

**Paweł KARASIŃSKI**

44-100 GLIWICE, UL. B. KRZYWOUSTEGO 2 (POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT FIZYKI)

**Zastosowanie sprzęgacza siatkowego do precyzyjnych pomiarów współczynnika załamania****dr inż. Paweł KARASIŃSKI**

Absolwent Wydziału Matematyczno-Fizycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach, 1986r.-fizyka techniczna. Jest adiunktem w Instytucie Fizyki. Przedmiotem zainteresowań w pracy naukowej jest projektowanie i technologia elementów oraz układów optyki zintegrowanej do zastosowań w planarnych czujnikach światłowodowych pracujących w oparciu o spektroskopię pola zanikającego. Jest autorem i współautorem ponad 100 publikacji naukowych.



e-mail: pawel.karasinski@polsl.pl

**Streszczenie**

Praca przedstawia zastosowanie wejściowego sprzęgacza siatkowego do wyznaczania współczynnika załamania cieczy. Sprzęgacze siatkowe o stałej 1000linii/mm na światłowodach planarnych SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> otrzymywanych metodą zanurzeniową (zol-żel) wytwarzano poprzez odciskanie reliefu siatki. W pracy przedstawione są wyniki badań eksperymentalnych i wyniki analizy teoretycznej struktury sensorowej.

**Słowa kluczowe:** współczynnik załamania, sprzęgacz siatkowy, zol-żel

**Grating coupler application for precise measurements of refractive index****Abstract**

The paper involves the application of input grating coupler for measurements of refractive index of the liquids. Surface relief grating with 1000 line/mm on planar SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> waveguides were fabricated by combination of a dip-coating method (sol-gel) with an embossing technique. The paper presents the results of experimental research on the produced grating couplers and the results of theoretical analysis of the sensor structure.

**Keywords:** refractive index, grating coupler, sol-gel.

**1. Wstęp**

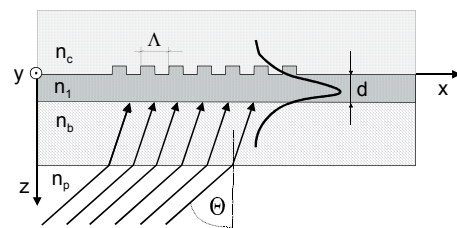
Pomiary współczynnika załamania są najczęściej realizowane w oparciu o prawo Snella, pomiar drogi optycznej w klasycznych interferometrach bądź z zastosowaniem Spektroskopii Fali Zanikającej (ang. *Evanescent Wave Spectroscopy*), która stanowi podstawę działania planarnych czujników światłowodowych [1]. Zmiana właściwości optycznych pokrycia w pobliżu warstwy falowodowej powoduje zmianę efektywnych współczynników prowadzonych modów. Mierzac efektywne współczynniki można wnioskować o zmianach współczynnika załamania pokrycia warstwy falowodowej. Pomiary te można realizować z zastosowaniem interferometrów bądź sprzęgaczy siatkowych [2]. Sprzęgacze siatkowe pozwalają mierzyć z dużą precyzją efektywne współczynniki załamania. W ten sposób mogą być wyznaczane bezwzględne wartości współczynników załamania pokrycia. Wysokie czułości pomiarowe, jakie można uzyskać z zastosowaniem sprzęgaczy siatkowych jak również względna łatwość pomiarów sprawiły, że ta tematyka badawcza jest rozwijana w licznych ośrodkach naukowych [2]-[8].

Przedstawiana praca dotyczy zastosowania wejściowego sprzęgacza siatkowego do precyzyjnych pomiarów współczynnika załamania cieczy. Stosunkowo duży okres

sprzęgaczy (1000nm) umożliwił wykorzystanie dwóch rzędów dyfrakcyjnych do pobudzenia struktury sensorowej. Pozwoliło to wyeliminować błędy ustawienia normalnej, a przez to znacznie podnieść precyzję otrzymywanych wyników. W pracy przedstawiane są eksperymentalne zależności kąta sprzężenia i efektywnych współczynników załamania od współczynnika załamania pokrycia. Na podstawie analizy teoretycznej i charakterystyk sprzężenia oszacowano progi detekcji zmian współczynnika załamania i niepewności pomiarowe.

**2. Struktura sensorowa**

Struktura sprzęgacza siatkowego jest układem periodycznych zaburzeń o okresie  $\Lambda$ , wytworzonych w światłowodzie planarnym. Schemat pobudzenia światłowodu planarnego od strony podłoża z zastosowaniem sprzęgacza siatkowego przedstawia rys.1. Sprzęgacz jest oświetlany pod kątem  $\Theta$



Rys.1 Schemat pobudzenia planarnej struktury światłowodowej z zastosowaniem sprzęgacza siatkowego

Fig.1 The diagram involving the excitation of the planar waveguide structure with the application of grating coupler

monochromatyczną wiązką światła o długości fali  $\lambda$ . Gdy kąt padania spełnia warunek:

$$\sin \theta_m = n_p^{-1} \cdot (N - m\lambda / \Lambda) \quad (1)$$

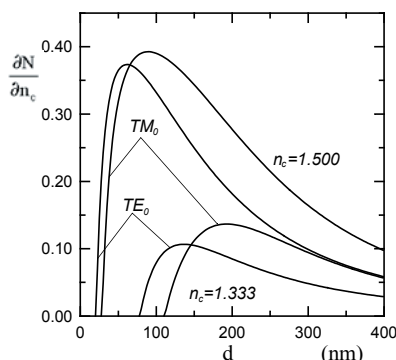
to w światłowodzie następuje wzbudzenie modu o efektywnym współczynniku załamania  $N$ . We wzorze (1)  $m$  jest rzędem dyfrakcyjnym a  $n_p$  jest współczynnikiem załamania ośrodka, w którym mierzony jest kąt  $\theta$ . Warstwy falowodowe SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> wytwarzano w technologii zol-żel na podłożach ze szkła sodowo-wapniowego ( $n_b=1.509$ ) metodą zanurzeniową (ang. *dip-coating*) [10], [11]. Po nałożeniu warstwy zolu odciskano w niej relief sprzęgacza siatkowego. Postępowano zgodnie z procedurami opisanymi w pracach [5], [6]. Po odcisnięciu wzoru siatki w warstwie zolu struktury wygrzewano. Ostatecznie współczynnik załamania i grubość warstw falowodowych w wytworzonych strukturach wynosiły odpowiednio;  $n_l=1.761$  i  $d=211$ nm. Takie parametry warstw falowodowych wykorzystano w analizie teoretycznej.

**3. Analiza teoretyczna**

Ze wzoru (1) wynika, że przy małych zmianach współczynnika załamania pokrycia  $\Delta n_c$ , zmiana kąta sprzężenia wynosi:

$$\Delta \theta_m = (n_p \cos \theta_m)^{-1} \cdot \Delta N \quad (2)$$

Równanie to stanowi podstawę sensorów ze sprzęgaczami siatkowymi [2]. Zmiana kąta sprzężenia  $\Delta\theta_m$  zależy od jego optymalnej wartości  $\theta_m$  w sytuacji początkowej oraz od zmian efektywnego współczynnika załamania  $\Delta N$ . Głównymi parametrami mającymi wpływ na kat sprzężenia  $\theta_m$ , przy ustalonej długości fali  $\lambda$  jest okres zaburzenia  $\Lambda$  i wykorzystywany rząd dyfrakcyjny  $m$ . Sprzęgaczom siatkowym o większych okresach  $\Lambda$  odpowiadają większe kąty sprzężenia dla poszczególnych rzędów dyfrakcyjnych. Wówczas danej zmianie  $\Delta N$  odpowiadają większe zmiany kąta sprzężenia  $\Delta\theta_m$  niż dla małych okresów  $\Lambda$ . Jednocześnie w sprzęgaczach siatkowych o większych okresach  $\Lambda$  można wykorzystywać dwa rzędy dyfrakcyjne do pobudzenia struktury sensorowej. Pozwala to wyeliminować błąd ustawienia normalnej.



Rys.2 Zależność czułości na zmianę współczynnika załamania pokrycia od grubości warstwy falowodowej.  $n_b=1.5087$ ,  $n_f=1.7610$ ,  $d=211\text{nm}$ ,  $\lambda=677\text{nm}$   
Fig.2 Dependences of sensitivity for refractive index changes on the waveguide film thickness.  $n_b=1.5087$ ,  $n_f=1.7610$ ,  $d=211\text{nm}$ ,  $\lambda=677\text{nm}$

Niewielkiej zmianie współczynnika załamania pokrycia  $\Delta n_c$  odpowiada zmiana efektywnego współczynnika załamania:

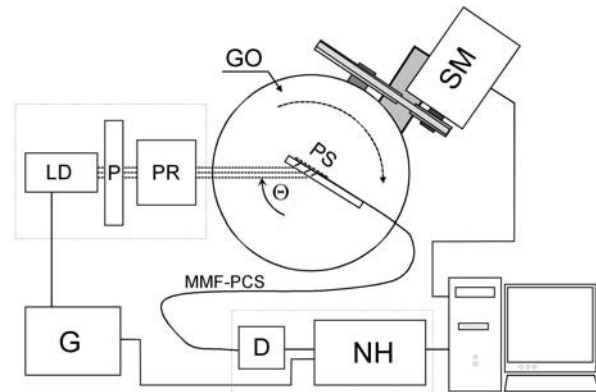
$$\Delta N = \left( \frac{\partial N}{\partial n_c} \right) \cdot \Delta n_c \quad (3)$$

gdzie  $\partial N / \partial n_c$  jest czułością homogeniczną. Czułość  $\partial N / \partial n_c$  zależy od współczynnika załamania  $n_l$  i grubości  $d$  warstwy falowodowej oraz od współczynników załamania podłoża  $n_b$  i pokrycia  $n_c$ . Na rys.2 pokazane są zależności czułości homogenicznej  $\partial N / \partial n_c$  od grubości warstwy falowodowej dla dwóch różnych wartości współczynnika załamania pokrycia  $n_c=1.333$  i  $n_c=1.500$ . Obliczenia wykonano dla długości fali  $\lambda=677\text{nm}$ . Czułość homogeniczna  $\partial N / \partial n_c$  osiąga maksymalne wartości dla grubości warstwy falowodowej nieco większych niż grubość odcięcia. Polaryzacji TM odpowiadają wyższe maksymalne czułości. Niemonotoniczne zależności czułości  $\partial N / \partial n_c$  od grubości  $d$  warstwy falowodowej występują wtedy, gdy współczynnik załamania pokrycia  $n_c$  w całym zakresie zmian jest mniejszy od współczynnika załamania podłoża ( $n_c < n_b$ ) [12]. W przeciwnym przypadku czułość homogeniczna wraz ze wzrostem grubości warstwy falowodowej maleje monotonicznie. Maksymalne czułości  $(\partial N / \partial n_c)_{max}$  dla różnych współczynników załamania pokrycia są osiągane przy różnych grubościach warstwy falowodowej. Oznacza to, że aby uzyskać maksymalną czułość  $(\partial N / \partial n_c)$  w określonym zakresie współczynnika załamania, należy stosować warstwy falowodowe o optymalnej grubości. Wpływ parametrów warstwy falowodowej na czułość  $(\partial N / \partial n_c)$  jest szerzej dyskutowany w pracy [12].

#### 4. Układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego przedstawia rys.3. Badane struktury PS umieszczano na stoliku goniometrycznym GO, który napędzany był silnikiem krokowym. Obrót GO mierzono z dokładnością 1.8 sekundy kątowej. Sprzęgacz siatkowy

oświetlany był od strony podłoża. Jako źródła światła używano zasilanej z generatora G diody laserowej LD o długości fali  $\lambda=677\text{nm}$ . Odpowiedni stan polaryzacji wiązki oświetlającej



Rys.3 Układu pomiarowego

PS-badana struktura, GO-goniometr, SM- silnik krokowy, LD-diody laserowa, P- polaryzator, RP- rotator polaryzacji, G- generator, D- detektor, NH- nanowoltomierz homodynowy.

Fig.3 Measurement setup.

PS-planar structure, GO-goniometer, SM-stepping motor, LD-laser diode, P-polarizer, RP-polarizer rotator, G-generator, D-detector, NH-homodyne nanovoltmeter.

ustalano z zastosowaniem polaryzatora P i rotatora RP. Kierunek normalnej ustalano kierując wiązkę światła odbitego od struktury z powrotem do diody laserowej LD. Dla zwiększenia dokładności ustawienia normalnej, zwiększono drogę wiązki poprzez zastosowanie dodatkowych zwierciadeł, które na rysunku nie są przedstawione. Wydłużenie drogi promienia do kilku metrów daje niepewność wyznaczenia normalnej równą  $0.05^0$ . Sygnał optyczny z krawędzi struktury odprowadzany był do detektora D wielomodowym światłowodem włóknistym typu PCS (200/300 $\mu\text{m}$ ). Detekcję sygnału modulowanego realizowano z zastosowaniem nanowoltomierza homodynowego NH. Widma modowe rejestrowano w komputerze z zastosowaniem karty pomiarowej.

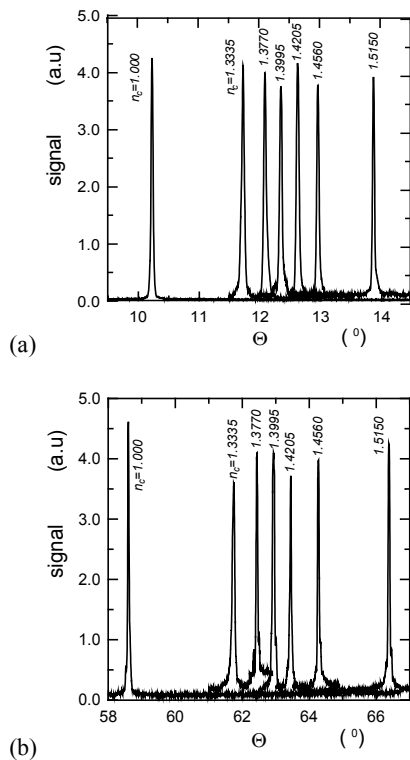
#### 5. Wyniki badań

Charakterystyki sprzężenia, jakie zarejestrowano dla różnych współczynników załamania  $n_c$  cieczy pokrywającej strukturę przedstawia rys.4. Na rys.4.a pokazano charakterystyki sprzężenia dla drugiego rzędu dyfrakcyjnego ( $m=2$ ), a na rys.4.b pokazano charakterystyki odpowiadające pierwszemu rzędowi dyfrakcyjnemu ( $m=1$ ). Obok pików sprzężenia zaznaczono odpowiadające im wartości  $n_c$ , które wyznaczono refraktometrem Abbego (589.6nm). Stosowanymi cieczami były: woda, wodne roztwory gliceryny i olejek cedrowy. Dla obu rzędów dyfrakcyjnych widoczne są przesunięcia pików sprzężenia w kierunku wyższych kątów wraz ze wzrostem  $n_c$ . Wzrost współczynnika załamania pokrycia  $n_c$  skutkuje wzrostem efektywnych współczynników załamania prowadzonych w strukturze modów, co jak wynika z wzoru (1) powoduje wzrost kąta sprzężenia  $\theta_m$ . Szerokości pików sprzężenia dla pierwszego rzędu dyfrakcyjnego ( $m=1$ ) są większe niż dla drugiego rzędu dyfrakcyjnego. Obserwowano niewielkie poszerzenie pików sprzężenia wraz ze wzrostem  $n_c$ .

Kąty sprzężenia  $\theta_m$  mierzone są względem normalnej do powierzchni struktury sensorowej. Zatem określenie kierunku normalnej jest krytyczne dla dokładności ich wyznaczenia. Ma to zasadniczy wpływ na dokładność wyznaczenia współczynników załamania pokrycia. W przedstawianych tutaj badaniach stosowano pobudzenie struktury rzędem dyfrakcyjnym  $m=1$  i  $m=2$ . Wstępnie, przed pomiarem strukturę ustawiano prostopadle do kierunku padania wiązki oświetlającej i następnie, przy ciągłej

zmianie kąta oświetlenia struktury rejestrowano widma modowe. Z widm tych wyznaczano kąty sprzężenia  $\tilde{\theta}_1$  i  $\tilde{\theta}_2$ . Jeśli w pozycji wyjściowej kierunek oświetlenia struktury różni się od rzeczywistego kierunku normalnej o  $(-\Delta\theta)$ , to również wyznaczone kąty  $\tilde{\theta}_1$  i  $\tilde{\theta}_2$  różnią się od wartości rzeczywistych o  $(-\Delta\theta)$ . Natomiast różnica tych kątów jest równa różnicy kątów rzeczywistych. Na podstawie (1) otrzymuje się:

$$\Delta\theta = \frac{\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2}{2} + \arcsin \left( \frac{\lambda}{2n_p \Lambda \sin \left( \frac{\tilde{\theta}_1 - \tilde{\theta}_2}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

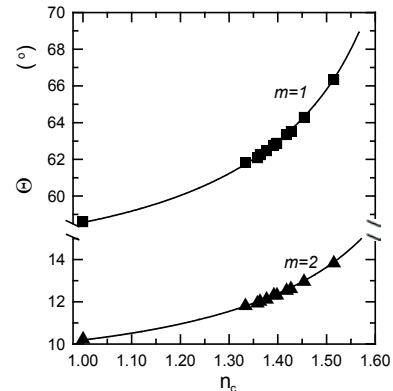


Rys.4 Wpływ współczynnika załamania pokrycia na położenie charakterystyk sprzężenia odpowiednio dla: (a) drugiego rzędu dyfrakcyjnego  $m=2$ , (b) pierwszego rzędu dyfrakcyjnego  $m=1$ . Polaryzacja TM.  
Fig.4 Incoupling characteristics of planar sensor structure for selected refractive indexes of the cover. (a)  $m=2$ , (b)  $m=1$ . TM polarization

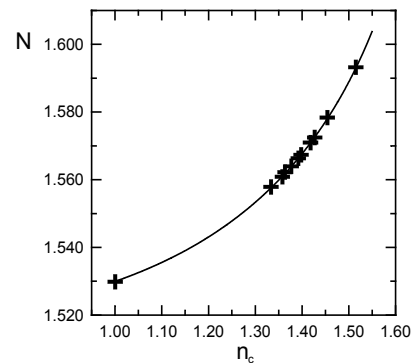
Stosując przedstawioną tutaj procedurę, na podstawie zmierzonych kątów sprzężenia  $\tilde{\theta}_1$  i  $\tilde{\theta}_2$  wyznaczono odpowiadające im wartości rzeczywiste  $\theta_1$  i  $\theta_2$ . Kąty  $\tilde{\theta}_1$  i  $\tilde{\theta}_2$  można wyznaczać z aproksymacji pików sprzężenia z dokładnością lepszą niż  $1 \cdot 10^{-6}$  rad. Jednakże tutaj przyjmowane będzie, że niepewność wyznaczenia kątów sprzężenia wynosi  $\delta\theta = 8.8 \cdot 10^{-6}$  rad, co jest równe kątowi obrotu goniometru, gdy silnik krokowy wykona 1 krok. Gdy kierunek normalnej wyznaczany jest tradycyjnym sposobem, kierując wiązkę z powrotem na źródło, to niepewność wyznaczenia kątów sprzężenia jest większa o trzy rzędy wielkości. Na rys.4 we wszystkich charakterystykach uwzględniono poprawki  $\Delta\theta$ .

Na rys.5 pokazano zależności kątów sprzężenia  $\Theta$  od współczynnika załamania pokrycia  $n_c$  dla pierwszego i drugiego rzędu dyfrakcyjnego, dla modu  $TM_0$ . Z porównania zależności  $\Theta(n_c)$  dla obu rzędów dyfrakcyjnych widać, że dla  $m=1$  jest silniejsza zależność kąta sprzężenia od współczynnika załamania pokrycia. Bardziej szczegółowa analiza pokazuje, że pochodna

$d\Theta/dn_c$  dla pierwszego rzędu dyfrakcyjnego ( $m=1$ ) w całym zakresie zmian współczynnika załamania pokrycia  $n_c$  jest praktycznie dwukrotnie większa niż dla drugiego rzędu dyfrakcyjnego ( $m=2$ ).



Rys.5 Zależności kątów sprzężenia od współczynnika załamania pokrycia  
Fig.5 Dependences of coupling angles on the refractive index of the cover



Rys.6 Zależność efektywnego współczynnika załamania od współczynnika załamania pokrycia  
Fig.6 Dependence of effective index on the refractive index of the cover

Rys.6 przedstawia zależność efektywnego współczynnika  $N$  od współczynnika załamania pokrycia dla modu  $TM_0$ . Krzyżami zaznaczono punkty, które wyliczono z zależności (1), wstawiając do niej wartości kątów z rys.5. Linia ciągła przedstawia zależność wyliczoną teoretycznie. Dla określenia parametrów warstwy falowodowej, których użyto do obliczeń, posłużono się charakterystykami sprzężenia dla  $n_c=1.0003$ .

Dla określenia minimalnych zmian współczynnika załamania, jakie można wykrywać z wykorzystaniem przedstawionej struktury sensorowej zastosowana została metoda Tiefenthaler'a i Lukosz'a [3]. Piki sprzężenia w postaci unormowanej dla modu  $TM_0$  i  $m=1$  miały szerokości połowkowe (FWHM)  $\delta\bar{N} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ , co w dziedzinie kątów odpowiada  $\approx 0.04^\circ$ . Jest to mała wartość i świadczy o dobrych parametrach sprzęgacza siatkowego oraz niskiej tłumienności światłowodu. Przyjmując, że zmiany sygnału można mierzyć z rozdzielczością  $10^{-3}$  maksymalnego sygnału, to minimalne zmiany efektywnego współczynnika załamania, jakie można mierzyć wynoszą  $\Delta N_{min} = 4 \cdot 10^{-7}$ . Struktury sensorowe z warstwami falowodowymi o optymalnych grubościach (rys.2), pozwalają mierzyć minimalne zmiany współczynnika załamania pokrycia  $(\Delta n_c)_{min} = (\partial N / \partial n_c)^{-1} \cdot \Delta N_{min}$ , wynoszące odpowiednio:  $(\Delta n_c)_{min} = 1.0 \cdot 10^{-6}$  gdy  $n_c \approx 1.500$  i  $(\Delta n_c)_{min} = 2.9 \cdot 10^{-6}$  gdy  $n_c \approx 1.333$ . Dla przedstawianej tutaj struktury próg detekcji zmiany współczynnika załamania wynosi  $(\Delta n_c)_{min} = 3.0 \cdot 10^{-6}$  gdy  $n_c \approx 1.333$ . Wartość ta jest bardzo bliska tej, która odpowiada optymalnej grubości warstwy falowodowej. Dla współczynników załamania  $n_c \approx 1.500$  minimalna zmiana współczynnika załamania jaką można zmierzyć z wykorzystaniem przedstawionej tutaj struktury wynosi  $(\Delta n_c)_{min} = 1.5 \cdot 10^{-6}$ .



Minimalne zmiany efektywnego współczynnika załamania, jakie mogą być mierzone w wykorzystywanym układzie pomiarowym (rys.3) wynikają z rozdzielczości kątowej układu, która wynosi  $\delta\theta_{min}=8.8 \cdot 10^{-6}$  rad. Stąd wykorzystując (2) otrzymuje się odpowiednio  $\Delta N_{min}=4.2 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\Delta N_{min}=3.6 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . Na podstawie (3) minimalne zmiany współczynnika załamania pokrycia, jakie można zmierzyć w przedstawionym układzie pomiarowym wynoszą odpowiednio:  $(\Delta n_c)_{min}=1.4 \cdot 10^{-5}$  gdy  $n_c \approx 1.500$  i  $(\Delta n_c)_{min}=3.2 \cdot 10^{-5}$  gdy  $n_c \approx 1.333$ . Widać, że wartości te są praktycznie o rząd większe od tych, jakie otrzymano wcześniej na podstawie unormowanej charakterystyki sprzężenia.

Bezwzględne wartości współczynnika załamania  $n_c$  wyznaczone są z zależności  $N=N(n_c)$  (rys.6). Niepewność pomiaru współczynnika załamania  $n_c$  jest zdeterminowana przez niepewność pomiaru efektywnego współczynnika załamania. Efektywny współczynnik załamania określa wyrażenie:

$$N = n_p \cdot \sin \theta_1 + m\lambda / \Lambda \quad (5)$$

Każda z wielkości występujących tutaj jest źródłem niepewności pomiaru efektywnego współczynnika załamania. Z wyrażenia tego widać, że dla pierwszego rzędu dyfrakcyjnego ( $m=1$ ) otrzymuje się mniejszą niepewność  $\delta N$  pomiaru efektywnych współczynników załamania niż dla rzędu drugiego ( $m=2$ ). Poniżej przedstawiany jest wpływ poszczególnych wielkości na niepewność pomiaru efektywnego współczynnika załamania, gdy wykorzystywany jest pierwszy rząd dyfrakcyjny  $m=1$ .

**Kąt sprzężenia**  $\theta_1$  jest głównym źródłem niepewności efektywnego współczynnika załamania. Dla danego piku sprzężenia, położenie jego maksimum można określać z aproksymacji przebiegiem wielomianowym z niepewnością rzędu  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  rad. Jednakże tutaj jako niepewność kąta optymalnego sprzężenia przyjmowana jest wartość  $8.8 \cdot 10^{-6}$  rad, co odpowiada zmianie kąta, gdy silnik krokowy wykona 1 krok. Stąd wynika, że efektem niepewności określenia kąta optymalnego sprzężenia jest niepewność efektywnego współczynnika załamania  $\delta N=4.15 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\delta N=3.58 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . **Współczynnik załamania powietrza**  $n_p$  można wyznaczać z empirycznego wzoru Edlen'a. Kontrolując temperaturę, ciśnienie i parcjalne ciśnienie wody, można wyznaczyć współczynnik załamania powietrza z dokładnością mniejszą niż  $2 \cdot 10^{-7}$  [13]. Daje to niepewność efektywnego współczynnika załamania  $\delta N=1.77 \cdot 10^{-7}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\delta N=1.83 \cdot 10^{-7}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . **Długość fali**  $\lambda$  zależy od współczynnika załamania powietrza  $n_p$ . Niepewność pomiaru efektywnego współczynnika, której źródłem jest niepewność określenia długości fali wynosi  $\delta N=1.36 \cdot 10^{-7}$ .

**Okres sprzęgacza** jest określony z dokładnością  $0.001$  nm. Daje to niepewność efektywnego współczynnika  $\delta N=6.77 \cdot 10^{-7}$ . Ostatecznie niepewność pomiaru efektywnych współczynników załamania wynosi  $\delta N=5.2 \cdot 10^{-6}$  dla współczynnika załamania  $n_c \approx 1.333$  i  $\delta N=4.6 \cdot 10^{-6}$  dla współczynnika załamania  $n_c \approx 1.500$ .

Współczynnik załamania i grubość warstwy falowodowej struktury sensorowej są wyznaczone z efektywnych współczynników załamania, gdy pokryciem jest powietrze. Wyliczona niepewność pomiaru efektywnych współczynników dla tego przypadku ( $n_c=1.0003$ ) wynosi  $\delta N=5.7 \cdot 10^{-6}$ . Wykorzystano to do wyznaczenia niepewności charakterystyki  $N(n_c)$ . W tym celu dla różnych kombinacji efektywnych współczynników załamania  $N_{TE} \pm \delta N$  i  $N_{TM} \pm \delta N$  wyznaczono parametry warstwy falowodowej a następnie charakterystyki  $N(n_c)$ . Skrajne z otrzymanych charakterystyk określają niepewności charakterystyki  $N(n_c)$ . Uwzględniając niepewność pomiaru efektywnych współczynników załamania i niepewność charakterystyki  $N(n_c)$  wyznaczone zostały niepewności pomiaru bezwzględnych wartości współczynnika załamania cieczy pokrywającej strukturę sensorową. Niepewność pomiaru współczynnika załamania pokrycia w przedstawionym tutaj układzie pomiarowym wynosi odpowiednio:  $\delta n_c=1 \cdot 10^{-4}$  dla

$n_c \approx 1.333$  i  $\delta n_c=5 \cdot 10^{-5}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . Handlowo dostępne refraktometry Abbego oferują niepewności pomiarowe, co najwyżej  $5 \cdot 10^{-4}$ . Widać zatem, że przedstawiona tutaj metoda pomiaru bezwzględnych wartości współczynnika załamania oferuje znacznie większą precyzję pomiaru. Ponieważ dla większości cieczy współczynniki termooptyczne  $\partial n / \partial T$  są rzędu  $\approx 10^{-4} \text{K}^{-1}$ , to utrzymanie takiej precyzji pomiarów wymaga stabilizacji temperatury na poziomie  $\delta T \approx 0.1 \text{K}$ .

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zastosowanie wejściowego sprzęgacza siatkowego do wyznaczania współczynnika załamania cieczy. Z zastosowaniem przedstawionych struktur sensorowych i układu pomiarowego o rozdzielczości kątowej  $8.8 \cdot 10^{-6}$  rad, można mierzyć minimalne zmiany efektywnego współczynnika załamania, które wynoszą odpowiednio  $\Delta N_{min}=4.2 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\Delta N_{min}=3.6 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . Natomiast minimalne zmiany współczynnika załamania cieczy, jakie można zmierzyć wynoszą odpowiednio:  $(\Delta n_c)_{min}=3.2 \cdot 10^{-5}$  gdy  $n_c \approx 1.333$  i  $(\Delta n_c)_{min}=1.4 \cdot 10^{-5}$  gdy  $n_c \approx 1.500$ . W pracy przeanalizowano i określono wpływ poszczególnych czynników na niepewność pomiaru efektywnych współczynników załamania i współczynników załamania pokrycia. Niepewność pomiaru efektywnych współczynników załamania wynosi  $\delta N=5.2 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\delta N=4.6 \cdot 10^{-6}$  dla  $n_c \approx 1.500$ . Natomiast niepewność pomiaru współczynnika załamania pokrycia w przedstawionym układzie pomiarowym wynosi odpowiednio:  $\delta n_c=1 \cdot 10^{-4}$  dla  $n_c \approx 1.333$  i  $\delta n_c=5 \cdot 10^{-5}$  dla  $n_c \approx 1.500$ .

Praca finansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2006-2009, w ramach projektu badawczego N515 057 31/2432.

## 7. Literatura

- [1] G.Boisdé, A.Harmer, „Chemical and biochemical sensing with optical fibers and waveguides”, Artech House, Boston•London, 1996
- [2] W.Lukosz, „Integrated optical chemical and direct biochemical sensors”, *Sensors Actuators*, B 29 (1995) 37-50
- [3] K. Tiefenthaler, W.Lukosz, „Sensitivity of grating couplers as integrated-optical chemical sensors”, *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol.6, No.2 (1989) 209-220
- [4] Ph.M. Nellen, W.Lukosz, „Integrated input grating coupler as chemo- and immunosensors”, *Sensors Actuators B*, 1 (1990) 592-596
- [5] W.Lukosz, K.Tiefenthaler, „Embossing technique for fabricating integrated optical components in hard inorganic waveguiding materials”, *Optics Letters*, Vol.8, No.10 (1983) 537-539
- [6] K.Heuberger, W.Lukosz, „Embossing technique for fabricating surface relief gratings on hard oxide waveguides”, *Appl. Opt.*, Vol.25, No.9 (1986) 1499-1504
- [7] R.E.Kunz, J.Dübendorfer, R.H.Morf, „Finite grating depth effects for integrated optical sensors with high sensitivity”, *Bios. Bioelectronics* Vol.11, No.6/7 (1996) 653-667
- [8] M.Wiki, H.Gao, M.Juvet, R.E.Kunz, „Compact integrated optical sensor system”, *Biosensors Bioelectronics*, Vol.16 (2001) 37-45
- [9] C.J.Brinker, G.W.Scherer, „Sol-gel science”, Academic Press, Inc. San Diego (1990)
- [10] P. Karasiński, „Dielectric layers SiO<sub>2</sub>: TiO<sub>2</sub> produced using the sol-gel technology for the application in planar sensors”, *Proc. SPIE*, Vol. 5576 (2004) 176-180
- [11] P. Karasiński, „Sol-gel derived optical waveguide films for planar sensors with phase modulation”, *Opt. Appl.* Vol. 34, No. 4 (2004) 467-475
- [12] P.Karasiński „Sensor properties of planar waveguide structures with grating couplers”, złożony w *Opto-Electronics Review*
- [13] R.B.S. Neto, J.P.R.F. de Mendonça, B.Lesche, „Determination of absolute values of refractive index of liquids using an interferometric method”, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, Vol.17, No.2 (2004) 74-79