність та метрологічну надійність безконтактних засобів вимірювання температури, що в свою чергу, зробило б їх застосування більш ефективним. Проте заслуговує уваги метод комбінаційного розсіювання світла (КРС), оскільки в процесі вимірювання температури не потрібно знати коефіцієнт випромінюючої здатності того чи іншого досліджуваного об'єкту.

У другому розділі досліджено структурну схему засобу вимірювання температури на основі КРС (рисунок 1). Промінь світла з лазера через елементи первинного кола оптичної схеми потрапляє на досліджуваний об'єкт, де відбувається комбінаційне розсіювання світла. Відбите випромінювання через вторинне коло оптичної схеми потрапляє на спектроаналізатор, де відбувається визначення спектру.

Вираз відносної похибки вимірювання температури таким засобом описується залежністю

$$\delta T = \delta_m + \delta_l + \delta_{нк} + \delta_{вк} + \delta_{са}, \quad (1)$$

де δ_m – методична похибка, δ_l – частотна похибка лазера, $\delta_{нк}$ – похибка первинного оптичного кола, $\delta_{вк}$ – похибка вторинного оптичного кола, $\delta_{са}$ – похибка спектроаналізатора.

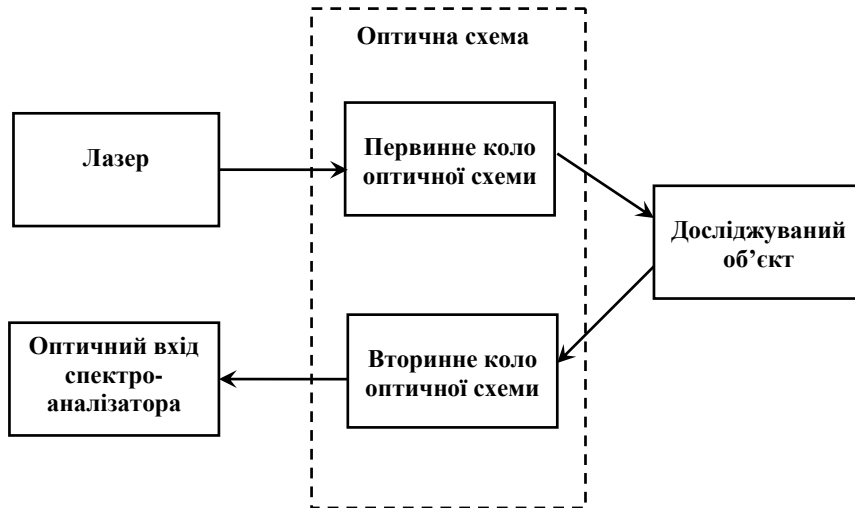


Рисунок 1 - Структурна схема засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла

На рисунку 2 зображено графічне представлення моделей спектрів КРС, які використовуватимуться для подальшого дослідження оптичних схем та елементів, із такими характеристиками:

- прямокутний з координатами (1к, 2к, 3к, 4к) за частотою 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2200 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} , 4к - 2400 см^{-1} ;
- трапецієподібний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2250 см^{-1} , 3к - 2350 см^{-1} , 4к - 2400 см^{-1} ;
- трикутний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2300 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} ;
- пилкоподібний 1к - 2200 см^{-1} , 2к - 2200 см^{-1} , 3к - 2400 см^{-1} .

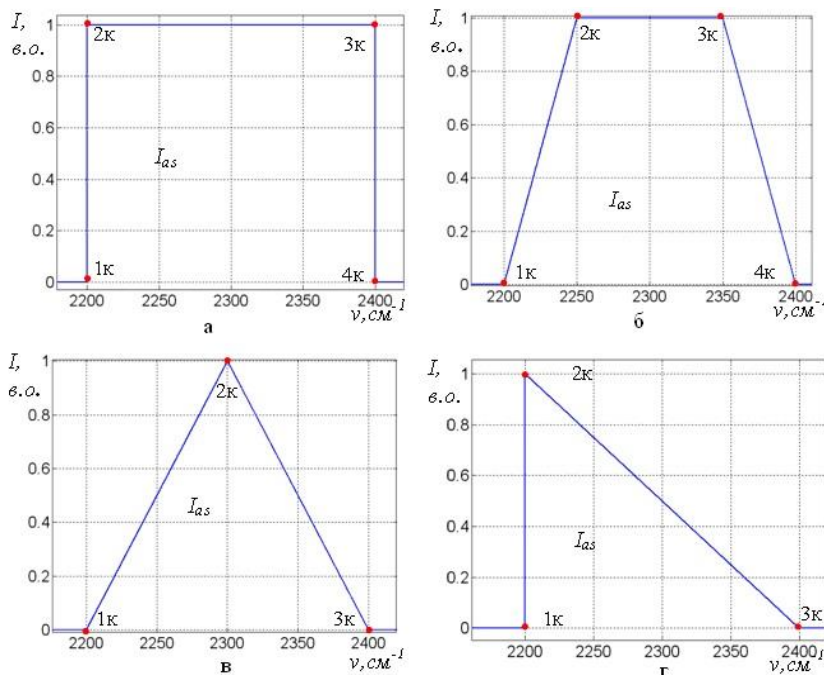


Рисунок 2 - Моделі спектрів КРС (а) прямокутний, (б) трапецієподібний, (в) трикутний, (г) пилкоподібний

Дані моделі побудовані на основі реальних спектрів КРС. Подібні моделі синтезовано для всіх елементів, з яких складається оптична схема. Для первинного оптичного кола досліджено вплив інтенсивності лазерного випромінювання на спектр КРС (рис. 3), дослідження показало, що при зміні інтенсивності лазерного випромінювання форма спектру відбитого випромінювання не змінюється, змінюється лише інтенсивність спектру КРС.

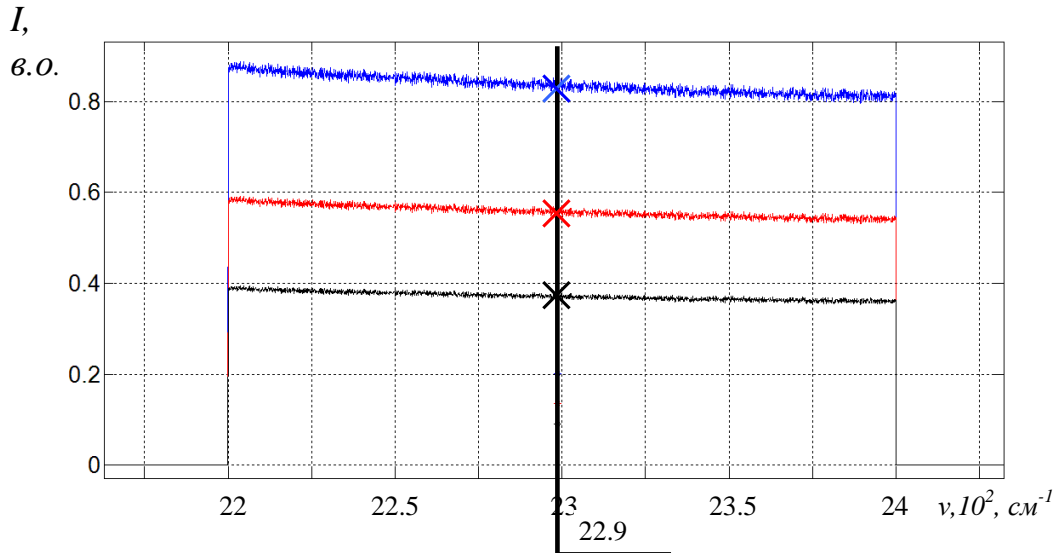


Рисунок 3 - Залежність ЕЧАКС КРС від інтенсивності випромінювання лазера

Тому проводився аналіз вторинного кола оптичної схеми (рисунок 1) з врахуванням роздільної здатності спектрофотометра. На основі моделей спектрів КРС та методів знаходження зсуву еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру (ЕЧАКС) КРС досліджено непевність визначення ЕЧАКС КРС при випадковій складовій похибки функції перетворення елементів оптичної схеми, а також лінійній, нелінійній несиметричній, нелінійній симетричній та сумарній похибці (рис. 4) при різних роздільних здатностях спектроаналізатора. Дослідження проведено для найпоширеніших оптичних схем для вимірювання температури мікро- та макрооб'єктів.

Проведене дослідження показало, що непевність визначення ЕЧАКС КРС для моделей спектрів КРС є найменшою для методу центру мас. Наприклад, для моделі прямокутного спектру КРС $\nu = 1 \text{ см}^{-1}$, непевність визначення ЕЧАКС КРС методом центру мас не перевищує 0.0032%, а медіанним методом 0.0049%. Подібні дослідження проводилися для найпоширеніших оптичних схем, та при різних роздільних здатностях спектроаналізатора. У всіх випадках метод центру мас показав кращий результат у порівнянні із медіанним методом (рис.4).

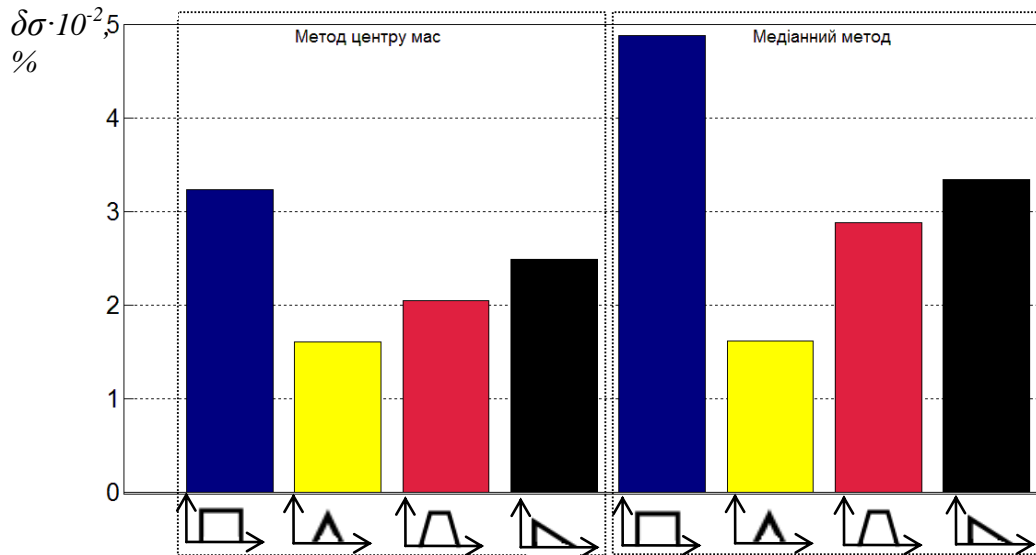


Рисунок 4 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС для різних моделей спектрів та сумарній похибці функції перетворення елементів оптичної схеми при роздільній здатності 1 см^{-1}

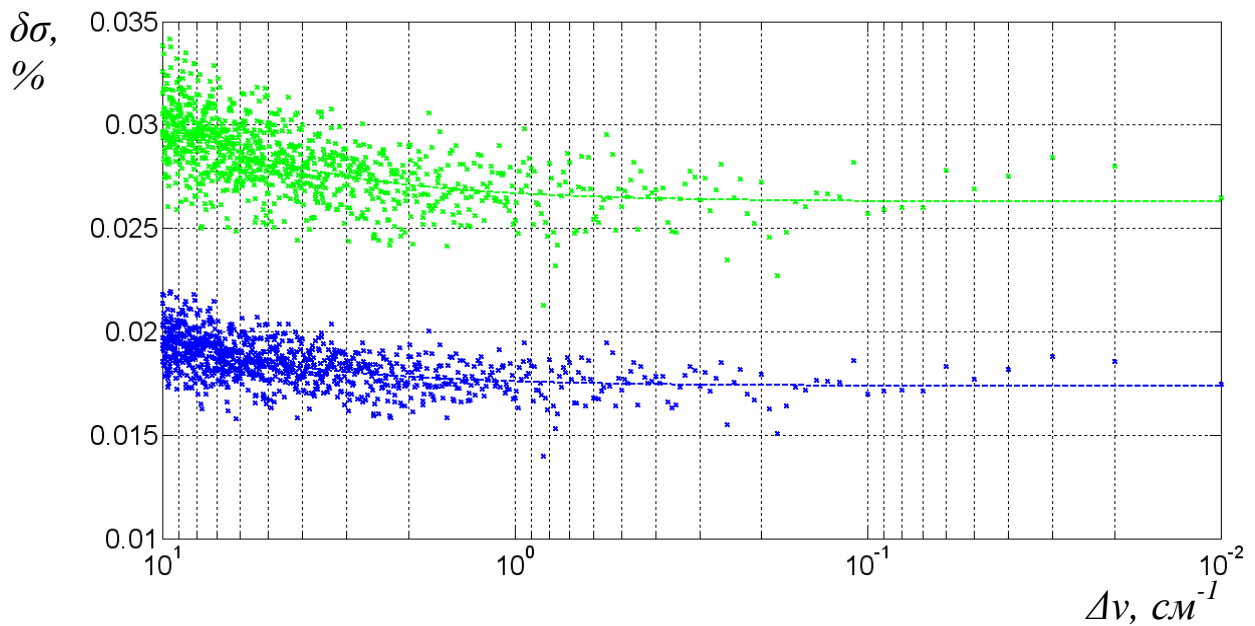


Рисунок 5 - Залежності відносного середньоквадратичного відхилення значення ЕЧАКС КРС від роздільної здатності за частотою спектроаналізатора при впливі сумарної похибки.

Отримані залежності дозволяють визначити вимоги до роздільної здатності за частотою спектроаналізатора. Як видно із характеру наведеної вище залежності при збільшенні роздільної здатності за частотою при певному її значенні відносно середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС практично не змінюється. Відповідно немає необхідності для забезпечення заданої непевності результату вимірювання температури використовувати спектроаналізатор з надмірною роздільною здатністю.

Аналізуючи оптичні схеми, а також непевності засобів вимірювання температури на їх основі, варто відзначити залежність їх конструкцій від розміру та виду об'єкт дослідження. Враховуючи тенденції сучасності з мініатюризації виробів, та як прогнозується, їхня частка продовжуватиме зростати швидкими темпами. Тому при виборі оптимальної оптичної схеми вимірювання варто зважати не тільки на обчислене в роботі відносне середньоквадратичне відхилення ЕЧАКС КРС, а й на необхідність застосування тих чи інших оптичних схем. Ускладнення оптичної схеми дещо збільшує довірчу відносну похибку вимірювання, проте це необхідна передумова для дослідження мініатюрних об'єктів які за своїми геометричними розмірами чи просторовим розташуванням неможливо досліджувати без додаткових оптичних засобів. Наприклад для роботи з мініатюрними об'єктами застосовують збиральну лінзу для отримання максимально можливого інформативного сигналу відбитого випромінювання.

У третьому розділі розглядаються експериментально отримані спектри комбінаційного розсіювання світла для досліджуваних взірців в температурному діапазоні від 18 до 70 °С. Для кожного досліджуваного матеріалу проводилося по десять досліджень у різний час, з інтервалом в 72 години. Для кожного з досліджуваних об'єктів знайдено ЕЧАКС КРС методом центру мас, також отримано аналітичні залежності ЕЧАКС КРС від температури. Досліджено залежності похибки апроксимації від порядку апроксимаційної кривої для кожного з досліджуваних об'єктів з метою отримання оптимальної функції апроксимації.

За результатами досліджень непевність визначення значень ЕЧАКС КРС у діапазоні температур від 18⁰С до 70⁰С для Al₂O₃ не перевищує 0,068 см⁻¹. Враховуючи експериментально отримані значення температури Т та середні значення ЕЧАКС КРС $\bar{\nu}$, отримано інтерполяційне рівняння яке описує залежність ЕЧАКС КРС від температури

$$\nu = A + BT + CT^2 + DT^3, \quad (2)$$

де $A=4529,84, \text{ см}^{-1}$, $B= 10,83, \text{ см}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, $C= -0,38, \text{ см}^{-1}/(^{\circ}\text{C})^2$, $D=-5,04 \cdot 10^{-7}, \text{ см}^{-1}/(^{\circ}\text{C})^3$,

ν - ЕЧАКС КРС, см^{-1} , T – температура, °С.

На рисунку 6 представлено залежність ЕЧАКС КРС від температури для Al₂O₃ та криву, побудовану за інтерполяційним рівнянням (2).

Абсолютна похибка апроксимації становить 0,012⁰С, відносна похибка - 0.00032 %.

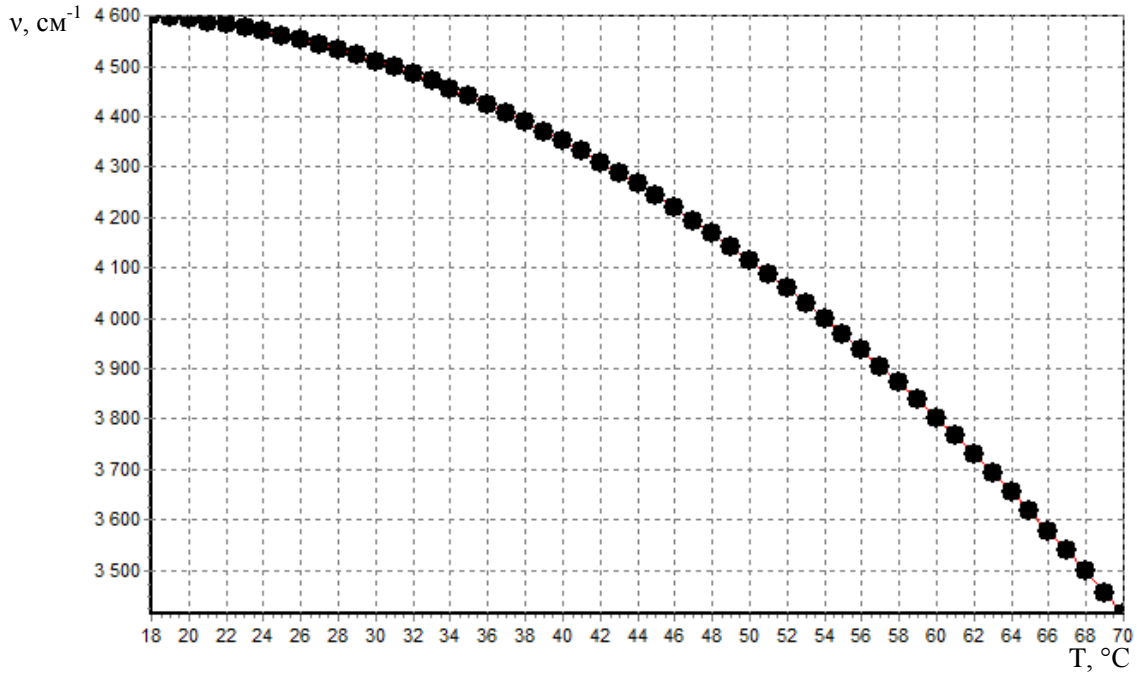


Рисунок 6. Залежність ЕЧАКС КРС від температури для Al_2O_3 .

Враховуючи вираз (2), абсолютна похибка розрахунку ЕЧАКС КРС за інтерполяційним рівнянням описується виразом

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial T} \cdot \Delta T = \frac{\partial(A + BT + CT^2 + DT^3)}{\partial T} \cdot \Delta T = (BT + 2CT + 3DT^2) \cdot \Delta T, \quad (3)$$

де ΔT - абсолютна похибка температури.

Виходячи з (3) абсолютна похибка розрахунку значення температури описується виразом

$$\Delta T = \frac{\Delta v}{BT + 2CT + 3DT^2}. \quad (4)$$

Перейшовши від абсолютних значень похибки до відносних, отримаємо

$$\delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{BT + 2CT + 3DT^2}{A + BT + CT^2 + DT^3} \cdot \delta T, \quad (5)$$

тоді

$$\delta T = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \cdot \delta v. \quad (6)$$

Перейшовши від похибок до непевностей вираз (6) матиме вигляд

$$u_T = \left| \frac{A + BT + CT^2 + DT^3}{BT + 2CT + 3DT^2} \right| \cdot u_v. \quad (7)$$

На рисунку 7 представлено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС.

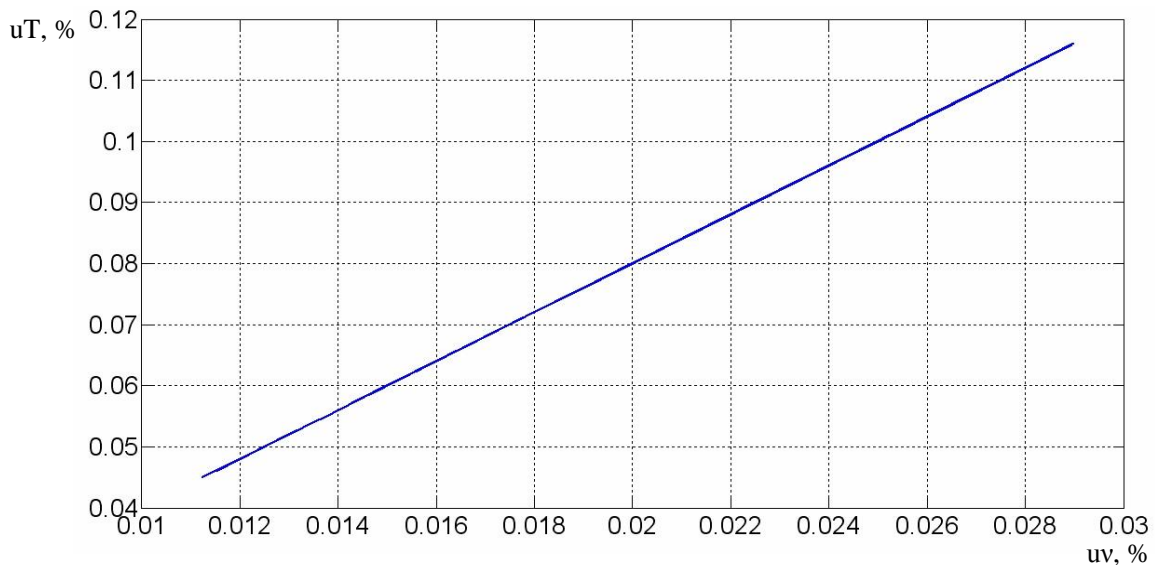


Рисунок 7 - Залежність непевності визначення температури від непевності знаходження ЕЧАКС КРС для Al_2O_3 .

У четвертому розділі представлено градуювання вторинного кола засобу вимірювання температури за ЕЧАКС КРС. Враховуючи той факт, що спектроаналізатор та лазер використовуються в засобі вимірювання температури методом КРС як завершені блоки і мають певні метрологічні характеристики, зменшити похибку вимірювання температури можна лише зменшенням методичної похибки та похибки вторинного кола оптичної схеми. Методичну похибку можна зменшити за рахунок використання менш потужних лазерів та зменшення часу вимірювання. Похибку вторинного кола оптичної схеми можна зменшити лише градуюванням функції перетворення засобу вимірювання. Можливі два способи градуювання:

- за температурою,
- за спектром.

На рисунку 8 представлено структурну схему устави для градуювання засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла. Досліджуваний об'єкт розміщується в термостаті. Джерело когерентного монохроматичного світла випромінює промінь, який проходить через первинне коло оптичної схеми та потрапляє на досліджуваний об'єкт. Відбите випромінювання потрапляє через вторинне коло оптичної схеми на спектроаналізатор де отримується

спектр КРС. В даній установі персональний комп'ютер використовується для керування процесом градування та опрацювання результатів вимірювання. В термостаті температура може змінюватися з кроком $0,1^{\circ}\text{K}$. Для кожної досліджуваної температурної точки десять разів визначаємо спектр КРС. Інформація про спектри КРС передається на персональний комп'ютер де проводиться остаточне опрацювання результатів вимірювання. Для кожного з отриманих спектрів методом центру мас визначається ЕЧАКС КРС.

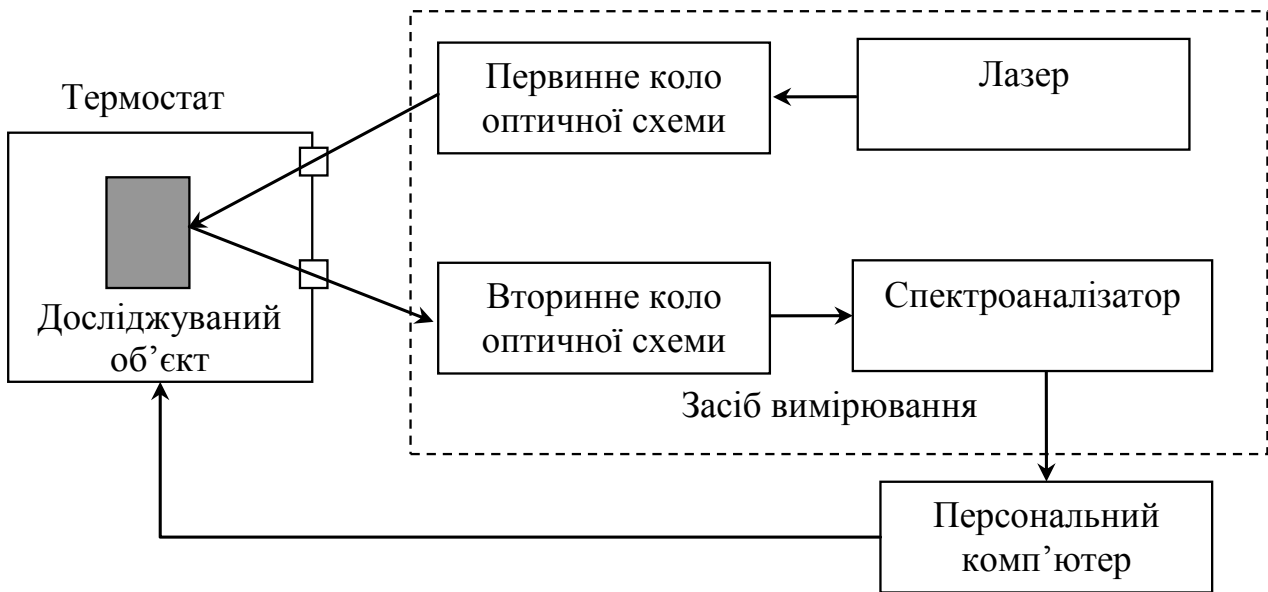


Рисунок 8 - Структурна схема установи для градування засобу вимірювання температури за температурою

Для десяти значень ЕЧАКС КРС, отриманих у кожній температурній точці, знаходиться математичне сподівання, яке відповідає даній температурній точці. У випадку, якщо градування буде проводитись, наприклад, із кроком $0,1^{\circ}\text{C}$, то у діапазоні температур від 0 до 100°C потрібно буде провести вимірювання у 1000 точках, що суттєво збільшує час градування. Тому необхідно оптимізувати вибір кількості точок для градування.

Основною перевагою градування функції перетворення засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за температурою є те, що відбувається градування функції перетворення засобу в цілому. Основним недоліком даного методу є те, що прокалібрований засіб вимірювання може використовуватися лише для того об'єкту який застосовувався при калібруванні функції перетворення засобу вимірювання. Якщо змінюється об'єкт вимірювання, то для покращення метрологічних засобу вимірювання необхідним є повторне

градування. Також варто відзначити те, що таке градування є досить довготривалим.

На рисунку 9 представлено структурну схему устави для градування за спектром засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла. Галогенова лампа формує світловий потік із спектр $\dot{I}(\nu)$, який проходить через послаблюючий оптичний елемент із комплексною частотною характеристикою $H_1(\nu)$ та потрапляє на спектроаналізатор, комплексна частотна характеристика якого є $H_2(\nu)$. Спектроаналізатор реєструє спектр вхідного сигналу та передає інформацію про нього на персональний комп'ютер.

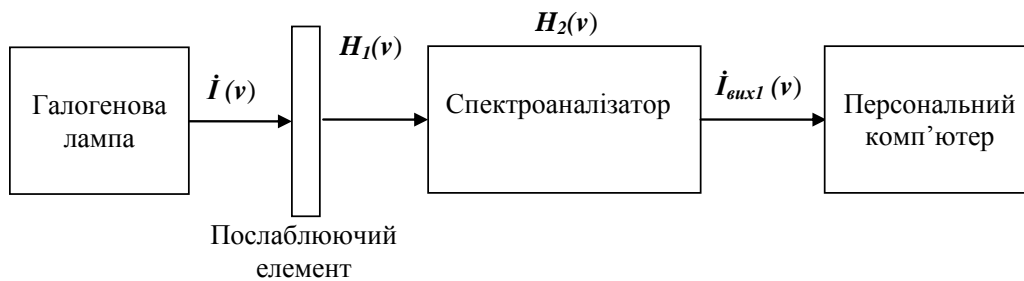


Рисунок 9 -Структурна схема устави для градування засобу вимірювання температури за спектром без оптичної схеми

Спектр сигналу $\dot{I}_{вих1}(\nu)$ на виході спектроаналізатора можна визначити за формулою

$$\dot{I}_{вих1}(\nu) = \dot{I}(\nu) \cdot |H_1(\nu)|^2 \cdot |H_2(\nu)|^2. \quad (8)$$

Для градування необхідно встановити вторинне коло оптичної схеми між послаблюючим елементом та спектроаналізатором (рисунок 10) та знову провести визначення спектру на виході спектроаналізатора, інформація про який також передається на персональний комп'ютер.

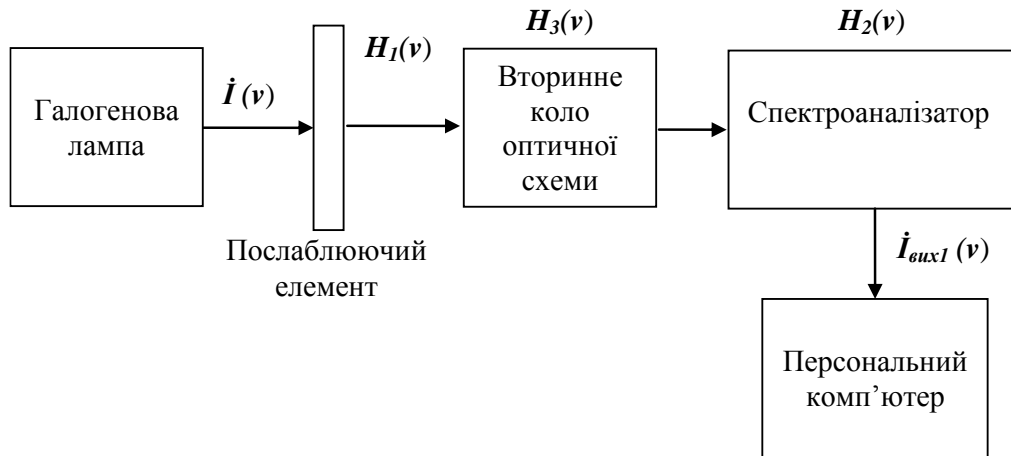


Рисунок 10 - Структурна схема устатку для градуювання засобу вимірювання температури за спектром з оптичною схемою

Спектр сигналу $\dot{I}_{вих2}(v)$ на виході спектроаналізатора можна визначити за формулою

$$\dot{I}_{вих2}(v) = \dot{I}(v) \cdot |H_1(v)|^2 \cdot |H_2(v)|^2 \cdot |H_3(v)|^2. \quad (9)$$

Враховуючи вирази (8), (9) та взявши відношення спектрів $\dot{I}_{вих2}(v)$ до $\dot{I}_{вих1}(v)$ отримаємо

$$\frac{\dot{I}_{вих2}(v)}{\dot{I}_{вих1}(v)} = |H_3(v)|^2. \quad (10)$$

Таким чином отримано дійсне значення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми засобу температури. Для отримання коректних результатів необхідно, щоб за час вимірювання двох спектрів $\dot{I}_{вих2}(v)$ та $\dot{I}_{вих1}(v)$ спектр галогенної лампи $\dot{I}(v)$, комплексні частотні характеристики послаблюючого елемента $H_1(v)$ і спектроаналізатора $H_2(v)$ не змінювалися.

Основною перевагою градуювання функції перетворення засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за спектром є те, що відкалібрований засіб можна використовувати для будь яких досліджуваних об'єктів.

Основним недоліком даного методу є те, що градуюється лише вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури. Похибка лазера та похибка

спектроаналізатора, в даному випадку, повністю входять в похибку результату вимірювання температури.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. 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.

2. Отримано вираз відносної похибки засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за зсувом еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру. Синтезовано моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла різної форми, створено програмні моделі оптичних елементів та оптичних схем засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

3. Досліджено, що оптимальним для визначення значення ЕЧАКС КРС є метод центру мас. Його використання забезпечує мінімальну непевність визначення ЕЧАКС КРС у порівнянні з іншими методами. Досліджено залежність значення ЕЧАКС КРС від інтенсивності лазерного випромінювання та встановлено, що зміна інтенсивності лазерного променя не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС. Досліджено залежність непевності визначення ЕЧАКС КРС від роздільної здатності спектроаналізатора за частотою. Існує певне значення роздільної здатності спектроаналізатора, при зменшенні якого непевність визначення ЕЧАКС КРС практично не зменшується. Це дозволяє вибрати спектроаналізатор з оптимальними характеристиками для засобу вимірювання температури, який побудований на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

4. Експериментально отримано спектри КРС для: води, окису алюмінію, циклогексану, гуми та нафталіну. Визначено залежність середнього значення ЕЧАКС КРС від температури для кожного з досліджуваних об'єктів. Отримано інтерполяційні вирази які описують залежність ЕЧАКС КРС від температури для п'яти досліджуваних об'єктів. Досліджено залежність непевності визначення температури від непевності знаходження зсуву ЕЧАКС КРС. Отримані залежності та інтерполяційні вирази дозволяють поставити вимоги до непевності вимірювання ЕЧАКС КРС залежно від необхідної непевності вимірювання температури або оцінити непевність вимірювання температури за непевністю вимірювання ЕЧАКС КРС.

5. Запропоновано методи та структурні схеми устав для градуювання засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла, за температурою та за спектром. Оптимізовано кількість точок градуювання засобу вимірювання температури для кожного з отриманих інтерполяційних виразів за критерієм мінімальної похибки апроксимації. Термометр, проградуєований за температурою, може використовуватися лише для вимірювання температури того об'єкту, який застосовувався при градуюванні

функції перетворення. Якщо змінюється об'єкт вимірювання, то необхідним є повторне градування.

б. Термометр, який проградуований за спектром, може використовуватися для вимірювання температури будь яких досліджуваних об'єктів. Проте градується лише вторинне коло оптичної схеми засобу вимірювання температури. Похибка лазера і спектроаналізатора додаються до похибки результату вимірювання. Отримано залежність непевності визначення квадрату модуля комплексної частотної характеристики вторинного кола оптичної схеми від зміни комплексних частотних характеристик спектроаналізатора, послаблюючого елемента та спектру галогенної лампи за час градування, що дозволяє встановити вимоги до їх стабільності.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті:

1. Кривенчук Ю. Контроль температури в установках реактивного іонно-плазмового наплення з використанням термометра випромінювання / Гоц Н., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2011. – № 72. – С.45-50.
2. Кривенчук Ю. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометруванні поверхні мікрооб'єктів / Сегеда О., Яцишин С., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 28-31.
3. Кривенчук Ю. Дослідження впливу не ідеальності геометричної форми зразка на результат вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання / Сегеда О., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2013. – № 74. – С.33-37.
4. Кривенчук Ю. Дослідження Раманівського зсуву частоти вуглецевих нанотрубок при зміні температури / Сегеда О., Кривенчук Ю., Заміщак Н. // Метрологія та прилади. – 2013. – № II(40). – С.215-219.
5. Kryvenchuk Y. Wpływ multi-modalności laserowej na wynik pomiaru temperatury przy użyciu metody ramanowskiego rozpraszania światła / Kryvenchuk Y., Sehedo O., Mykytyn I., Kovalchuk D. // Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. – 2014. – №38. – S.37-40.
6. Кривенчук Ю. Дослідження впливу не температурних чинників на вимірювання температури об'єкта методом комбінаційного розсіювання світла / Кривенчук Ю., Сегеда О., Микитин І., Ковальчук Д. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2013. – № 75. – С.44-48.
7. Kryvenchuk Y. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 8. Elaboration of Raman Method / Stadnyk B., Yatsyshyn S., Sehedo O., Kryvenchuk Y. // Sensors & Transducer. – 2015. – № 6/15. – Vol.189. – P.116-120.
8. Кривенчук Ю. Особливості автоматизованої обробки даних для розподілу температури масивного твердого тіла / Кривенчук Ю., Дубук В. // Технічні вісті. – 2015. – № 1-2. – С.67-70.

Матеріали конференцій:

1. Кривенчук Ю. Експериментальне вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла / Сегеда О., Кривенчук Ю. // *Методи та засоби вимірювань фізичних величин – Температура. – 2012. – Тези доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції. – V-секція. – 2012. – Львів. – С. 31-34.*
2. Кривенчук Ю. Дослідження впливу відстані між досліджуваним об'єктом та приймачем відбитого випромінювання на похибку вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання. / Сегеда О., Кривенчук Ю. // *Термографія і термометрія, Метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань – Системи. – 2013. – Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – 2013. – Львів. – С. 130-131.*
3. Кривенчук Ю. Тепловізорна оцінка якості теплоізоляції споруд. / Яцишин М., Кривенчук Ю., Дудикевич Ю. // *Термографія і термометрія, Метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань – Системи. – 2013. – Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – 2013. – Львів. – С. 137-138.*
4. Кривенчук Ю. Низькотемпературні випромінювачі для калібрування засобів пірометрії. / Семенистий А., Скоропад П., Петровська І., Кривенчук Ю. // *Термографія і термометрія, Метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань – Системи. – 2013. – Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – 2013. – Львів. – С. 163*
5. Кривенчук Ю. Безконтактний контроль температури в процесі хімічного осадження тонких плівок. / Кривенчук Ю., Микитин І., Скоропад П., Питель І., Ліхновський І., Петровська І., Кривенчук У., Ліхновська А. // *Technical Using of Measurement – 2015. – Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології. – 2015. – Славське. – С. 53-54.*
6. Кривенчук Ю. Вибір способу вимірювання температури мікрооб'єктів в межах методу комбінаційного розсіювання світла. / Кривенчук Ю. // *Technical Using of Measurement – 2015. – Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології. – 2015. – Славське. – С. 152-153.*
7. Кривенчук Ю. Безконтактний контроль температури в процесі термовакuumного осадження тонких плівок. / Кривенчук Ю., Питель І., Скоропад П., Гапула П., Микитин І., Сегеда О., Петровська І., Кривенчук У., Ліхновська А. // *Управління якістю в освіті та промисловості: Досвід, проблеми та перспективи. – Тези доповідей ІІ Міжнародної науково-практичної конференції – 2015. – Львів. – С. 204-205.*
8. Кривенчук Ю. Особливості моделювання інформаційного процесу розподілу температури масивного твердого тіла. / Дубук В., Кривенчук Ю. // *Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті. – Тези доповідей VI Всеукраїнській науково-практичній конференції – 2015. – Львів. – С. 57-59.*
9. Кривенчук Ю. Дослідження залежності частоти Раманівського зсуву від температури для Al_2O_3 . / Кривенчук Ю., Микитин І., Кривенчук У. // *Technical Using*

of Measurement – 2016. – Тези доповідей Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології. – 2016. – Славське. – С. 115-116.

АНОТАЦІЯ

Кривенчук Ю.П. Вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерство освіти і науки України, м. Львів, 2016.

Дисертація присвячена проблемі вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла. Розроблені у ході виконання дисертаційної роботи теоретичні положення, моделі та методи дають змогу у перспективі вирішити важливу проблему забезпечення належних метрологічних характеристик безконтактних засобів вимірювання температури об’єктів малих розмірів методом комбінаційного розсіювання світла. Синтезовані програмні моделі функцій перетворення оптичних елементів та оптичних схем дозволяють оцінити непевність визначення частоти Раманівського зсуву, непевність вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла та визначити оптимальні вимоги щодо метрологічних і технічних характеристик засобу вимірювання в цілому, а також до його складових.

Ключові слова: зсув частоти комбінаційного розсіювання світла, термометр, програмна модель, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Кривенчук Ю.П. Измерение температуры по сдвигу частоты комбинационного рассеяния света. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.04 – приборы и методы измерения тепловых величин – Национальный университет "Львовська політехніка" Министерство образования науки Украины, г. Львов, 2016.

Диссертация посвящена проблеме измерения температуры по сдвигу частоты комбинационного рассеяния света. Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы теоретические положения, модели и методы позволяют в перспективе решить важную проблему обеспечения надлежащих метрологических характеристик бесконтактных средств измерения температуры объектов малых размеров методом комбинационного рассеяния света. Синтезированные программные модели функций преобразования оптических элементов и оптических схем позволяют оценить неуверенность определения частоты рамановского сдвига, неуверенность измерения температуры методом комбинационного рассеяния света и определить оптимальные требования к метрологическим и техническим характеристикам средства измерения в целом, а также к его составляющим.

Ключевые слова: сдвиг частоты комбинационного рассеяния света, термометр, программная модель, математическая модель.

ANNOTATION

Kryvenchuk Y.P. Measuring temperature by Raman shift frequency. – As a manuscript.

The dissertation for the obtaining of the degree of Candidate of Technical Science by the specialty 05.11.04 – devices and methods of measurement of thermal values. – National university “Lviv Polytechnic” Ministry of Education, Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis deals with the problem of measuring temperature shift frequency Raman. Scientific and technological progress is closely linked with the improvement of means and methods of measuring equipment. This fully applies thermometry, which is constantly evolving. Expands the measurement range, new methods and tools for measuring temperature, providing their essential metrological characteristics, since accurate maintenance of temperature in most processes is a key parameter which determines the quality of the final product.

Both in Ukraine and abroad, recently widely used products and various sensors, developed based on micro- and nanostructure materials. Developed a series of electronic equipment components that are hundreds of times smaller than their predecessors. For example, in Japan made capacitors based on nanostructure materials, which are the size of 1000 times smaller than a similar capacity for capacitors manufactured by traditional technology. In the process of making such tiny components of electronic equipment should thoroughly control the temperature. Characteristics of existing measuring instruments not fully meet these requirements. So important is the search for new methods and tools for measuring the temperature of tiny objects. One of the promising directions for solving this problem is to use Raman method. Developed in the course of the dissertation theoretical principles, models and techniques make it possible in the future to solve the important problem of proper metrological characteristics of contact less temperature measurement of small size objects by Raman. Synthesized software model transformation functions of optical elements and optical circuits to assess the uncertainty of determining the frequency of Raman shift, uncertainty of temperature measurement by Raman and determine the optimal requirements for metrological and technical specifications of the measurement as a whole and to its components.

Keywords: frequency Raman shift , thermometer, programming model, mathematical model.