

## Struktury optyki zintegrowanej do zastosowań w sensorach biochemicznych

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono podstawy spektroskopii pola zanikającego i struktury optyki zintegrowanej do zastosowań w sensorach biochemicznych. Struktury te wytwarzane są metodą zol-żel. Przedstawiony jest sprzęgacz siatkowy, paskowe światłowody zębrowe i sprzęgacz kierunkowy.

**Abstract.** In the paper are presented fundamentals of the evanescent field spectroscopy and integrated optic structures for an application in biochemical sensors. These structures are fabricated via sol-gel route. The grating couplers, rib waveguides and directional couplers are presented. (*Integrated optic structures for applications in biochemical sensors*).

**Słowa kluczowe:** zol-żel, światłowód planarny, spektroskopia pola zanikającego, immunosensor.

**Keywords:** sol-gel, optical planar waveguide, evanescent field spectroscopy, immunosensor.

doi:10.12915/pe.2014.05.23

### Wstęp

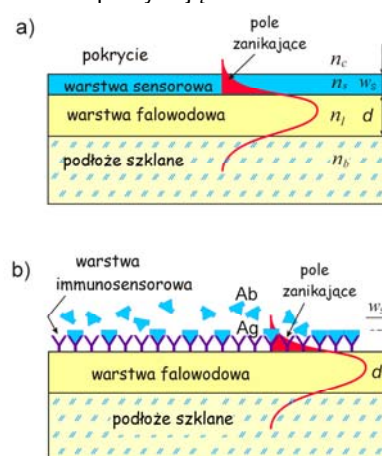
Optyczne metody pomiarowe charakteryzują się wysokimi czułościami i w wielu zastosowaniach mogą uchodzić za bezkonkurencyjne. Pojawienie się światłowodów otworzyło nowe możliwości w zakresie realizacji czujników różnych wielkości fizycznych, chemicznych bądź biochemicznych. Światłowód w czujniku może spełniać rolę jedynie elementu transmitującego sygnał optyczny ze źródła światła do struktury sensorowej a następnie ze struktury sensorowej do detektora lub też być jednocześnie zasadniczym elementem struktury sensorowej. W strukturze sensorowej obserwablą (wielkość mierzona, analit) oddziałuje na prowadzoną falę świetlną i dokonuje modulacji jednego z jej parametrów (amplituda, faza, polaryzacja). Struktury sensorowe światłowodowych czujników chemicznych i biochemicznych mogą być budowane z użyciem światłowodów włóknistych lub planarnych [1]. Planarne struktury sensorowe mają wiele zalet, takich jak: możliwość optymalizacji ich właściwości optycznych i geometrycznych w szerokim zakresie, możliwość masowego wytwarzania struktur o powtarzalnych parametrach, odporność mechaniczna. Planarne struktury immunosensorowe mogą być wytwarzane w postaci chipów do jednorazowych zastosowań. W planarnych czujnikach chemicznych bądź biochemicznych oddziaływanie obserwablą na prowadzone w strukturze mody zachodzi za pośrednictwem warstwy sensorowej, która jest penetrowana przez ich pola zanikające. Skutkiem zmiany poziomu obserwablą w pokryciu struktury sensorowej są zmiany parametrów warstwy sensorowej a następnie parametrów prowadzonych modów. Ta technika pomiarowa zaproponowana została przez Midwinter'a [2] i nosi nazwę spektroskopii pola zanikającego. Zmiana części urojonej współczynnika załamania warstwy sensorowej (współczynnika ekstynkcji) powoduje zmiany amplitud prowadzonych modów [4] a zmiany części rzeczywistej bądź zmiany grubości warstwy sensorowej powodują zmiany efektywnych współczynników załamania [3,5,6]. Pomiar zmian efektywnych współczynników załamania wymagają zastosowania sprzęgaczy siatkowych bądź interferometrów planarnych [3]. Struktury takie wytwarzane są z użyciem światłowodów jednodomowych.

W artykule opisano opracowane przez autora i nadal rozwijane struktury płaskich światłowodów planarnych ze sprzęgaczami siatkowymi [5,6] oraz światłowody i struktury paskowe przeznaczone do zastosowań w sensorach biochemicznych [7,8]. Struktury te wytwarzane są metodą zol-żel. Przedstawiano wyniki analizy teoretycznej i badań

eksperymentalnych struktur sensorowych oraz perspektywy zastosowań tych struktur. Szczególną uwagę poświęcono strukturom sensorowym ze sprzęgaczami siatkowymi.

### Planarna struktura sensorowa

Planarne struktury sensorowe pracujące z wykorzystaniem spektroskopii pola zanikającego są strukturami wielowarstwowymi, zbudowanymi z podłoża optycznego, z warstwy falowodowej oraz z warstwy sensorowej. Schemat takiej struktury sensorowej jest przedstawiony na rysunku 1. Mogą być wyróżnione dwa rodzaje warstw sensorowych: (1) jednorodne warstwy sensorowe (rys.1a), których współczynnik załamania lub grubość zmieniają się na skutek wnikania do nich cząsteczek analitu oraz (2) warstwy monocząsteczkowe, wykazujące silne powinowactwo reagentów chemicznych. Jednorodne warstwy sensorowe są stosowane w czujnikach chemicznych a ich grubości są na ogół mniejsze niż głębokości wnikania pola zanikającego do pokrycia światłowodu. W czujnikach refraktometrycznych warstwą sensorową jest ciecz pokrywająca światłowód.



Rys.1. Schemat struktury sensorowej a) z jednorodną warstwą sensorową, b) z warstwą immunosensorową.

Monocząsteczkowa warstwa immunosensorowa, zawierająca antygeny (Ag) wiąże molekuly przeciwciał (Ab), w wyniku czego następuje przyrost jej grubości i zmiana współczynnika załamania (rys.1b). Grubości warstw immunosensorowych są na poziomie nanometrowym.

Warstwa sensorowa jest penetrowana przez pola zanikające modów propagujących się w strukturze. Zmiany parametrów warstwy sensorowej powodują w ten sposób

zmiany ich efektywnych współczynników załamania. Współczynniki załamania składowych warstw struktury sensorowej (podłoża  $n_b$ , warstwy falowodowej  $n_f$ , warstwy sensorowej  $n_s$ , i pokrycia  $n_c$ ), ich grubości ( $d$ ,  $w_s$ ) oraz parametry fali świetlnej (długość fali  $\lambda$ , polaryzacja  $p$ , efektywne współczynniki załamania  $N$  i rząd modu  $m$ ) są powiązane ze sobą w równaniach charakterystycznych:

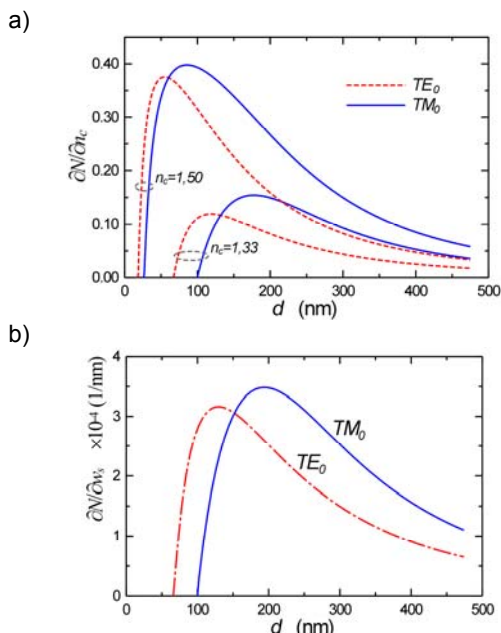
$$(1) \quad R(n_1, n_b, n_s, n_c, d, w_s, \lambda, p, m, N_m^p) = 0.$$

Równania charakterystyczne otrzymuje się z równań falowych po uwzględnieniu warunków ciągłości pól na granicach warstw. Z równań charakterystycznych wyznaczane są efektywne współczynniki załamania:

$$(2) \quad N_m^p = N(n_1, n_b, n_s, n_c, d, w_s, \lambda, p, m).$$

Równania charakterystyczne są równaniami nieliniowymi, stąd efektywne współczynniki wyznacza się metodami numerycznymi. Przy niewielkich zmianach współczynnika załamania pokrycia  $\Delta n_c$  i grubości  $\Delta w_s$  warstwy sensorowej, odpowiadające im zmiany efektywnego współczynnika załamania można zapisać, jako [9]:

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



Rys.2 Teoretyczne zależności czułości homogenicznej a) i czułości powierzchniowej od grubości warstwy falowodowej.  $d=181\text{nm}$ ,  $n_f=1,810$ ,  $n_b=1,510$ ,  $\lambda=677\text{nm}$ .

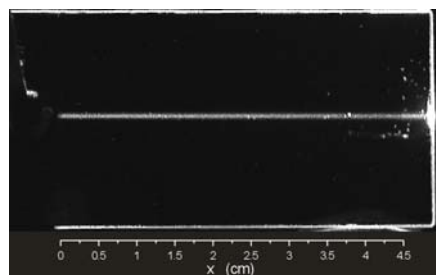
Pochodne wyrażają czułość efektywnego współczynnika załamania na zmiany parametrów struktury: odpowiednio współczynnika załamania pokrycia  $n_c$  i grubości  $w_s$  warstwy sensorowej. Gdy warstwę falowodową pokrywa jednorodnymateriał o współczynniku załamania  $n_c$  i grubości większej od głębokości wnikania pola zanikającego ( $w_s=0$ ), to struktura sensorowa jest strukturą refraktometryczną, a wielkość  $(\partial N/\partial n_c)$  jest nazywana czułością homogeniczną (ang. *homogenous sensitivity*). Natomiast, gdy grubość  $w_s$  warstwy sensorowej jest znacznie mniejsza od głębokości wnikania pola zanikającego, to ze względu na fakt, że zmiany grubości warstwy sensorowej zachodzą w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni światłowodu, wielkość  $(\partial N/\partial w_s)$  nazywana jest czułością powierzchniową (ang. *surface sensitivity*). Efekt zmiany grubości warstwy sensorowej stanowi podstawę działania immunosensorów.

Na rysunku 2a przedstawiono wyliczone zależności czułości homogenicznej od grubości warstwy falowodowej dla modów podstawowych  $TE_0$  i  $TM_0$ , dla dwóch różnych współczynników załamania pokrycia  $n_c$ . Widać, że maksymalne czułości osiągane są dla grubości warstwy falowodowej nieco większej od grubości odcięcia. Większe czułości mogą być osiągnięte dla modu  $TM_0$ . Wraz ze wzrostem współczynnika załamania pokrycia rośnie maksymalna czułość homogeniczna a odpowiadająca jej grubość warstwy falowodowej maleje. Na rysunku 2b przedstawiono wyliczone zależności czułości powierzchniowej od grubości warstwy falowodowej. W obliczeniach przyjęto, że grubość warstwy sensorowej wynosi  $w_s=1\text{nm}$  a współczynnik załamania pokrycia wynosi  $n_c=1,330$ .

Warunkiem osiągnięcia wysokich czułości jest zastosowanie światłowodów o dużych kontrastach współczynnika załamania [10] i dobranie optymalnych parametrów struktury sensorowej [11,12]. Efektywne współczynniki załamania  $N$  mogą być mierzone z zastosowaniem sprzęgaczy siatkowych lub interferometrów planarnych. Ze względu na bardzo wysokie koszty opracowań struktur sensorowych do konkretnych pomiarów chemicznych bądź biochemicznych, opracowuje się platformy technologiczne, które obejmują technologie wytwarzania elementów i struktur światłowodowych. Opracowane elementy i struktury, mogą być używane do wytwarzania różnorodnych struktur sensorowych do pomiarów chemicznych i biochemicznych. Takie podejście pozwala radykalnie obniżyć koszty opracowań struktur sensorowych przeznaczonych do konkretnych zastosowań [3].

### Warstwy falowodowe

Dwuskładnikowe warstwy falowodowe  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  nanoszone były na podłoża szklane techniką dip-coating z zolu otrzymywanego metodą zol-żel. Metoda zol-żel jest chemicznym sposobem wytwarzania materiałów z fazy ciekłej, w której synteza następuje dzięki hydrolizie prekursorów a następnie kondensacji jej produktów [13]. W opracowanej technologii wytwarzania warstw falowodowych stosowanym prekursorem krzemionki jest tetraetyloortokrzemian  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (TEOS) a prekursorem ditlenku tytanu jest tetraetyloortotytanian  $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (TET). Jako czynnik homogenizujący stosowany jest alkohol etylowy  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  a reakcje hydrolizy i kondensacji katalizowane są kwasem solnym  $\text{HCl}$  [5-8]. Po naniesieniu na podłoża szklane warstw zolu, struktury wygrzewane są w temperaturze  $500^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę. W procesie wygrzewania następuje usuwanie rozpuszczalników i ostateczne utrwalenie właściwości wytwarzanych warstw falowodowych. Stosując proporcje molowe  $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$  wynoszące 1:1, wytwarzano warstwy o współczynnikach załamania  $n_f \sim 1.8$ . W technice dip-coating grubość wytwarzanej warstwy jest kontrolowana poprzez szybkość wyrzucania podłoża z zolu.



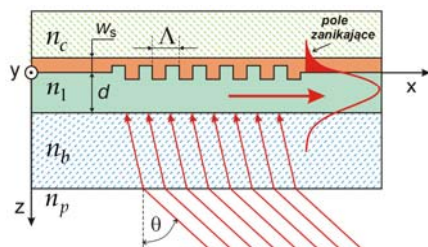
Rys.3. Obraz smugi rozpraszanego światła w światłowodzie planarnym płaskim. Polaryzacja  $TM$ ,  $d=181\text{nm}$ ,  $n_f=1,810$ ,  $n_b=1,510$   $\lambda=677\text{nm}$ .

W technologii wytwarzania struktur dwuskładnikowych SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> metodą zol-żel największą trudnością jest uzyskanie struktury homogenicznej, gdyż tytan, jako znacznie bardziej reaktywny od krzemu, wykazuje tendencję do tworzenia odseparowanej fazy. Osiągnięcie niskiej tłumienności wytwarzanych światłowodów uwarunkowane jest wysoką homogenicznością materiału warstwy falowodowej i niską szorstkością jej powierzchni.

Na rysunku 3 pokazany jest obraz pobudzonego światłowodu planarnego płaskiego. Do pobudzenia użyto sprzęgacza pryzmatycznego, który na rysunku nie jest pokazany. Widoczna jest jasna smuga światła rozproszonego. Zakładając, że natężenie światła rozpraszane w danym punkcie światłowodu jest proporcjonalna do natężenia światła propagującego się w światłowodzie  $I=I_0 \exp(-\mu x)$ , z rozkładu natężenia światła wzdłuż smugi można wyznaczyć współczynnik tłumienia  $\mu$ , a następnie tłumienność światłowodu  $\alpha=4,343\mu$ . Dla przedstawianego światłowodu wyznaczono tłumienność  $\alpha=(0,22\pm 0,06)$  dB/cm. Dla światłowodów o tak dużym kontraście współczynnika załamania jest to bardzo niski poziom tłumienności [7] Opracowane światłowody płaskie SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> są platformą technologiczną dla rozwijanych sprzęgaczy siatkowych i światłowodowych struktur paskowych.

### Sprzęgacze siatkowe

Warstwa zolu bezpośrednio po naniesieniu na podłoże jest miękka i podatna na deformacje. Dzięki temu, można w niej wytworzyć wzór siatki dyfrakcyjnej metodą odciskania, którego utrwalenie następuje w procesie wygrzewania. Światłowod płaski z wytworzonym sprzęgaczem siatkowym jest strukturą sensorową, która może być użyta w pomiarach refraktometrycznych bądź w pomiarach zmiany grubości warstwy sensorowej.



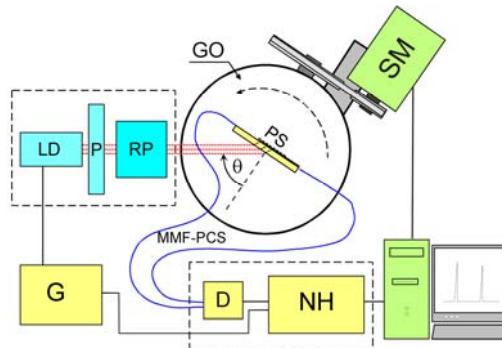
Rys.4. Schemat spręgacza siatkowego.

Schemat spręgacza siatkowego jest przedstawiony na rysunku 4. W pewnym obszarze warstwy falowodowej wytworzone jest zaburzenie jej grubości o okresie  $\Lambda$ . Gdy na obszar ten pada wiązka światła o długości fali  $\lambda$ , to przy spełnieniu warunku dopasowania fazowego:

$$(4) \quad \sin \theta = n_p^{-1} \left( N - r \frac{\lambda}{\Lambda} \right)$$

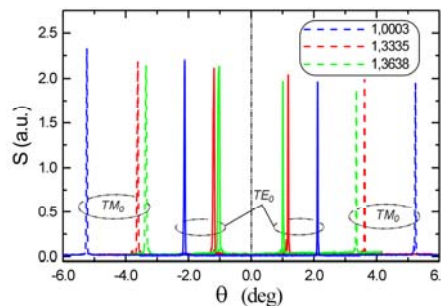
następuje rezonansowe pobudzenie prowadzonego modu. We wzorze (4) przez  $r$  oznaczono rząd dyfrakcyjny a przez  $n_p$  oznaczono współczynnik załamania powietrza. Ponieważ efektywny współczynnik załamania  $N$  zależy od parametrów pokrycia warstwy falowodowej, to przy ich zmianie również zmienia się kąt  $\theta$  rezonansowego pobudzenia prowadzonego modu. Układ do pomiarów refraktometrycznych bądź pomiarów zmian grubości warstwy sensorowej z zastosowaniem spręgacza siatkowego jest przedstawiony na rysunku 5. Goniometr GO napędzany jest silnikiem krokowym SM. W przedstawionym układzie pomiarowym, gdy silnik krokowy SM wykonuje jeden krok, to goniometr wykonuje obrót o 1,8 sekundy

kątowej. Na rysunku 6 pokazano charakterystyki sprzężenia otrzymane dla sprzęgacza siatkowego o okresie  $\Lambda=417\text{nm}$  i amplitudzie zaburzenia równej 10nm. Widoczne są piki sprzężenia, których położenia na osi kątowej zmieniają się wraz ze zmianą współczynnika załamania pokrycia  $n_c$ . Ujemne kąty pobudzenia oznaczają, że światło pada na strukturę z prawej strony normalnej i w światłowodzie propaguje się w prawą stronę, tak jak pokazano to na rysunku 4.



Rys.5 Schemat układu pomiarowego. GO-goniometr, PS – struktura sensorowa, SM-silnik krokowy, MMF-PCS-wielomodowe włókna światłowodowe, LD-diody laserowa (677nm), P-polaryzator, RP-rotator polaryzacji, G-generator, D-detektor, NH-nanowoltomierz homodynamiczny.

Kąty dodatnie oznaczają, że światło pada na strukturę z lewej strony normalnej i w światłowodzie propaguje się w lewą stronę. W każdym z tych przypadków do wzoru (4) podstawiane są ujemne wartości kąta  $\theta$ . Oświetlenie struktury sensorowej odpowiednio z lewej i z prawej strony normalnej daje symetryczne widma pobudzenia. Kąt  $\theta$  pobudzenia struktury sensorowej jest zatem równy połowie odległości zarejestrowanych pików sprzężenia. W ten sposób znacząco zwiększa się precyzję wyznaczenia kąta sprzężenia. Ze wzoru (4) wyznaczany jest efektywny współczynnik załamania  $N$ , a następnie z równania (2) - współczynnik załamania pokrycia. Taka sama procedura jest stosowana przy pomiarze grubości lub zmian grubości warstwy sensorowej.



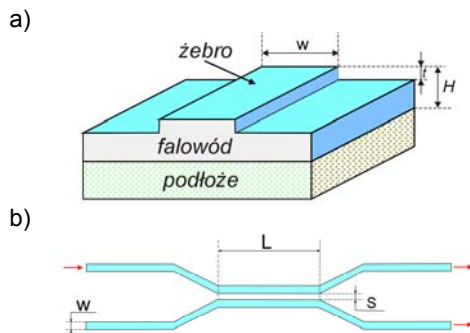
Rys.6. Charakterystyki pobudzenia struktury sensorowej sprzęgaczem siatkowych o okresie  $\Lambda=417\text{nm}$  dla różnych współczynników załamania pokrycia.

Opracowane struktury sensorowe ze sprzęgaczami siatkowymi o okresie 417nm pozwalają na detekcję minimalnych zmian współczynnika załamania pokrycia na poziomie  $\sim 5 \times 10^{-6}$  RIU oraz detekcję zmian średniej grubości warstwy sensorowej na poziomie  $10^3\text{nm}$  [5,6].

### Struktury paskowe

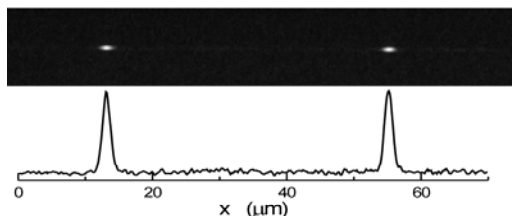
Światłowody paskowe i sprzęgacze kierunkowe są podstawowymi elementami interferometrów planarnych. Na rysunku 7a przedstawiono schemat światłowodu żebrowego. Światłowod żebrowy jest charakteryzowany

przez szerokość  $w$  żebra, wysokość  $t$  żebra i wysokość  $H$  światłowodu w obszarze żebra. Światłowody żebrze wytwarzane są ze światłowodów płaskich o grubości  $H$ . Z zastosowaniem fotolitografii światłowodów płaski jest selektywnie maskowany a następnie chemicznie trawiony [7,8]. W obszarze maskowania powstaje żebro światłowodu paskowego. Na rysunku 7b przedstawiono schemat sprzęgacza kierunkowego. Na odcinku  $L$  dwa światłowody paskowe zbliżone są do siebie na odległość  $s$ . Jeśli do jednego ze światłowodów zostanie wprowadzone światło, to w wyniku sprzężenia obu światłowodów dojdzie do przepływu światła pomiędzy nimi. Sprzężenie pomiędzy światłowodami zachodzi poprzez pola zanikające prowadzonych modów i zależy od parametrów światłowodów paskowych, od długości oddziaływania  $L$ , od separacji  $s$  oraz od długości fali światła  $\lambda$ .



Rys.7. Schemat światłowodu żebrzego a) i topologia sprzęgacza kierunkowego.

Na rysunku 8 pokazany jest obraz świecących wyjść sprzęgacza kierunkowego oraz rozkład mocy. Widać, że na obu wyjściach natężenie światła jest jednakowe, co oznacza, że sygnał jest dzielony w stosunku 50%:50% i jest to sprzężacz 3 dB. Topologia sprzęgacza kierunkowego (rys.7b) odpowiada topologii interferometru Michelsona.



Rys.8. Sygnały optyczne na wyjściu sprzęgacza kierunkowego i rozkłady mocy,  $\lambda=677\text{nm}$ ,  $w=2\mu\text{m}$ ,  $t=6\text{nm}$ ,  $L=3000\mu\text{m}$ ,  $s=2,0\mu\text{m}$ .

Sprzężacz kierunkowy 3 dB jest podstawowym elementem budowy interferometru Macha-Zehndera i interferometru Younga. Interferometr Younga pozwala na tworzenie wielokanałowych struktur sensorowych i obok sprzęgacza siatkowego jest szczególnie atrakcyjnym układem do zastosowań w immunosensarach [14,15]. Na bazie układu interferometru Younga, jak również na bazie sprzęgacza siatkowego mogą być wytwarzane chipy immunosensarów do jednorazowego użycia. Źródło światła, detektor, układ przetwarzania danych oraz układ wizualizacji i archiwizacji wyników pomiarowych są głównymi elementami mającymi wpływ na koszty systemu pomiarowego. Koszty wytwarzania pojedynczej struktury sensorowej mogą być sprowadzone do akceptowalnego poziomu, gdy sprzyja temu stosowana do ich wytwarzania technologia. Cechę tę posiada metoda zol-żel, której największymi zaletami oprócz możliwości kształtowania struktury wytwarzanego materiału jest bardzo duża wydajność oraz to, że jej stosowanie nie wymaga

kosztownych instalacji technologicznych. Jak pokazano powyżej, metodą zol-żel pozwala na wytwarzanie falowodowych warstw tlenkowych o dużym kontraście współczynnika załamania i bardzo niskiej tłumienności. Metoda zol-żel pozwala na osiągnięcie powtarzalności parametrów wytwarzanych struktur, która jest porównywalna z metodą LPCVD [6]. Czułości struktur sensorowych wytwarzanych na bazie opracowanych warstw falowodowych  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  są wystarczające do zastosowań w pomiarach biochemicznych [6].

### Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono struktury optyki zintegrowanej wytwarzane metodą zol-żel do zastosowań w immunosensarach. Czułości struktur sensorowych wytwarzanych na bazie opracowanych warstw falowodowych  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  są wystarczające do zastosowań w pomiarach biochemicznych. Struktury sensorowe ze sprzęgaczami siatkowymi o okresie  $417\text{nm}$  pozwalają na detekcję minimalnych zmian współczynnika załamania na poziomie  $\sim 5 \times 10^{-6}$  RIU oraz detekcję zmian średniej grubości warstwy sensorowej na poziomie  $10^{-3}\text{nm}$ .

Praca finansowana ze środków projektu badawczego DEC-2011/03/B/ST7/03538 z Narodowego Centrum Nauki.

### LITERATURA

- [1] Hummad Habib Quazi, Abu Bakar bin Mohammad, Muhammad Akram, Recent Progress in Optical Chemical Sensors, *Sensors* 12 (2010) 16522-16556
- [2] Midwinter J.E., On the use of optical waveguide techniques for internal reflection spectroscopy, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-7 (1971) 339-344
- [3] Lambeck P.V. Integrated optical sensors for the chemical domain, *Meas. Sci. Technol.*, 17 (2006) 93-116
- [4] Karasiński P., Tyszkiewicz C., Rogoziński R., Planar evanescent wave ammonia sensor - influence of refractive index profile on sensor properties, *Acta Phys. Pol. A*, 120 (2011) n.4, 651-656
- [5] Karasiński P., Sensor properties of planar waveguide structures with grating couplers, *Opt. Electron. Rev.*, 15 (2007) 168-178
- [6] Karasiński P., Embossable grating couplers for planar evanescent wave sensors, *Opt. Electron. Rev.*, 19(2011) 10-21
- [7] Karasiński P., Tyszkiewicz C., Rogoziński R., Jaglarz J., Mazur J., Optical rib waveguides based on sol-gel derived silica-titania films, *Thin Solid Films* 519 (2011) 5544-5551
- [8] Karasiński P., Tyszkiewicz C., Rogoziński R., Optical channel structures based on sol-gel derived waveguide films, *Opt. Appl.* 41 (2011) n.2, 351-357
- [9] Lukosz W., Integrated optical chemical and direct biochemical sensors, *Sens. Actuators B*, 29 (1995) 37-50
- [10] Karasiński P., Rogoziński R., Characterization and sensor properties of sol-gel  $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$  film/ion-exchange glass optical waveguides, *Opt Commun.* 281 (2008) n.9, 2472-2480
- [11] Tyszkiewicz C. Homogeneous sensitivity of sol-gel derived planar waveguide structures - theoretical analysis, *Opt. Appl.*, 42 (2012) n.3, 555-569
- [12] Tyszkiewicz C., Sensing properties of four-layered planar waveguides-theoretical analysis, *Acta Phys. Pol. A*, 122 (2012) n.5, 908-914
- [13] Brinker C.J., Scherer G.W., *Sol-Gel Science*, Academic Press, Inc., San Diego, 1990
- [14] Brandenburg, A., Differential refractometry by an integrated-optical Young interferometer. *Sens. Actuators B* 38-39 (1997) 266-271
- [15] Ymeti A., Kanger J.S., Greve J., Besselink G.A.J., Lambeck P.V., Wijn R., Heideman R.G., Integration of microfluidics with a four-channel integrated optical Young interferometer immunosensor, *Biosens. Bioelectron.* 20 (2005) 1417-1421

**Autor:** dr hab. inż. Paweł Karasiński, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [pawel.karasinski@polsl.pl](mailto:pawel.karasinski@polsl.pl).