

Ewa LISIECKA<sup>1</sup>, Henryk PASSIA<sup>2</sup><sup>1</sup> GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICICTWA, Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie w zakresie Czystych Technologii Węglowych, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice<sup>2</sup> GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICICTWA, ZAKŁAD AKUSTYKI TECHNICZNEJ I TECHNIKI LASEROWEJ, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

## Koncepcja metody i urządzenia do optycznego pomiaru wysokich temperatur

Mgr inż. Ewa LISIECKA

Absolwentka Wydziału Matematyczno-Fizycznego Politechniki Śląskiej – kierunek fizyka techniczna o specjalności optoelektronika. Od 2011 roku studentka Interdyscyplinarnych Studiów Doktoranckich w zakresie Czystych Technologii Węglowych w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach. Obszary zainteresowań: optoelektronika, zastosowanie fizyki w przemyśle i medycynie, diagnostyka techniczna, systemy pomiarowe.



e-mail: ewa\_lisiecka@o2.pl

Dr hab. inż. Henryk PASSIA

Profesor nadzwyczajny GIG, kierownik Zakładu Akustyki Technicznej i Techniki Laserowej. Obszary badań: optoelektronika, technika laserowa, w tym anemometria i metanometria laserowa, akustyka i wibroakustyka, urządzenia z zakresu zastosowań technik laserowych i wibroakustycznych w górnictwie, przemyśle i ochronie środowiska. Autor i współautor ponad 80 prac. Współautor 50 patentów.



e-mail: hpassia@gig.eu

### Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję metody i urządzenia do optycznego pomiaru wysokich temperatur. Zaprojektowane urządzenie pomiarowe pracuje w oparciu o prawa promieniowania ciepłego – prawo Plancka i prawo przesunięcia Wiena. Proponowane rozwiązanie konstrukcyjne umożliwi pomiar temperatury eliminując wpływ amplitudowego przesunięcia charakterystyk emisyjnych. Możliwe będzie wykonanie pomiarów bez znajomości emisyjności źródła promieniowania oraz w ośrodku absorbującym promieniowanie. Przeprowadzone testy zdolności transmisyjnych zaprojektowanego układu optycznego, potwierdziły możliwość jego wykorzystania w urządzeniu.

**Słowa kluczowe:** pomiary wysokich temperatur, rozkład Plancka, prawo przesunięcia Wiena, optyczna detekcja temperatury.

### A concept of the method and device for optical measurement of high temperatures

#### Abstract

High-temperature measurements are a key parameter for control of various technological processes and research. The most common instruments used in measurements of high temperature are different types of pyrometers and infrared cameras. In the literature there is a wide variety of construction of these optical devices [1-6]. This paper presents a concept of an alternative optical method and apparatus for measurements of high temperatures. The designed sensor is based on thermal radiation law – Planck's law and Wien's displacement law (Section 2.1). The object temperature is determined by fitting the Planck's curve to the measurement data, determining the wavelength of the curve maximum and calculating the temperature using Wien's displacement law (Fig. 2). This solution permits eliminating the influence of curve amplitude shifts caused by the object emissivity, selection absorption in the infrared range and absorption thermal radiation by optical elements in the device. This device consists of two main parts (Fig. 3): an optical system and a spectrometer connected to optic fiber. At first, tests of power losses in the device optical system were carried out at different configuration of the system elements and utilizing the He-Ne laser (Section 4). The obtained results demonstrate the possibility of using the designed optical system in the device. In the near future there will be performed more tests of the equipment and work aiming at improving its detectable capability.

**Keywords:** high temperature measurements, Planck's law, Wien's displacement law, optical detection of temperature.

## 1. Optyczna detekcja temperatury

Optyczna detekcja temperatury jest obecnie wykorzystywana w wielu procesach technologicznych w celu kontroli i monitoringu ich przebiegu. Stanowi podstawę działania różnych systemów pirometrycznych i termowizyjnych, pracujących w oparciu o prawa promieniowania ciepłego. Urządzenia te umożliwiają bezkontaktowy pomiar temperatury na odległość, nie zakłócając istniejącego pola temperaturowego. W literaturze można znaleźć

wiele rozwiązań konstrukcyjnych pirometrów i kamer termowizyjnych, różniących się układami optycznymi, detektorami, zakresem widmowym w którym pracują oraz sposobem transmisji, analizy i przetwarzania danych pomiarowych. Ponadto, systemy te są projektowane w celach komercyjnych, jak również dedykowane specjalnym zastosowaniom [1-6].

Zaprojektowany, przez autorów artykułu, układ detekcyjny, różni się od wcześniej wspomnianych układów pomiarowych sposobem określania temperatury źródła promieniowania ciepłego. Systemy pirometryczne i termowizyjne rejestrują charakterystyki amplitudowe w widmie emisyjnym promieniowania elektromagnetycznego, głównie w zakresie średniej i częściowo dalekiej podczerwieni. Proponowana metoda optycznego pomiaru temperatury, polega na rejestracji kształtu zbroczy charakterystyk emisyjnych źródła, wyznaczeniu położenia maksimum krzywej emisyjnej oraz przeliczeniu długości fali, odpowiadającej maksimum, na wartość temperatury. Pomiary prowadzone są w krótkofalowym zakresie podczerwieni i części zakresu widzialnego. Opracowana metoda pomiarowa pozwoli na wyeliminowanie wpływu na pomiar przesunięcia amplitudowego charakterystyk emisyjnych, spowodowanego emisyjnością źródła promieniowania, pochłanianiem promieniowania przez elementy optyczne urządzenia oraz selektywną absorpcją w podczerwieni przez atmosferę, w której realizowany jest pomiar.

### 1.1. Podstawy teoretyczne metody pomiarowej

Każdy obiekt posiadający temperaturę wyższą od zera bezwzględnego emituje promieniowanie ciepłe w postaci fali elektromagnetycznej. Ilość energii cieplnej emitowanej z jednostkowej powierzchni źródła, w jednostce czasu do półprzestrzeni nosi nazwę egzytancji energetycznej lub, gdy rozważana jest dla jednej długości fali, egzytancji energetycznej monochromatycznej [7, 8]. Egzytancja monochromatyczna ciała doskonale czarnego, zgodnie z prawem Plancka, jest funkcją temperatury i długości fali:

$$M_{\lambda} = \frac{2c^2\pi h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (1)$$

gdzie:

- $c$  - prędkość światła,  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s;
- $h$  - stała Plancka,  $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s;
- $\lambda$  - długość fali promieniowania optycznego, nm,
- $k$  - stała Boltzmanna,  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K;
- $T$  - temperatura ciała doskonale czarnego, K.

Obliczając ekstremum pochodnej zależności (1) względem długości fali, otrzymano wzór (2), który stanowi matematyczny zapis

prawa przesunięć Wiena. Prawo to opisuje zależność między temperaturą ciała doskonale czarnego, a długością fali, dla której przypada maksimum egzytancji promieniowania:

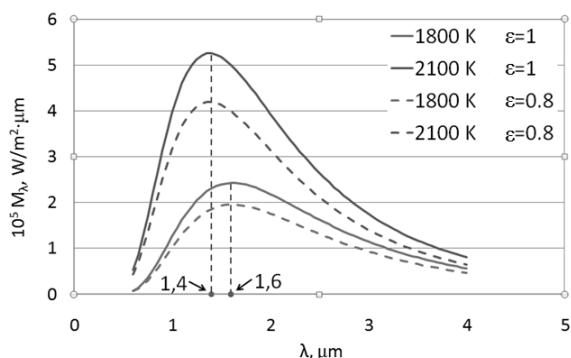
$$\lambda_{max}T = b, \quad (2)$$

gdzie:

$$b - \text{stała Wiena, } b \approx 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K.}$$

Zgodnie z prawem Wiena maksimum egzytancji monochromatycznej przesuwa się wraz ze wzrostem temperatury, w kierunku krótszych długości fali [1, 2].

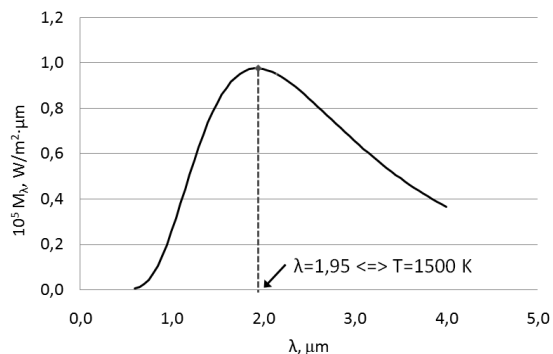
Na rysunku 1 przedstawiono egzytancję monochromatyczną ciała doskonale czarnego o emisyjności równej 1 oraz ciała nie czarnego o emisyjności 0,8 w funkcji długości fali i temperatury. Widoczne jest na nim amplitudowe przesunięcie charakterystyk emisyjnych wraz ze zmianą wartości emisyjności. Nie zmienia się natomiast długość fali, dla której przypada maksimum egzytancji. Opierając pomiar temperatury nie na pomiarze emitowanego natężenia promieniowania, a o wyznaczenie długości fali w maksimum egzytancji, można ograniczyć wpływ emisyjności obiektu na otrzymane wyniki pomiarów temperatury.



Rys. 1. Zależność egzytancji monochromatycznej ciała doskonale czarnego i nie czarnego od temperatury i długości fali

Fig. 1. Blackbody and non-black body monochromatic exitance vs. temperature and wavelength

Na rysunku 2 przedstawiono algorytm określania temperatury źródła promieniowania w oparciu o prawo przesunięć Wiena (wzór 2). Do zmierzonych danych pomiarowych mocy emitowanej ze źródła w funkcji długości fali, dopasowana zostaje charakterystyka emisyjna zgodnie z rozkładem Plancka i wyznaczona długość fali, dla której przypada maksimum egzytancji. Znając długość fali w maksimum, korzystając z prawa przesunięć Wiena wyznaczana jest temperatura obiektu.



Rys. 2. Algorytm wyznaczania temperatury obiektu w oparciu o prawo przesunięć Wiena

Fig. 2. Determination of the object temperature based on Wien's displacement law

Drugim istotnym czynnikiem, powodującym błędy we wskazaniach temperatury przez optyczne urządzenia pomiarowe, jest pochłanianie promieniowania emitowanego ze źródła przez ośrodek, w którym realizowany jest pomiar oraz przez układ optyczny urządzenia.

Wykonując pomiary w zakresie widma, w którym nie występuje selektywna absorpcja w podczerwieni i pochłanianie promieniowania przez materiały wykorzystane na elementy optyczne, można dodatkowo wyeliminować powyższe czynniki.

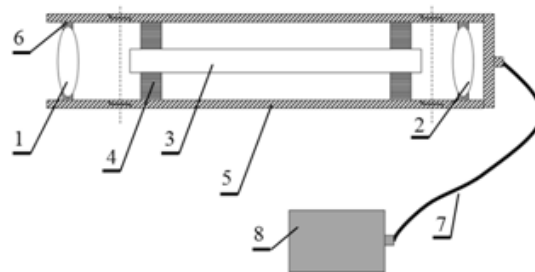
Opracowana metoda dedykowana jest do pomiaru wysokich temperatur, powyżej 1000 K. Poniżej tej wartości, maksimum charakterystyk emisyjnych jest bardzo spłaszczone, a odległości między poszczególnymi krzywymi są coraz mniejsze. Uwzględniając szumy elektroniczne urządzenia, rozdzielanie poszczególnych krzywych, poniżej 1000 K, może być niemożliwe. Ostateczny zakres pracy urządzenia zostanie określony po dalszych testach laboratoryjnych i po implementacji specjalnie opracowanego, na potrzeby urządzenia, oprogramowania realizującego algorytm przedstawiony na rysunku 2.

## 2. Projekt koncepcyjny urządzenia

Pierwsza wersja urządzenia, do badań laboratoryjnych (rys. 3), składa się z dwóch części:

- układu optycznego, umieszczonego w obudowie aluminiowej, którego główne elementy to: pręt kwarcowy o średnicy 10 mm i długości 1200 mm oraz dwie soczewki kwarcowe o średnicach 40 mm i ogniskowych 100 mm (soczewka 1) i 50 mm (soczewka 2). Soczewki mocowane są na odkręcanych końcach obudowy aluminiowej.
- spektrometru, połączonego z układem optycznym światłowodem kwarcowym.

Promieniowanie ciepłe emitowane przez badany obiekt zbierane jest przez soczewkę (1) i skupiane na czołowej powierzchni pręta (3). Dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia, wiązka promieniowania przechodzi przez całą długość pręta i jest skupiana przez soczewkę (2) na wejściu światłowodu (7), za pośrednictwem którego dociera do spektrometru. Spektrometr rejestruje i wizualizuje dane pomiarowe - zależność natężenia promieniowania padającego na detektor od długości fali. Dalszy etap przetwarzania danych pomiarowych będzie odbywał się zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 3. Projekt optoelektronicznego czujnika wysokich temperatur [9]:

- soczewka  $f=100$  mm, 2 - soczewka  $f=50$  mm, 3 - pręt kwarcowy, 4 - pierścienie mocujące pręt, teflon, 5 - obudowa, aluminium PA7, 6 - mocowanie soczewki, 7 - światłowód kwarcowy, 8 - spektrometr

Fig. 3. Setup of the optoelectronic device for high temperature measurement [9]:

- optical lens  $f=100$  mm, 2 - optical lens  $f=50$  mm, 3 - quartz rod, 4 - rod fastening rings, teflon, 5 - casing, aluminium PA7, 6 - lens mount, 7 - quartz optic fiber, 8 - spectrometer

### 2.1. Dobór materiałów

Kluczowymi parametrami przy doborze materiałów na elementy optyczne urządzenia są temperatura topnienia i pasmo transmisji. Pierwsza wersja czujnika, do badań laboratoryjnych, zakłada wykorzystanie na elementy optyczne kwarcu, natomiast docelowa szafira. Tabela 1 przedstawia zestawienie wybranych własności fizycznych, wcześniej wspomnianych, materiałów.

Tab. 1. Wybrane własności fizyczne kwarcu i szafiru [10]  
 Tab. 1. Selected physical properties of quartz and sapphire [10]

	Temperatura topnienia, °C	Pasma transmisji, $\mu\text{m}$
Kwarc	1463	0,17-2,8
Szafir	1800	0,15-5,5

W finalnej wersji czujnika również aluminiowa obudowa układu optycznego, zostanie zastąpiona obudową wykonaną z materiałów odpornych na działanie wysokiej temperatury. Przewiduje się wykorzystanie ogniodpornych materiałów ceramicznych.

## 2.2. Spektrometr VIS-NIR

Rysunek 4 przedstawia układ spektrometru do rejestracji charakterystyk emisyjnych.

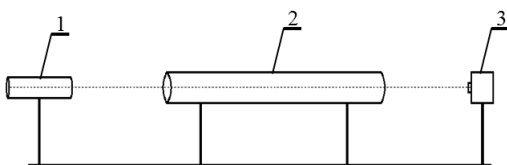


Rys. 4. Spektrometr VIS-NIR: 1 - komputer, 2 - monochromator, 3 - wzmacniacz, 4 - sterownik  
 Fig. 4. Spectrometer VIS-NIR: 1 - computer, 2 - monochromator, 3 - amplifier, 4 - driver

Głównym elementem urządzenia jest monochromator siatkowy M250, wykonany w układzie Czerny-Turner'a [11]. Monochromator z detektorem półprzewodnikowym InGaAs umożliwia wyselekcjonowanie dowolnej linii widma w zakresie spektralnym 900 – 1700 nm i rejestrację natężenia promieniowania emitowanego przez źródło (alternatywną opcją jest zastąpienie detektora półprzewodnikowego fotopowielaczem). Rozdzielczość monochromatora wynosi 18 nm, co umożliwia wykonywanie pomiarów z rozdzielczością temperaturową ok. 50 K. Rozdzielczość monochromatora może być zwiększona do 1,8 nm przez wymianę siatki dyfrakcyjnej, co pozwoli na osiągnięcie znacznie większej rozdzielczości temperaturowej urządzenia.

## 3. Testy laboratoryjne układu optycznego

Pierwszym etapem testów laboratoryjnych była analiza zdolności transmisyjnych zaprojektowanego układu optycznego. W tym celu wykonano stanowisko pomiarowe (rys. 5) składające się z lasera He-Ne emitującego wiązkę promieniowania o długości  $\lambda=633$  nm i mocy  $P=1$  mW, układu optycznego urządzenia pomiarowego oraz detektora w postaci fotoogniwa krzemowego.



Rys. 5. Stanowisko do badań strat mocy optycznej w układzie optycznym urządzenia: 1- laser He-Ne, 2 - układ optyczny urządzenia, 3 - fotoogniwo krzemowe  
 Fig. 5. Laboratory stand for measurements of optical power losses in the optical system of the device: 1 - He-Ne laser, 2 - optical system of device, 3 - silicon detector

Pomiary transmitancji, określającej ilość promieniowania przepuszczanego przez układ optyczny, prowadzone były dla dwóch konfiguracji: samego pręta oraz pręta z dwoma soczewkami. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Transmitancja elementów optycznych  
 Tab. 2. Transmittance of optical elements

	Pręt	Pręt + soczewki
Transmitancja, %	58	48

Otrzymane wyniki świadczą o możliwości propagacji w układzie optycznym promieniowania laserowego, a tym samym o możliwości propagacji w układzie optycznym promieniowania temperaturowego.

## 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono autorską koncepcję metody i urządzenia do optycznego pomiaru wysokich temperatur, zaprezentowano również wersję urządzenia do badań laboratoryjnych. Opracowana metoda pomiarowa różni się od stosowanych do tej pory rozwiązań w pirometrach i kamerach termowizyjnych, sposobem analizy danych pomiarowych i wyznaczania, na ich podstawie, temperatury źródła promieniowania. Dzięki wykorzystaniu prawa przesunięć Wiena, możliwe będzie prowadzenie pomiarów temperatury w sposób bezkontaktowy, bez konieczności znajomości emisyjności źródła promieniowania cieplnego. Co więcej, detekcja temperatury będzie mogła być realizowana w obecności substancji pochłaniających promieniowanie podczerwone, poprzez odpowiedni dobór zakresu długości fali, w którym prowadzone będą pomiary. Przeprowadzone wstępne testy laboratoryjne układu optycznego urządzenia, wykazały jego zdolność do prowadzenia wiązki laserowej, a tym samym możliwość detekcji monochromatycznej mocy promieniowania na wyjściu układu. Konieczne są dalsze prace laboratoryjne nad poprawą możliwości detekcyjnych urządzenia.

## 5. Literatura

- [1] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria. Przyrządy i Metody. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1998.
- [2] Wojas J.: Promieniowanie termiczne i jego detekcja. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [3] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2001.
- [4] Praca zbiorowa pod red. Henryka Madury: Pomiary termowizyjne w praktyce. Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa, 2004.
- [5] Dereniak E.L., Boreman G.D.: Infrared detectors and systems. Wiley, New York, 1996
- [6] Rogalski A., Chrzanowski K.: Infrared devices and techniques. Opto-Electronics Review. Vol. 10, No. 2, p. 111-136, 2002.
- [7] PN-90/E-01005 Technika świetlna – terminologia. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1986.
- [8] PN-85/N-01103 Promieniowanie optyczne - oznaczenia wielkości fizycznych, Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1986.
- [9] Lisiecka E., Passia H., Stańczyk K.: Sposób oraz urządzenie do optycznego pomiaru wysokich temperatur. Zgłoszenie projektu wynalazczego w Urzędzie Patentowym RP o numerze P.403662, 2013.
- [10] Katalog firmy Melles Griot: [www.cvimellesgriot.com/Company/Documentation.aspx](http://www.cvimellesgriot.com/Company/Documentation.aspx)
- [11] Strona internetowa producenta spektrometru: [www.optel.opole.pl](http://www.optel.opole.pl)

otrzymano / received: 19.02.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.04.2014

artykuł recenzowany / revised paper