

Piotr MILUSKI, Jan DOROSZ

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, KATEDRA PROMIENIOWANIA OPTYCZNEGO

Pomiar właściwości cieczy za pomocą światłowodowego czujnika kapilarnego

Mgr inż. Piotr MILUSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej (2004). Ukończył studia doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w 2009 r. Zainteresowania naukowe obejmują konstrukcje czujników światłowodowych.



e-mail: miluski Piotr@o2.pl

Prof. dr hab. inż. Jan DOROSZ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej (1973). Od 1978 r. zajmuje się wytwarzaniem i zastosowaniami światłowodów. Tytuł naukowy profesora otrzymał w listopadzie 2006. Kierownik Katedry Promieniowania Optycznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej.



e-mail: doroszjan@pb.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono ideę oraz praktyczną realizację czujnika wybranych parametrów cieczy przepływającej przez dwuwarstwowy światłowód kapilarny, określanych na podstawie pomiaru współczynnika załamania światła tej cieczy. Zaprezentowano analizę działania sensora zrealizowaną z wykorzystaniem metody elementarnych strumieni świetlnych. Jako przykład zastosowania zaprojektowanego i wykonanego czujnika, przedstawiono czujnik temperatury oleju pracujący w zakresie 10-70 °C. Zmiana temperatury w badanym zakresie implikuje zmianę współczynnika załamania światła oleju w granicach 1,370-1,385. Przedstawiono konstrukcję i charakterystyki wytworzonego czujnika. Głównymi zaletami tego rozwiązania są: szybkość wykonywania pomiarów, zapewnienie izolacji galwanicznej z mierzoną cieczą oraz możliwość ciągłego monitorowania cieczy przepływającej przez światłowód kapilarny. Jest to istotne w wielu zastosowaniach w automatyce i w systemach kontroli procesów przemysłowych, gdzie zaprezentowany czujnik może znaleźć zastosowanie.

Słowa kluczowe: czujnik do pomiaru współczynnika załamania światła cieczy, współczynnik załamania światła, światłowód kapilarny.

Capillary optical fiber sensor for measurements of liquid properties

Abstract

The paper presents an idea and practical realization of a sensor for determination of selected properties (e.g. temperature or concentration of solution etc.) of liquid flowing through double layer capillary waveguide based on measurements of the refractive index of this liquid. The transfer of a luminous flux through the capillary waveguide was performed by numerical analysis using the ray propagation method. The simulation showed that the response signal from the capillary sensor depends strongly on the liquid refractive index. For the liquid refractive index changes from 1.5 to 1.3 the output signal decreased to 50% of the initial value. It suggests the good sensitivity of the double layer capillary waveguide. The presented sensor was applied to determine the industrial oil temperature within the range of 10-70 °C. It corresponds to the oil refractive index change from 1.370 to 1.385. The main advantages of the presented sensor are: fast measurements, electrical isolation between the liquid measured and the electrical equipment used as well as continuous monitoring of the measured value without change of the sample. The described capillary optical fibre sensor is useful for automation and remote control of many industrial processes.

Keywords: capillary waveguide, refractive index, refractive index sensor.

1. Wstęp

Automatyzacja i postęp techniczny stawiają coraz to nowe wymagania odnośnie monitorowania procesów przemysłowych. Pomiar różnych wielkości fizycznych związanych z właściwościami cieczy może być określany na podstawie pomiaru ich współczynnika załamania światła. Do wielkości określanych poprzez pomiar współczynnika załamania światła można zaliczyć: stężenie roztworu, skład chemiczny, temperaturę, napięcie

mechaniczne, pole magnetyczne itd. Szeroki zakres możliwości zastosowań konstrukcji opartych na pomiarze współczynnika załamania światła powoduje nieustanny wzrost zainteresowania tą tematyką. Pomiar współczynnika załamania cieczy może zostać zrealizowany za pomocą światłowodu fotonicznego, wypełnionego mierzoną cieczą [1]. Określenie wartości współczynnika załamania światła można też zrealizować na podstawie pomiaru długości fali odcięcia [1]. Inna konstrukcja sensora, oparta na typowym światłowodzie włóknistym, została przedstawiona przez Banerjee [2]. Tu, część pomiarowa światłowodu została całkowicie, lub częściowo pozbawiona płaszczu i zanurzona w badanej cieczy. Wówczas, wartość współczynnika załamania światła może być określona na podstawie zmian transmisji mocy optycznej w światłowodzie. Interesującym i stosunkowo nowym rozwiązaniem jest interferometryczny system optyczny. W tym przypadku, badana ciecz umieszczana jest w szklanej kapilarze. Wiązka promieniowania laserowego, prostopadła do tej kapilary, przechodząc przez nią ulega załamaniu na granicy ośrodków tworząc interferometryczny obraz na matrycy CCD [3, 4]. Do określenia wartości współczynnika załamania cieczy wykorzystywane zostało również zjawisko sprzężenia czołowego lub bocznego światłowodów umieszczonych w badanej cieczy [5, 6]. Wiele dotychczasowych konstrukcji umożliwiających pomiar współczynnika załamania światła cieczy wymaga przygotowania próbki badanego medium oraz wykonywania pomiarów w ściśle określonych warunkach, przez co nie jest możliwy ciągły pomiar parametrów przepływającej cieczy. Szansę taką dają odpowiednio skonstruowane światłowody. Wykorzystanie zmian warunków prowadzenia światła w kapilarnej strukturze światłowodowej w środku której znajduje się badana ciecz stwarza możliwość ciągłego pomiaru parametrów tej cieczy. Jest to możliwe poprzez detekcję zmian energii modów rozprzestrzeniających się w płaszczu światłowodu kapilarnego.

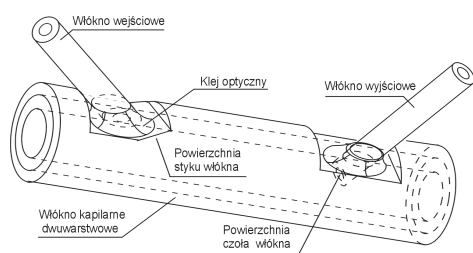
2. Idea pomiaru współczynnika załamania światła przy użyciu światłowodu kapilarnego

Struktura optyczna sensora składa się z dwuwarstwowego światłowodu kapilarnego wypełnionego mierzoną cieczą. Wewnętrzna warstwa kapilary charakteryzuje się najwyższą wartością współczynnika załamania światła. Ciecz wewnątrz kapilary tworzy obszar przez który promienie świetlne są transmitowane z wewnętrznej warstwy kapilary do światłowodu odbiorczego. Różnica współczynników załamania światła pomiędzy cieczą a materiałem kapilary wpływa na wartość sygnału wyjściowego. Zachodzące zjawisko można opisać za pomocą metody elementarnych strumieni świetlnych rozprzestrzeniających się w światłowodzie kapilarnym czujnika, wykorzystującej prawa Snella i Fresnela opisujące zjawiska załamania i odbicia promieni świetlnych na granicy dwóch ośrodków o różnych współczynnikach załamania światła [7].

3. Konstrukcja czujnika

Światłowodowy czujnik kapilarny wytworzony został poprzez przytwierdzenie włókna wejściowego i wyjściowego do szklanego światłowodu kapilarnego zgodnie z rys. 1.

Sygnal wejściowy jest wprowadzany do wewnętrznej warstwy kapilary, która posiada najwyższy współczynnik załamania światła. Promień świetlny w tego typu strukturze optycznej może propagować się w różnych obszarach sensora. Włókno odbiorcze jest umiejscowione w ten sposób, że czoło światłowodu znajduje się wewnątrz badanej cieczy. Sygnal wyjściowy jest wprost proporcjonalny do wielkości strumienia optycznego propagującego się wewnątrz kapilary. Przy małej różnicy współczynników załamania światła znaczna część wprowadzonej energii propaguje się poprzez badaną ciecz.



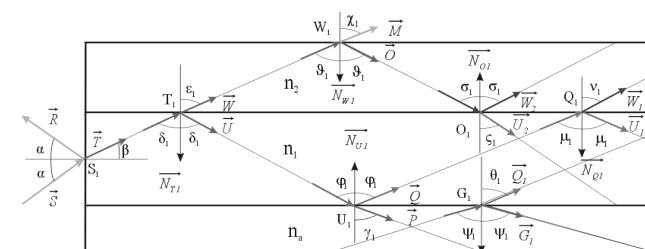
Rys. 1. Konstrukcja kapilarnego czujnika współczynnika załamania światła cieczy
Fig. 1. Construction of capillary waveguide sensor

Do budowy sensora wykorzystany został wytworzony przez autorów światłowodów kapilarny o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry czujnika kapilarnego
Tab. 1. Construction parameters of the capillary sensor

L.p.	Parametr	Symbol	Wartość
1	Współczynnik załamania światła rdzenia	n_1	1,524
2	Współczynnik załamania światła płaszczka	n_2	1,510
3	Promień otworu	a	400 μm
4	Promień rdzenia	b	1100 μm
5	Promień płaszczka	c	1300 μm
6	Współczynniki załamania światła rdzenia	n_1	1,524
7	Współczynniki załamania światła płaszczka	n_3	1,492
8	Średnica rdzenia	d_1, d_2	400 μm
9	Średnica płaszczka	d_3, d_4	630 μm
10	Kąt nachylenia światłowodu wejściowego względem osi kapilary	α_1	40°
11	Kąt nachylenia włókna wyjściowego względem osi kapilary	A_2	12°
12	Dystans pomiędzy światłowodem wejściowym i wyjściowym	L	50 mm

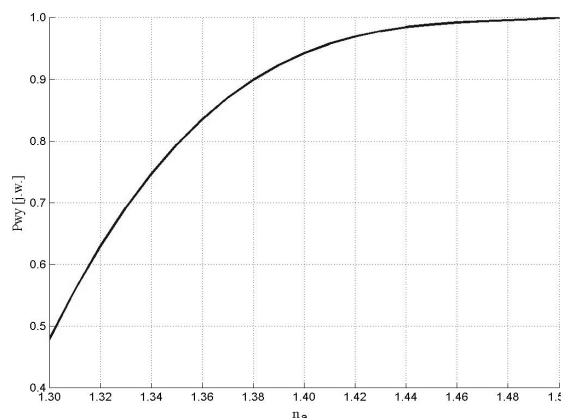
W celu analizy właściwości propagacyjnych struktury opracowano program w pakiecie obliczeniowym MATLAB 6.5, wyznaczający drogą iteracji wartości strumieni świetlnych w poszczególnych obszarach kapilary i w światłowodzie wyjściowym (zgodnie z rys. 2). Wyznaczona numerycznie charakterystyka czujnika przedstawiona została na rys. 3.



Rys. 2. Propagacja strumienia świetlnego wewnątrz światłowodu kapilarnego
Fig. 2. The transfer of luminous flux through capillary waveguide

Wartość współczynnika załamania światła cieczy n_c określana jest w sposób pośredni, na podstawie stosunku mierzonej wartości mocy optycznej wypromieniowanej z światłowodu odbiorczego czujnika P_{wy} , do wartości mocy optycznej wprowadzonej do światłowodu wejściowego P_{we} . Analizując źródła niepewności towarzyszące wyznaczeniu wartości współczynnika załamania światła cieczy należy uwzględnić:

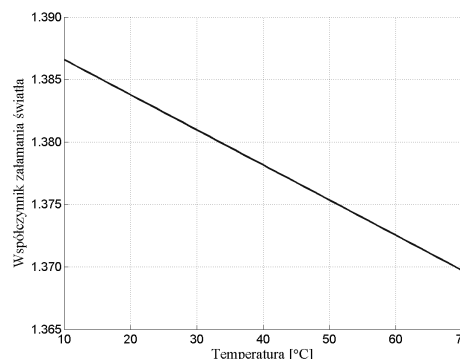
- fakt zmiany mocy optycznej we włóknie odbiorczym przy zmianie współczynnika załamania światła cieczy wypełniającej strefę pomiarową sensora,
- zastosowaną metodę pomiarową i parametry użytych przyrządów pomiarowych.



Rys. 3. Zależność mocy wyjściowej czujnika od wartości współczynnika załamania światła cieczy
Fig. 3. Dependence of the output power on the liquid refractive index.

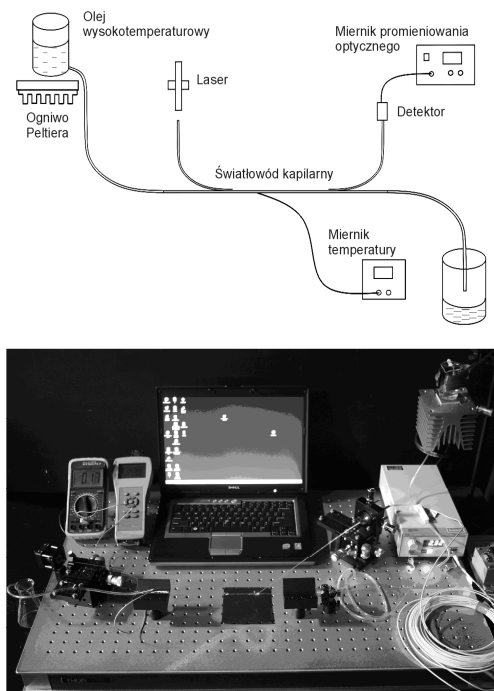
4. Pomiar temperatury oleju przy użyciu czujnika kapilarnego

Temperatura badanej cieczy może być pośrednio określona poprzez pomiar wartości współczynnika załamania światła cieczy [8]. Do pomiaru temperatury oleju konieczna jest znajomość współczynnika załamania światła oleju w zakresie mierzonych temperatur. Zależność wartości współczynnika załamania światła oleju w funkcji temperatury jest prezentowana w literaturze [9]. W eksperymencie wykorzystany został roztwór oleju wysokotemperaturowego OKS352 [10] rozcieńczony benzyną ekstrakcyjną w proporcji objętościowej odpowiednio 2:1. Do wyznaczenia tej zależności wykorzystany został refraktometr Abbego RL 13. Posiada on możliwość termostatowania pryzmatów pomiarowych, a więc również temperatury cieczy umieszczonej pomiędzy pryzmatami. Wyposażony jest on w termometr mierzący temperaturę cieczy termostatującej w zakresie temperatur 0 – 75 °C. Wielkość podziałki termometru wynosi 0,5 °C. Zmierzona zależność współczynnika załamania światła oleju w funkcji temperatury przedstawiona została na rys. 4.



Rys. 4. Zależność współczynnika załamania światła użytego roztworu w funkcji temperatury
Fig. 4. Dependence of the refractive index on the temperature

Ze względu na minimalny efekt gazowania w założonym zakresie pomiaru temperatury do pomiarów wykorzystany został olej wysokotemperaturowy o długotrwałej temperaturze pracy 210 °C. W zakresie 10 – 70 °C wartość współczynnika załamania światła maleje liniowo w przedziale od 1,387 do 1,370. W trakcie pomiarów olej przepływał przez otwór kapilary. Schemat systemu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 5. Źródłem mierzonego promieniowania był laser półprzewodnikowy o długości fali $\lambda = 635$ nm (Thorlabs S1FC635). Układ regulacji temperatury oleju składał się z ogniwa Peltiera TEC1-12706 o mocy maksymalnej 53,3 W, stabilizowanego źródła zasilania dużej mocy oraz układu sterowania TC-36-25-RS232. Układ ten zapewnia stabilizację temperatury w zakresie od 10 °C do 70 °C. Do pomiaru temperatury użyty został multimetr cyfrowy DT9207A umożliwiający, przy podłączeniu termopary Cr-Ni, pomiar temperatury w zakresie pomiarowym od -50 °C do 204 °C z rozdzielczością ± 1 °C. W trakcie pomiarów źródło promieniowania, uchwyty włókien światłowodowych i detektor umieszczone były na stole optycznym (rys. 5).

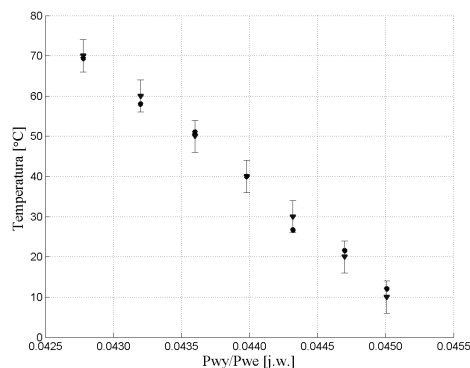


Rys. 5. Układ służący do pomiaru temperatury oleju: a) schemat, b) fotografia
Fig. 5. The measurement system: a) scheme, b) photo

Część pomiarowa kapilary znajdowała się w izolowanym termicznie zbiorniku tak, aby system nie był wrażliwy na szybkie fluktuacje temperatury otoczenia oraz chroniąc ją przed zewnętrznym promieniowaniem optycznym mogącym zakłócić warunki pomiaru. Sygnał z włókna odbiorczego był mierzony przy pomocy miernika mocy optycznej, w skład którego wchodzi głowica pomiarowa S120B i konsola pomiarowa PM100. Eksperymenty były przeprowadzone w zacienionym, klimatyzowanym pomieszczeniu o temperaturze 20 °C. Zbiornik z olejem umieszczony był powyżej kapilary pomiarowej zapewniając w ten sposób przepływ roztworu oleju w trakcie pomiarów. Wartość szybkości przepływu kontrolowana była przez regulowany zawór i była stała w trakcie eksperymentów. Temperatura oleju była mierzona przy użyciu multimetru z termoparą Cr-Ni.

Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów (rys. 6) można przyjąć za wartości odniesienia. Wszystkie one mieszczą się w przedziałach wyznaczonych przez niepewność standardową pomiaru (± 4 °C), co jest potwierdzeniem poprawności pomiarów wykonanych przy użyciu zaprojektowanego czujnika. Głównymi zaletami tego czujnika jest możliwość ciągłego monitorowania temperatury cieczy przepływającej wewnątrz kapilary oraz zapewnienie gal-

wanicznej izolacji elektrycznej. Dlatego, może on znaleźć zastosowanie w przemyśle lub energetyce.



Rys. 6. Wyniki pomiarów temperatury oleju: ▼ przy użyciu czujnika kapilarnego, ● przy użyciu miernika temperatury
Fig. 6. Temperature measurement results: ▼ with use of the capillary sensor, ● with use of the temperature meter

5. Wnioski

Niniejsze opracowanie przedstawia ideę i oryginalną realizację pomiaru współczynnika załamania cieczy przy wykorzystaniu, wytworzonego przez autorów, dwuwarstwowego światłowodu kapilarnego. Zaprezentowana funkcja odpowiedzi czujnika została wyznaczona numerycznie. Na podstawie charakterystyki czujnika i wartości sygnału wyjściowego można określić współczynnik załamania cieczy transmitowanej wewnątrz kapilary. Aplikację zaprojektowanego i wykonanego czujnika przedstawiono na przykładzie sensora temperatury oleju opartego o pomiar jego współczynnika załamania światła. Głównymi zaletami zaprezentowanego czujnika są szybkość wykonywania pomiarów, zapewnienie izolacji galwanicznej z mierzoną cieczą oraz możliwość ciągłego monitorowania cieczy przepływającej wewnątrz kapilary.

Praca została wykonana w ramach prac badawczych Politechniki Białostockiej S/WE/2/08 i W/WE/13/06.

6. Literatura

- [1] Martelli C., Canning J., Kristensen M., Groothoff N.: Refractive index measurement within a photonic crystal fibre based on short wavelength diffraction. *Sensors* No. 7, 2007, s. 2492-2498.
- [2] Banerjee A. i inni: Fiber optic sensing of liquid refractive index. *Sensors and Actuators B* 123, 2007, s. 594-605.
- [3] Schniot Sornsen H., Pranov Hlarsen N. B., Bornhop D. J., Andersen P. E.: Absolute refractive index determination by microinterferometric backscatter detection *Analytical Chemistry* Vol. 75 No. 8, 2003.
- [4] Ghandoor H., Hegazi E., Nasser I., Behery G. M.: Measuring the refractive index of crude oil using a capillary tube interferometer. *Optics & Laser Technology* 35, 2003, s. 361-367.
- [5] Docchio F., Corini S., Perini M., Kasana R. S.: A simple and reliable system for measuring the refractive index of liquids using a position-sensitive detector. *IEEE* Vol. 44, No. 1, 1995.
- [6] Beltz M., Dress P., Klein K. F., Boyle W. J., Franke H., Grattan K. T. V.: Liquid core waveguide with optic coupling for remote pollution monitoring in the deep ultraviolet. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 37 No. 12, 1998.
- [7] Miluski P., Dorosz D.: The 2D ray model of light transmission through double layer capillary waveguide. *Proc. SPIE* 7124, 2008.
- [8] Miluski P., Dorosz D.: The temperature sensor based on capillary waveguide. *Proc. SPIE* 6937, 2007.
- [9] Lide D. R.: *Handbook of Chemistry and Physics*. 74th ed CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
- [10] <http://www.oks-india.com/user/pdf/OKS%20352.pdf>, 30.05.2009