

Використовуючи для розрахунку функції Ламберта вираз ряду Тейлора [9]

$$W(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-n)^{n-1}}{n!} \cdot x^n, \quad (9)$$

отримаємо:

$$x = 4.965114231744276. \quad (10)$$

Використавши значення C_2 та вираз (5), маємо:

$$I_{\max} = \frac{2.8977721213039715 \cdot 10^{-3}}{T}. \quad (11)$$

Отриманий вираз являє собою закон зміщення Віна з уточненим числовим значенням $b=2.897721213039715 \cdot 10^{-3}$. Це значення дуже добре узгоджується з експериментальними даними.

Висновок. Використовуючи дослідні дані, визначивши максимум на певній довжині хвилі, можемо з високою точністю визначити температуру об'єкта за виразом:

$$T = \frac{2.8977721213039715 \cdot 10^{-3}}{I_{\max}}. \quad (12)$$

Графічне зображення формули (12) для температури до 10000 K наведено на рис. 2.

1. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – С. 8. 2. Сос-

новский А.Г. Измерение температур / А.Г. Сосновский, Н.И. Столярова // Издательство Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. – М., 1970. – С. 142. 3. Температурные измерения : справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др. – К.: Наукова думка, 1989. – 704 с. 4. Блох, А.Г. Теплообмен излучением / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с. 5. Битюков В. К. Методы и средства бесконтактного контроля теплового состояния изделий : учеб. пособие / В.К. Битюков, В.А. Петров. – М.: МИРЭА, 1999. – 96 с. 6. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty // [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/17/1/>. 7. CODATA Value: Plank constant // [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>. 8. CODATA Value: Boltzmann constant // [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?k>. 9. W-функция Ламберта // [Електронний ресурс]. – Режим доступу http://ru.wikipedia.org/wiki/W-%D1%84%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0.

УДК 536.532

МЕТОД КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСПОВАННЯ СВІТЛА В ТЕРМОМЕТРІЇ ПОВЕРХНІ МІКРООБ'ЄКТІВ

© Сегеда Олег, Яцишин Святослав, Кривенчук Юрій, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С.Бандери 12, 79013, Львів, Україна

Здійснено аналіз вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла та проведено оцінювання метрологічних характеристик методу. Об'єктом дослідження вибрано мікроконтролер.

Осуществлен анализ измерения температуры методом комбинационного рассеяния света, проведено оценивание метрологических характеристик метода. Объектом исследования выбрано микроконтроллер.

Errors of the temperature transducer constructed on the basis of the Raman effect are estimated applying the analysis for metrological characteristic divergence. The object of study was chosen microcontroller.

Вступ. Вказаний порівняно новий метод належить до небагатьох методів первинної термометрії [1–2]. Його характеристики все ще відпрацьовуються. Зокрема, проведені експериментальні дослідження сприяють усуненню існуючих застережень щодо точності методу та можливості його метрологічної атестації.

Постановка задачі. Сам по собі метод належить до небагатьох методів безпосереднього вимірювання температури. Проте існують застереження стосовно точності методу, а також можливості його метрологічної атестації.

З урахуванням багаторічного досвіду колективу кафедри у дослідженні точності спроектованих і виго-

товлених нових типів вимірювальних засобів, у статті подано результати експериментальних досліджень температури поверхні мікроконтролера на основі методу КР.

Мета роботи – подальший розвиток методу комбінаційного розсіювання світла, вивчення похибок і непевноті на основі аналізу отриманих експериментальних даних.

Теоретичні й експериментальні дослідження. Визначення температури методом комбінаційного розсіювання (надалі – КР) світла ґрунтується на температурній залежності інтенсивностей стоксової I_s та антистоксової I_{as} компонент розсіяного випромінювання, що визначаються через відповідні струми фотоперетворювача – i_s, i_{as} [1]:

$$T = \frac{h\nu_0}{k \ln \frac{i_s}{i_{as}} - 3k \ln \frac{\nu_i - \nu_0}{\nu_i + \nu_0}}, \quad (1)$$

де ν_i, ν_0 – хвильові числа фотонів, що падають і відбиваються, см^{-1} ; h – стала Планка, k – стала Больцмана.

З вимірювальних характеристик методу КР найважливішою є висока просторова роздільна здатність. За значенням вона наближається до половини довжини хвилі лазера. Відносна температурна чутливість інтенсивності антистоксової лінії становить:

$$I_{as}^{-1} \frac{dI_{as}}{dT} = \frac{h\nu_0}{kT} \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu_0}{kT}\right) \right]^{-1} \sim 10^{-2} \text{ K}^{-1}. \quad (2)$$

Експериментальні дослідження з використанням методу КР світла проведено на кафедрі ІВТ в спеціалізованій лабораторії. Все обладнання встановлено й закріплено на відкаліброваній оптичній лаві. Два мікропроцесори AMD вибрано як зразки для вивчення температури [3]. При цьому, для дослідження впливу нерівностей поверхні на результати вимірювання, на одному з вибраних вигравіруваних серійний номер. Кожен мікропроцесор по чергові закріплювали на оптичній лаві і проводили низку з 10 вимірів температури з перервою у 2 хвилини, протягом цього часу об'єкт не опромінювали. Такий інтервал вибрано для того, щоб температурне поле мікропроцесора, змінене під час попереднього вимірювання, стабілізувалось, і не відбувалося нагромадження додаткової похибки, пов'язаної з нагріванням досліджуваного об'єкта в процесі вимірювання.

Спеціалізоване кріплення (рис.1) дає змогу швидко замінювати досліджуваний мікропроцесор на інший за

допомогою ручки 1, що змінює положення трьох опор 5. Переміщення у трьох взаємно перпендикулярних напрямках здійснюється гвинтами 2, 3 та гайкою 4.

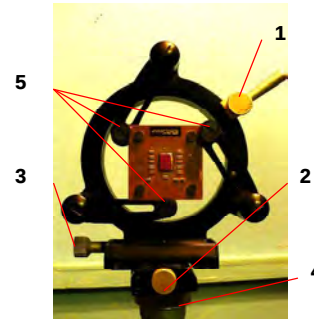


Рис. 1. Об'єкт дослідження на оптичній лаві

На закріпленій досліджуваній об'єкт направляли жмут світла лазера SL 03/1, а відбитий жмут потрапляв на вхід волоконно-оптичного кабелю, що скеровував його на вхід спектрофотометра. Спектр реєструвала камера HS 102H у режимі вертикального бінінгу, він фіксувався на цифрових носіях з використанням програми PCI-Line. Отримані результати записувались у спеціальний файл, оскільки внутрішніх засобів програми PCI-Line недостатньо для обробки отриманої інформації. Після проведення вимірювань файли експортувались в середовище Excel, де здійснювалось подальше опрацювання інформації. У цей файл вносились по десять спектрів для кожного з досліджуваних об'єктів (рис. 2). Контрольні значення температури в процесі вимірювань становило – 15 °C (288 K).

Підставивши в (1) середні значення стоксової інтенсивності $i_s=77740.538$, антистоксової інтенсивності $i_{as}=6953.878$, хвильового числа лазера $\nu_i=1579800\text{м}^{-1}$, хвильового числа відбитого випромінювання $\nu_0=52200\text{м}^{-1}$, а також відомі значення сталих Планка, Больцмана і швидкості світла, отримаємо значення вимірюваної температури – 287,82 K.

Отримані результати не можна вважати достовірними, не оцінивши значення похибки вимірювання. Оскільки для вимірювання використано спектрофотометр без просторового розділення каналів й одну камеру реєстрації [7], то $\delta i_s = \delta i_{as} = \delta i_{kam}$, а значення основної інструментальної похибки можна визначити з:

$$\delta T = \frac{1}{Z} \cdot \left[2\delta i_{kam} + \left(\frac{6 \cdot \nu_0 \cdot \nu_i}{\nu_i^2 - \nu_0^2} \right) \cdot \delta \nu_i + \left(Z + \frac{6 \cdot \nu_0 \cdot \nu_i}{\nu_i^2 - \nu_0^2} \right) \delta \nu_0 \right], \quad (3)$$

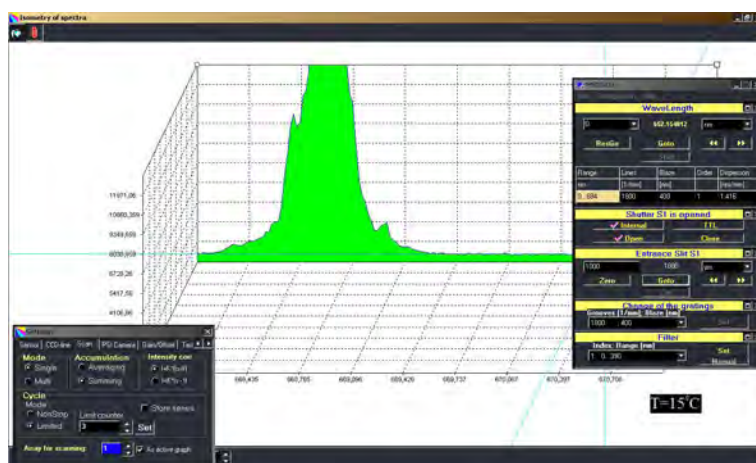


Рис. 2. Спектр комбінаційного розсіювання світла, отриманий у результаті опромінення мікроконтролера світлом лазера SL03/1 довжиною хвилі 632 нм

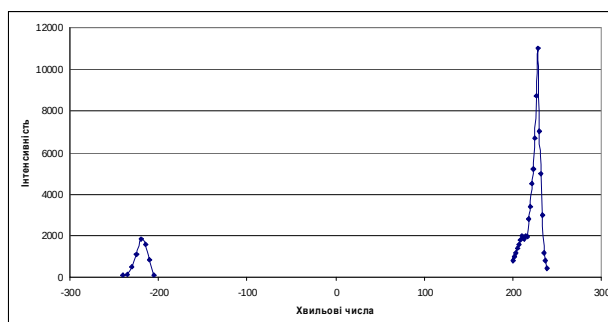


Рис.3. Спектр комбінаційного розсіювання світла лазера SL03/1($\lambda=632,9$ нм) кристалом SiO₂ (умовний нуль – хвильове число $c/\lambda=4,7367 \cdot 10^{14}$)

де параметр Z становить 2,6124, а похибка вимірювання інтенсивностей світла залежить від камери і не перевищує $\delta i_{kam} = 0,5$, згідно з паспортом [5]; значення δv_i залежить від точності встановлення довжини хвилі лазера. Оскільки в паспорті на лазер цей параметр встановлюється не у відносних одиницях, а в абсолютних: $\lambda_L = 632.9914 \pm 0.0003$ нм, то, здійснивши перехід від абсолютного значення до відносного, отримаємо $\delta v_i = 4,72 \cdot 10^{-5} \%$. Складові δv_0 визначається похибкою позиціонування спектрофотометра і дорівнює $3 \cdot 10^{-3} \%$ [6].

Підставивши відповідні значення у (3), бачимо, що основна складова похибки вимірювання δT_0 не перевищує 0,386 %.

Проаналізуємо додаткові похибки вимірювання, зумовлені можливою зміною низки чинників впливу, а саме зміною напруги живлення й температури спектрофотометра; інші чинники в межах нормального діапазону значень. Оскільки для спектрофотометра додаткова температурна похибка δT_0 не перевищує основної на кожні 5°K зміни, отримаємо, що $\delta T_0 = 0,195 \%$.

Причому методичну складову похибки можна практично усунути коригуванням результату вимірювання. Для її оцінки необхідно уточнити тривалість одного вимірювання (у нашому випадку 7 ... 8 с). Детальніше розрахунок значення методичної складової похибки, а також вираз для цифрової оцінки подано в [7]. Підставивши відповідні значення, отримуємо значення методичної складової – 0,55 К, тобто реальний результат вимірювання 287,82 К з урахуванням корекції становить $T_{ист} = 287,27$ К. Це значення температури вимірюється з похибкою, що не перевищує 0,6 %.

В ідеалі вимірювання необхідно виконувати зі зміною потужності лазера в 2–4 рази (за сталої довжини хвилі), а результати визначати екстраполяцією відношення i_s/i_{as} до нульової потужності лазера (рис. 4).

Однак практично реалізувати цю задачу не так просто, збільшуючи потужність лазерного випромінювання. До прикладу, He-Ne лазери (з регульованим блоком живлення) можуть змінювати власну потужність (потужність випромінювання) лише в два

рази, не змінюючи інших визначальних характеристик (часова і частотна стабільність, малий кут розкиду тощо). Ще ймовірнішим є те, що зміна потужності лазера призведе до появи у спектрі ще однієї моди оптичного сигналу, тобто крізь напівпрозоре дзеркало лазера зі збільшенням частоти може проникати випромінювання кратної довжини хвилі (в технічній документації регламентується його частота), що значно ускладнює аналіз методичної похибки.

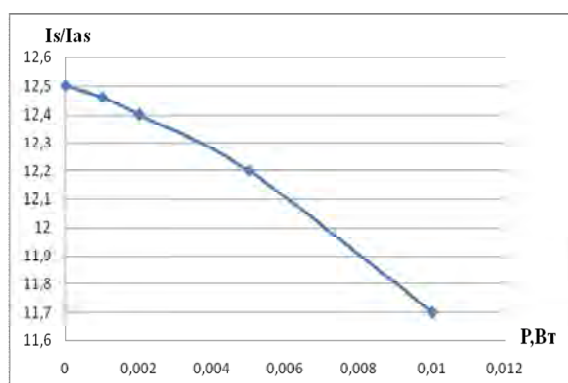


Рис. 4. Екстраполяція відношення i_s/i_{as} до нульової потужності лазера

Встановлення світлофільтра дає змогу відсікати почергово одну з мод і здійснювати вимірювання. Зміну потужності лазера не можна використовувати для екстраполяції відношення i_s/i_{as} до нульової потужності лазера без попередньої експериментальної перевірки.

Висновки. Отримані експериментальні дані вимірювання температури з використанням явища комбінаційного розсіювання світла підтверджують теоретичні засади методу, а також дають змогу припустити, що цей метод можна широко застосовувати в термометрії. Він дає змогу реалізовувати безконтактне вимірювання температури поверхні мікрооб'єктів у специфічних умовах.

1. Сегеда О. Вимірювання температури з використанням явища комбінаційного розсіювання світла / Яцишин С., Сегеда О. // *Технічні вісники*. – 2008. – № 1–2. – С.121–122.
2. Vaucher S., Catala-Civera J.M., Sarua A., et al., Phase selectivity of microwave heating evidenced by Raman spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 2006. V.99, No.11.
3. Сегеда О. Лазерна термометрія у мікротехнологіях / Стадник Б., Яцишин С., Сегеда О. Черкаси-Гурзуф 2008 С.129-132.
4. http://www.solartii.com/rus/spectral_instruments/ms350.htm (дійсна на 28.02.2012)
5. Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. Енциклопедія термометрії. – Львів, 2003. – С.280–285.
6. Павловский И.Ю. Спектрометр комбинационного рассеяния света для диагностики материалов in situ в газоразрядной плазме / И.Ю. Павловский, А.Н. Образцов // *ПТЭ*. – 1998. – № 2. – С.144–148.
7. Сегеда О. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометруванні поверхні / О. Сегеда, Б. Стадник, С. Яцишин // *Вимірювальна техніка та метрологія* – 2010. – № 71. – С.63–66.