

## WPŁYW MULTI-MODALNOŚCI LASEROWEJ NA WYNIK POMIARU TEMPERATURY PRZY UŻYCIU METODY RAMANOWSKIEGO ROZPRASZANIA ŚWIATŁA

Yurii KRYVENCHUK, Oleh SEHEDA, Igor MYKYTYN, Dmytro KOVALCHUK

Instytut Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii Narodowego Uniwersytetu "Politechnika Lwowska",  
Katedra Technologii Informacyjno-Pomiarowych, ul. St. Bandery 28a, 79013 Lwów  
tel.: +38 (032) 258-76-14, +38 (032) 258-24-80, e-mail: yurkokryvenchuk@gmail.com

**Streszczenie:** Badanie właściwości metrologicznych urządzenia, działającego na zasadzie wykorzystania ramanowskiego rozpraszania światła ze wzбудzającym multimodalnym laserem, dla pomiaru termodynamicznej temperatury powierzchni obiektów o znikomych wymiarach.

**Słowa kluczowe:** Metoda Ramana, multimodalne lasery, bezpośredni pomiar temperatury.

### 1. WPROWADZENIE

Metodę ramanowskiego rozpraszania światła (RRS) stosują przy realizowaniu nielicznego grona środków bezpośredniego pomiaru temperatury. Jednakże istnieją pewne wątpliwości co do dokładności metody, a mianowicie, co do wpływu na dokładność pomiaru temperatury multimodalnych laserów.

Niniejsza praca przedstawia próbę dokonania analizy pomiaru temperatury termodynamicznej ścieżek przewodzących prąd w układach scalonych, stosując metodę ramanowskiego rozpraszania światła.

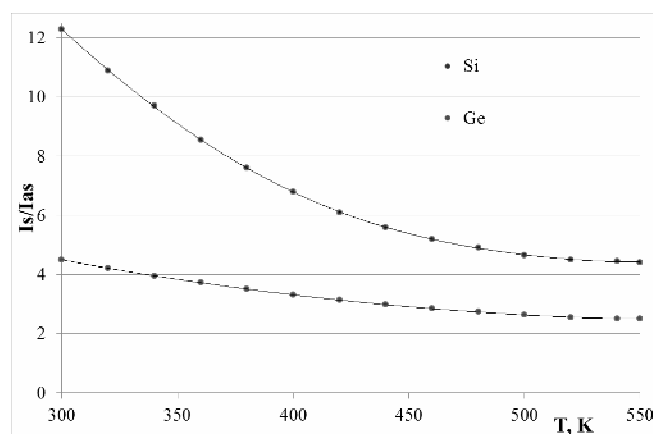
### 2. CEL PRACY I ZASADY TEORETYCZNE

Wstępna analiza osobliwości określania temperatury  $T$ , przy stosowaniu metody RRS, z uwzględnieniem zależności od temperatury intensywności składników stokesowego  $i_s$  i anti-stokesowego  $i_{as}$  promieniowania rozproszonego dokonana w [1]:

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

gdzie  $\nu_i$ ;  $\nu_0$  - falowe liczby padających i odbitych fotonów,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $h$  - stała Plancka;  $k$  - stała Boltzmanna;  $c$  - prędkość światła.

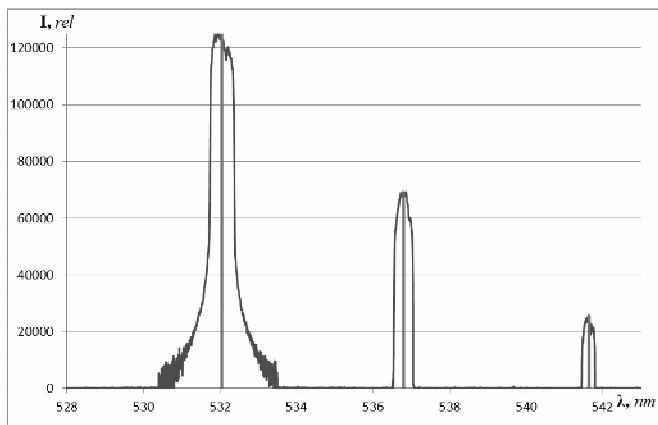
Pomimo znacznej nieliniowości (rys. 1) przebiegu funkcji, przedstawiony stosunek natężeń charakteryzuje się stosunkowo wysoką czułością do zmiany temperatury i niskim wpływem parametrów, o odmiennym od temperaturowego charakterze, badanej próbki na ostateczny wynik.



Rys. 1. Zależność od temperatury stosunku natężeń linii stokesowej i anti-stokesowej w widmie RRS. Promieniowanie wzбудzenia: He-Ne - laser,  $\lambda = 632,9$  nm (monokryształy: Si, Ge)

A jednak, jak to widać z równania (1), wyniki pomiarów temperatury zależą od dokładności uzyskania danych widmowych:  $\nu_i$ ,  $\nu_0$ ,  $i_s$ ,  $i_{as}$ . W praktyce, w celu uzyskania informacji widmowej, stosują źródło światła spójnego - promieniowanie laserowe, które jest skierowane w stronę badanego obiektu. Rejestrowanie odbitego wiązki światła wykonuje spektrofotometr, który rozkłada światło w widmo.

W celu przeprowadzania badań wykorzystano diodę laserową z trzema modami promieniowania. Główna moda na długości fali 532 nm i dwie powiązane o długościach fal odpowiednio 536,5 nm i 540,7 nm (patrz rys. 2). Żeby sprawdzić stabilność źródła promieniowania, przeprowadzono długoterminowe pomiary, wyniki których ujawniły nieznaczny dryft charakterystyk w czasie. W jednostkach względnych dryft ten nie przekracza 1% na godzinę. Ale ze względu na uzyskane wyniki, w celu zmniejszenia błędów, pomiary informacji widmowej będą wielokrotnymi. Również istnieje jeszcze inny problem - zmienna szerokość linii lasera w widmie (dla 532 - 1,2 nm, 536,5 - 0,8 nm, 540,7 - 0,4 nm; patrz rys. 2).

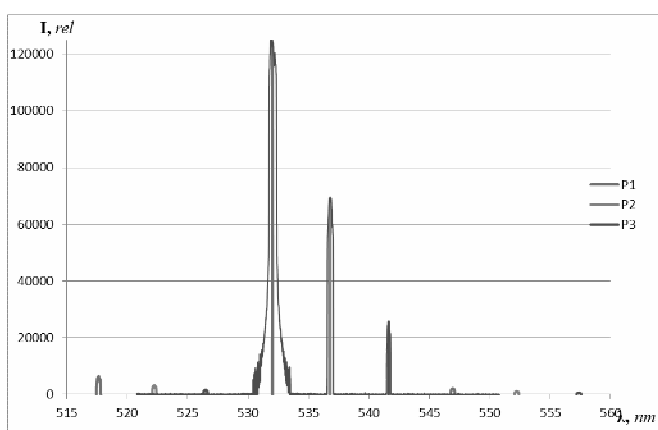


Rys. 2. Wyniki pomiarów sygnału wyjściowego diody laserowej 532 nm

Wpływ omówionych wyżej czynników na wyniki pomiarów widm RRS nie jest jeszcze dokładnie zbadany i również jest ciężko przewidywalnym.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono modelowanie matematyczne i nałożenie stokesowej i anty-stokesowej składowej komponenty widma na każdą z wyodrębnionych linii wybranej diody laserowej. Symulacje dokonano w środowisku MATLAB z wykorzystaniem analizy uzyskanych danych pomiarowych, otrzymanych za pomocą He-Ne lasera dla monokrystalicznego krzemu przy temperaturze 20°C. Żeby odtworzyć rzeczywiste wyniki badań stosowano metodę Monte-Carlo o rozkładzie normalnym (wszystkie wartości zostały uśrednione, zachowując przy tym całkowitą sumę natężeń stokesowej i anty-stokesowej składowej komponenty widma). Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 3.

Symulacje przeprowadzane dla każdej mody lasera niezależnie, uwzględniając tylko długość fali i maksymalną wartość natężenia (w trakcie modelowania brano pod uwagę tylko średnie znaczenia wybranych składowych sygnału lasera, a więc tylko szczyty przy 532 nm, 536,5 nm i 540,7 nm).



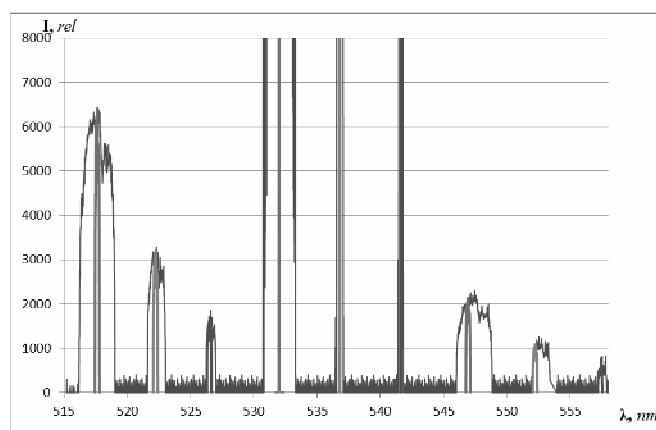
Rys. 3. Wyniki przeprowadzonej symulacji stokesowej i anty-stokesowej składowej komponenty widma (dla monokryształu Si) dla każdej z wybranych linii diody laserowej metodą Monte-Carlo

Dane, uzyskane po przeprowadzonej symulacji, wykorzystano do obliczenia temperatury według wyrażu (1). Wyniki są zestawione w tablicy.

Tablica 1. Wyniki obliczania temperatury dla monokryształu krzemu.

Grupa analizowanych wartości szczytowych	Obliczona wartość temperatury, °C	Błąd bezwzględny, K	Błąd względny, %
P <sub>1</sub>	20,262	0,262	1,31%
P <sub>2</sub>	20,189	0,189	0,95%
P <sub>3</sub>	20,282	0,282	1,41%
P <sub>1</sub> & P <sub>2</sub>	20,249	0,249	1,24%
P <sub>1</sub> & P <sub>3</sub>	20,263	0,263	1,32%
P <sub>2</sub> & P <sub>3</sub>	20,207	0,207	1,04%
P <sub>1</sub> & P <sub>2</sub> & P <sub>3</sub>	20,255	0,255	1,28%

Uzyskane wyniki wskazują, że w rezultacie dokonanej symulacji otrzymano dość wysoką wartość błędu względnego pomiaru temperatury. Tym niemniej, na podstawie szczegółowej analizy wyników symulacji, zaproponowano mierzenie temperatury monokryształu krzemu z wykorzystaniem wybranej diody laserowej. Wyniki pomiarów są przedstawione na rysunku 4. Ze względu na to, że na tej długości fali krzem nie posiada rezonansu w widmie RRS, czas pomiaru zwiększono do 900 sekund. Przeprowadzenie tego typu pomiarów, w gruncie rzeczy, było wywołane z powodu konieczności porównania danych, uzyskanych w wyniku symulacji w stosunku do rzeczywistych danych testowych, również jak i sprawdzania hipotezy co do stosowania monokryształu krzemu, jako uniwersalnego materiału do budowy precyzyjnego termometru. Przeprowadzone badania wskazują na możliwość rejestrowania widma RRS monokryształu krzemu przy stosowaniu wzbudzającego promieniowania diody laserowej o podstawowej modzie 532 nm. Dla tego, w celu uzyskania widma RRS, znacznie zwiększono czas ekspozycji. Podczas przetwarzania wyników pomiarów niezbędne jest uwzględnienie metodycznych błędów pomiarów.



Rys. 4. Widmo RRS monokryształu Si (4x4x2 mm<sup>3</sup>) wzbudzonego diodą laserową (P = 100mW)

Ilość ciepła, otrzymanego obiektem w ciągu badania, określa się według zależności:

$$P \cdot t \cdot (1 - n) = \left[ \varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (T_h^4 - T_o^4) \right] + \left[ \frac{\lambda_o \cdot a \cdot b}{l} \cdot (T_h - T_r) \right] + \left[ \lambda_s \cdot a \cdot l \cdot (T_h - T_o) \right] + \left[ \frac{\lambda_p \cdot a \cdot l}{H} \cdot (T_h - T_o) \right] \quad (2)$$

gdzie,  $\varepsilon$  - współczynnik emisyjności obiektu,  $d$  - średnica wiązki laserowej,  $T_H$  - zaburzona temperatura obiektu,  $T_0$  - temperatura otoczenia  $T_r$  - rzeczywista temperatura obiektu,  $a$  - szerokość obiektu,  $b$  - grubość obiektu,  $l$  - długość obiektu,  $H$  - grubość materiału podkładki,  $\lambda_o$  - przewodność cieplna obiektu,  $\lambda_p$  - przewodność cieplna podkładki,  $\lambda_s$  - przewodność cieplna środowiska.

Żeby ocenić metodologiczny składnik błędu, zaproponowano zastosowanie aproksymowanych wartości przewodności cieplnej krzemu, który może być stosowany w zakresie (300 - 400 K) [7]:

$$C_1 = \lambda(T) = \frac{1}{2.142 \cdot 10^{-3}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \right]. \quad (3)$$

Przewodność cieplna może być określona zgodnie z prawem Wiedemana - Franza [7, 8]: uwzględniając ten fakt że każdy elektron metali przenosi energię  $kT$ , tak, że stosunek przewodności cieplnej i elektrycznej w szerokim zakresie temperatur, opisuje się zależnością typu:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left( \frac{k}{e} \right)^2 \cdot T$$

czyli

$$\lambda = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left( \frac{k}{e} \right)^2 \cdot \gamma \cdot T = L \cdot \gamma \cdot T = C_1 \cdot T \quad (4)$$

gdzie:  $L$  - liczba Lorentza,  $e$  - ładunek elektronu.

$$L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2.45 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{\text{W} \cdot \text{ohm}}{\text{K}^{-2}} \right] \quad (5)$$

$$C_2 = L \cdot \gamma \quad (6)$$

Tak więc, biorąc pod uwagę zmiany wydajności cieplnej obiektu i środowiska, otrzymujemy dla współczynnika  $C_3$  [7, 8]:

$$C_3 = 0,847853 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{Wt}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \right] \quad (7)$$

Analizując przedstawione wyżej zależności, otrzymujemy równanie dla określenia błędu metodologicznego pomiaru temperatury:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{-S + \sqrt{S^2 + 4 \cdot \left[ \varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot P_{\text{laz}} \cdot t \cdot (1-n) \right]}}{2 \cdot \left( \varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \right)}} \quad (8)$$

$$\text{gdzie } S = \frac{C_1 \cdot a \cdot b}{l} + C_2 \cdot a \cdot l + \frac{C_3 \cdot a \cdot l}{H}$$

Podstawiając w równanie (1) odpowiednie wartości scałkowanych obszarów: intensywności stokesowej, antystokesowej, wartości liczby falowej lasera, średnią wartość liczby falowej odbitego promieniowania, stałej Plancka,

Boltzmanna i prędkości światła, otrzymujemy:  $T = 23,4^\circ\text{C}$ , a uwzględniając błędy metodyczne, ostatecznie otrzymujemy:  $T = 19,56^\circ\text{C}$ .

#### 4. PODSUMOWANIE

W trakcie badania stwierdzono, że multimodalność laserowa wpływa na precyzyjność wyników pomiaru temperatury przy stosowaniu metody ramanowskiego rozpraszania światła ze wzbudającym multimodalnym laserem.

Otrzymane wyniki przeprowadzonych badań ujawniły, że wykorzystywanie multimodalnych laserów, przy pomiarach temperatury środkami stosującymi metodę RRS, powoduje wzrost błędu metodycznego pomiaru temperatury, powstającego wskutek przesunięcia linii stokesowej.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Seheda O. Metrology of Temperature Transducer based of Raman Effect / Stadnyk B., Yatsyshyn S., Seheda O. // Sensors & Transducer. – 2010. – № 6/10. – Vol.117. – 78-84 p.
2. Seheda O. Research in Nanothermometry. Part 6. Metrology of Raman Thermometer with Universal Calibration Artifacts / Stadnyk B., Yatsyshyn S., Seheda O. // Sensors & Transducer. – 2012. – № 7/12. – Vol.142 –1-9 p.
3. DJ Cutler, HM Mould, B Bennett and AJ Turner, Use of Q-switched lasers in near infrared Fourier-Transform Raman spectroscopy 1, Journal of Raman Spectroscopy, 1991, 22(7), 367-374.
4. L Burgio, R. J. H. Clark, Library of FT-Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation, Spectrochim. Acta, Part A, 2001,57, 1491-1521
5. Cross KM, Leonardi L, Payette JR, Gomez MD, Levasseur MA, Schatka BJ, Sowa MG and Fish JS. (2007) Clinical utilization of near-infrared spectroscopy devices for burn depth assessment. Wound Repair Regen, 15, 332-40.
6. Irani F, Platek SM, Bunce S, Ruocolo AC and Chute D. (2007) Functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS): An Emerging Neuroimaging Technology With Important Applications For the Study of Brain Disorders. The Clinical Neuropsychologist, 21: 9-37.
7. Температурные измерения. Справочник / [Герашенко О. А., Гордое А. Н., Еремина А. К. и др.]; Под ред. Герашенко О. А. – К.; Наук. думка, 1989. – 704 с.
8. Фриш С.Э. Тиморева А.Е. Курс общей физики. Том II. Электрические и электромагнитные явления. Стр.149.
9. Луцик Я.Т. Енциклопедія термометрії/ Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. – Львів 2003. – 280-285 с.
10. Сегеда О. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометруванні поверхні мікрооб'єктів / Сегеда О., Яцишин С., Кривенчук Ю. // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 28-31.

## **IMPACT OF MULTI-MODALITY LASER IN TEMPERATURE MEASUREMENT METHODS FOR USING LIGHT SPRAY RAMAN**

This method applies to a small number of methods for the direct measurement of temperature. However, there are reservations as to the accuracy of the method, namely the impact on the accuracy of the temperature multi-modal lasers.

This paper makes an attempt to analyze the thermodynamic temperature measurement track circuits on the basis of Raman .

Learning - metrological accuracy characteristics statutes measurement of thermodynamic temperature of object sizes using a small Raman excitation in a multi- laser.

**Keywords:** Raman method, multi-modal lasers, direct measurement of the temperature