

Paweł KARASIŃSKI, Roman ROGOZIŃSKI, Cuma TYSZKIEWICZ

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, KATEDRA OPTOELEKTRONIKI, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

Żebrowe światłowody paskowe do zastosowań sensorowych

Dr inż. Paweł KARASIŃSKI

Absolwent Wydziału Matematyczno-Fizycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach -fizyka techniczna. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego. W pracy naukowej zajmuje się projektowaniem i technologią wytwarzania elementów i układów optyki zintegrowanej do zastosowań w planarnych czujnikach światłowodowych pracujących w oparciu o spektroskopię pola zanikającego. Jest autorem i współautorem ponad 100 publikacji naukowych.

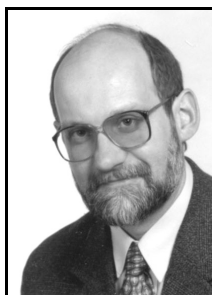
e-mail: pawel.karasinski@polsl.pl



Dr hab. inż. Roman ROGOZIŃSKI

Absolwent Wydziału Matematyczno-Fizycznego – fizyka techniczna. W pracy naukowej zajmuje się zastosowaniami metody wymiany jonowej do wytwarzania gradientowych struktur światłowodowych. Prowadzi prace badawcze w zakresie technologii wytwarzania struktur światłowodowych, projektowania i pomiarów ich właściwości optycznych, opisu teoretycznego procesów wymiany jonowej i ich modelowania numerycznego. Jest autorem i współautorem ponad 100 publikacji.

e-mail: roman.rogozinski@polsl.pl



Dr inż. Cuma TYSZKIEWICZ

Absolwent Wydziału Matematyczno-Fizycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach -fizyka techniczna. Obecnie jest adiunktem w Katedrze Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego. W pracy naukowej zajmuje się projektowaniem i modelowaniem światłowodowych struktur planarnych do zastosowań sensorowych. Jest autorem i współautorem ponad 20 publikacji naukowych.

e-mail: cuma.tyszkiewicz@polsl.pl



Streszczenie

Zmiany efektywnych współczynników załamania w czujnikach światłowodowych pracujących w oparciu o spektroskopię pola zanikającego mierzone są z zastosowaniem sprzęgaczy siatkowych lub interferometrów. Podstawowym elementem interferometrów planarnych są światłowody paskowe. Przedstawiana praca dotyczy żebrowych światłowodów paskowych. Otrzymywane metodą zol-żel warstwy falowodowe $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ są selektywnie maskowane z zastosowaniem tradycyjnej fotolitografii a następnie trawione chemicznie. W ten sposób zostały wytwarzane jednodrowe żebrowe światłowody paskowe i sprzęgacze kierunkowe. W pracy przedstawione są wyniki analizy teoretycznej światłowodów żebrowych i wyniki badań eksperymentalnych wytworzonych struktur.

Słowa kluczowe: światłowod żebrowy, zol-żel, sprzęgacz kierunkowy, spektroskopia pola zanikającego, interferometr planarny.

Rib channel waveguides for sensor applications

Abstract

Basic elements of planar interferometers are the channel waveguides. Presented work refers to the channel rib waveguides. In our previous work [7] we offered the production method of rib channel waveguides with the application of traditional photolithography and wet chemical etching of sol-gel derived silica-titania waveguide films. In this work we present new results of our research on rib waveguides and directional couplers. The theoretical analysis of rib waveguides was presented as well as the results of experimental investigations on the fabricated structures. The investigations on channel waveguides of the rib height of 5 nm was carried out for wavelengths: $\lambda=677$ nm. The waveguide films used in rib waveguides manufacturing technology are characterized by high refractive index (~ 1.8) and ultra-low attenuation of 0.15 dB/cm. Rib waveguides of width $w < 4$ μm are monomode. For the rib waveguides we obtained the attenuation of (1.5 ± 0.1) dB/cm. Rib waveguides of such an attenuation can be applied in the technology of integrated optics systems in sensor applications, and in particular for the construction of interferometers of Mach-Zehnder, Young or Michelson. The improvement of technology, and in particular the improvement in the quality of photolithographic masks should contribute to further decrease of attenuation of the produced rib waveguides.

Keywords: rib waveguide, sol-gel, directional coupler, evanescent wave spectroscopy, planar interferometer.

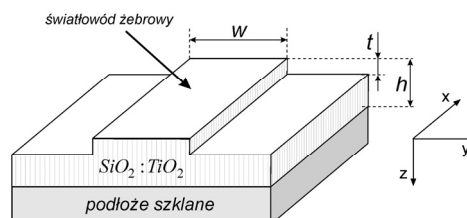
1. Wstęp

W planarnych czujnikach światłowodowych wykorzystuje się oddziaływanie prowadzonej w światłowodzie fali świetlnej z warstwą sensorową pokrywającą światłowod. Oddziaływanie to odbywa się poprzez pole zanikające fali świetlnej prowadzonej w warstwie falowodowej. Zmiany grubości bądź współczynnika załamania warstwy sensorowej powodują zmianę efektywnych współczynników załamania prowadzonych modów, które mogą być mierzone z zastosowaniem interferometrów albo z zastosowaniem sprzęgaczy siatkowych [1, 2]. Podstawowym elementem, z którego zbudowany jest interferometr planarny jest światłowod paskowy. Światłowody paskowe wytwarzane metodą wymiany jonowej mają gradientowe profile współczynnika załamania [3], natomiast światłowody paskowe wytwarzane z zastosowaniem epitaksji z fazy gazowej (LPCVD) [4] lub z fazy ciekłej (zol-żel) mają jednorodne profile współczynnika załamania. Wysokie czułości można uzyskać jedynie z zastosowaniem światłowodów jednorodnych o dużych kontrastach współczynnika załamania [5, 6].

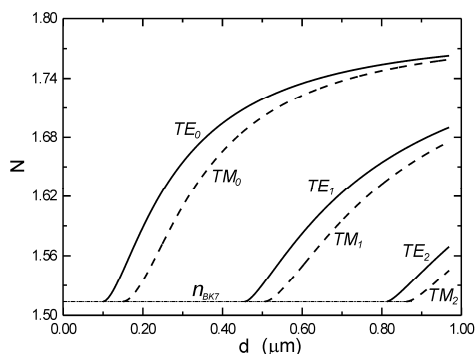
Praca dotyczy opracowanej przez nas i nadal rozwijanej technologii wytwarzania żebrowych światłowodów paskowych [7]. Metodą zol-żel wytwarzane są światłowody planarne $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ o wysokim współczynniku załamania [8, 9]. Warstwy falowodowe są selektywnie maskowane z zastosowaniem tradycyjnej fotolitografii a następnie trawione chemicznie. W ten sposób wytwarzane są światłowody paskowe jednodrowe i sprzęgacze kierunkowe. W pracy przedstawiono technologię wytwarzania żebrowych światłowodów paskowych i zastosowane metody pomiarowe. Przedstawione są wyniki analizy teoretycznej światłowodów żebrowych oraz wyniki badań eksperymentalnych.

2. Analiza teoretyczna

Schemat światłowodu żebrowego jest przedstawiony na rys. 1. Parametrami optycznymi i geometrycznymi, charakteryzującymi światłowod żebrowy są odpowiednio: współczynniki załamania warstwy falowodowej n_1 , podłoża n_b i pokrycia n_c , oraz grubość h w obszarze żebra, wysokość t i szerokość w żebra. Analizę teoretyczną żebrowych światłowodów paskowych przeprowadzono metodą efektywnego współczynnika załamania [10].

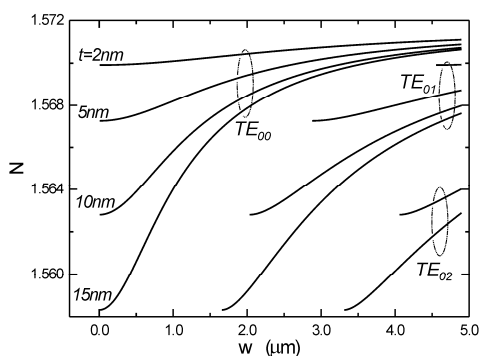


Rys. 1. Schemat światłowodu żebrowego
Fig. 1. Scheme of rib waveguide



Rys. 2. Charakterystyki modowe światłowodu płaskiego, $\lambda=677$ nm
Fig. 2. Modal characteristics of slab waveguide, $\lambda=677$ nm

Charakterystyki modowe światłowodu planarnego płaskiego o współczynniku załamania $n_1=1,787$ przedstawia rys. 2. Obliczenia wykonano dla długości fali $\lambda=677$ nm. W obliczeniach uwzględniono dyspersję współczynników załamania warstwy falowodowej i szkła podłożowego BK7. Grubość odcięcia modu TE_0 wynosi $d_{cut}=99$ nm a modu TM_0 wynosi $d_{cut}=150$ nm. Charakterystyki modowe światłowodu żebrowego ($h=180$ nm), dla wybranych wysokości t żebra są przedstawione na rys. 3. Widać, że szerokość odcięcia w_{cut} modu pierwszego rzędu silnie zależy od wysokości t żebra.



Rys. 3. Charakterystyki modowe światłowodu żebrowego
Fig. 3. Modal characteristics of RIB waveguides, $h=180$ nm

3. Technologia

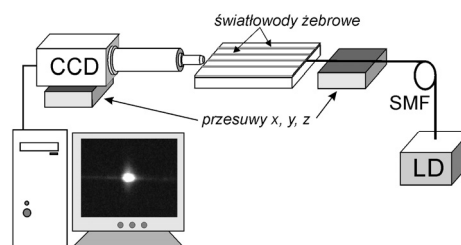
Prekursorami krzemionki (SiO_2) i ditlenku tytanu (TiO_2) były odpowiednio tetraetoksylian $Si(OC_2H_5)_4$ (TEOS) i tetraetoksyntanian $Ti(OC_2H_5)_4$ (TET), czynnikiem homogenizującym był alkohol etylowy C_2H_5OH a katalizatorem kwas solny HCl. Dla wytwarzanych zoli stosunek molowy TEOS:TET wynosił 1. Warstwy zoli na podłożach ze szkła BK7 nanoszono metodą dip-coating [9]. Po naniesieniu warstw zoli na podłożach, struktury wygrzewano w temperaturze $500^\circ C$ przez 60 minut. Grubości warstw i ich współczynniki załamania mierzono elipsometrem monochromatycznym Sentech SE400 ($\lambda=632,8$ nm). Charakterystyki spektralne współczynnika załamania wyznaczono elipsometrem spektralnym Woollam M 2000.

Światłowody żebrowe zostały wytworzone poprzez selektywne trawienie warstw falowodowych $SiO_2:TiO_2$. W tym celu zastosowano wodny roztwór fluorku amonowego. Skład roztworu był następujący: 200 ml wody (H_2O)+20 ml 40% roztworu fluorku amonowego (NH_4F)+10 ml 80% kwasu octowego (CH_3COOH). Opracowując skład roztworu trawiącego dążyliśmy do uzyskania relatywnie małych szybkości trawienia, aby poprzez czas trawienia, móc dokładnie kontrolować głębokość trawienia, a przez to wysokość t wytwarzanych światłowodów żebrowych. Drugim oczywistym wymaganiem było nie usuwanie maskujących warstw

fotorezystu przez roztwór trawiący, w czasie wielokrotnie przekraczającym przewidywane czasy trawienia. Dla temperatury roztworu $30^\circ C$ określono szybkość trawienia wynoszącą (0.225 ± 0.003) nm/s. W procesach trawienia warstwy maskowano fotorezystem Shipley-Microposit S1813SP15. Wykonano światłowody żebrowe o szerokościach żebra $w=1\div 10$ μm oraz sprzęgacze kierunkowe na światłowodach żebrowych o szerokościach żebra 2 μm .

4. Układ pomiarowy

Wykonane światłowody żebrowe i sprzęgacze kierunkowe badano w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 4. Badane struktury pobudzone były z diody laserowej o długości fali $\lambda=677$ nm, sprzężonej z jednomodowym włóknem światłowodowym. Sprzężenie włókna światłowodowego z badaną strukturą umożliwił układ precyzyjnych przesuwów x,y,z. Rozkłady mocy w polu bliskim na wyjściu pobudzanych struktur rejestrowano kamerą CCD i zapisywano w pamięci komputera.

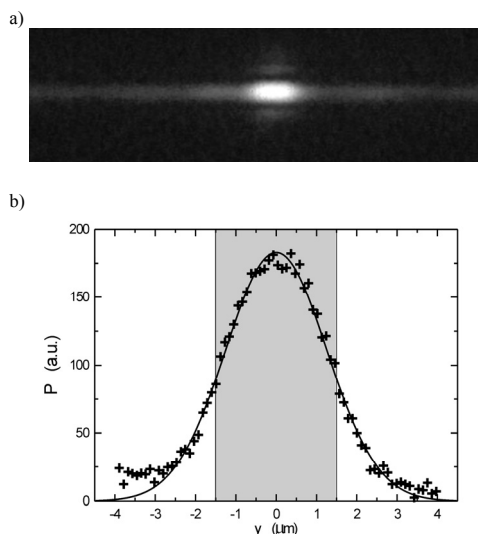


Rys. 4. Układu pomiarowy
Fig. 4. Experimental set-up

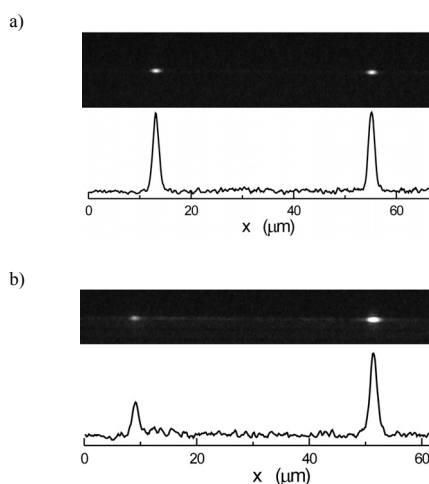
5. Wyniki badań

Wykonane struktury światłowodów żebrowych i sprzęgaczy kierunkowych zbadano w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 4. Pomiary polegały na rejestracji w polu bliskim rozkładów mocy światła emitowanego z krawędzi struktury. Na ich podstawie rozstrzygano czy badany światłowód jest jednomodowy. Przykładowy obraz, zarejestrowany dla pobudzonego światłowodu o szerokości żebra $w=3$ μm i zaprojektowanej wysokości $t=5$ nm jest pokazany na rys. 5a. Wysokość żebra została określona z czasu trawienia. Długości badanych struktur wynosiły 35 mm. Na rys. 5b przedstawiono rozkład mocy P w płaszczyźnie poziomej, równoległej do powierzchni światłowodu. Krzyżami zaznaczono punkty pomiarowe a linią ciągłą wykreślono funkcję Gaussa, dopasowaną do punktów pomiarowych. Ciemne pole przedstawia obszar żebra światłowodu paskowego. Widać, że światłowód ten jest jednomodowy, co jest praktycznie zgodne z przedstawionymi na rys. 3 wynikami przybliżonej analizy teoretycznej. Metodą smugową wyznaczono tłumienności wytwarzanych światłowodów żebrowych na poziomie $\sim 1,5$ dB/cm.

Na rys. 6 przedstawione są zarejestrowane w polu bliskim obrazy świecących światłowodów wyjściowych w sprzęgaczach kierunkowych i odpowiadające im rozkłady mocy w płaszczyźnie poziomej. W przypadku obu sprzęgaczy kierunkowych światłowody żebrowe miały szerokość $w=2$ μm , wysokość $t=5$ nm a długość sprzężenia wynosiła $L=3$ mm. Jediną różnicą była odległość separacji światłowodów paskowych w obszarze sprzężenia, która w pierwszym przypadku (rys. 6a) wynosiła $s=2,0$ μm a w drugim przypadku (rys. 6b) wynosiła $s=2,5$ μm . Z przedstawionych rozkładów mocy widać, że pierwszy sprzęgacz kierunkowy jest symetryczny ze stosunkiem podziału mocy 1:1, natomiast drugi sprzęgacz jest asymetryczny z podziałem mocy 1:2,5.



Rys. 5. a) Obraz świecącego końca światłowodu żebrowego o szerokości 3 μm ,
b) rozkład mocy w poziomie, $\lambda=677$ nm
Fig. 5. a) Light emanating from the facet of a 3 μm wide rib waveguide,
b) horizontal power profile, $\lambda=677$ nm



Rys. 6. Obrazy i rozkłady mocy w polu bliskim na końcach światłowodów wyjściowych w sprzęgaczach kierunkowych. $w=2$ μm , $t=5$ nm, $L=3$ mm, $\lambda=677$ nm, a) $s=2,0$ μm , b) $s=2,5$ μm
Fig. 6. Images and power distributions in near field on the output waveguide end facets of the directional couplers. $w=2$ μm , $t=5$ nm, $L=3$ mm, $\lambda=677$ nm, a) $s=2$ μm , b) $s=2,5$ μm

Przedstawione tutaj światłowody żebrowe i sprzęgacze kierunkowe mogą być wykorzystane w technologii planarnych interferometrów światłowodowych do zastosowań w spektroskopii pola zanikającego. Wysoki kontrast współczynnika załamania pozwoli uzyskać wysokie czułości, co oznacza, że interferometry te będą

mogły być stosowane w układach planarnych immunosensorów bądź czujników chemicznych.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono paskowe światłowody żebrowe i sprzęgacze kierunkowe. Platformę dla technologii wytwarzania tych struktur stanowią warstwy falowodowe $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ otrzymywane metodą zol-żel. Światłowody paskowe o wysokości żebra $t=5$ nm są jednodomowe w zakresie widzialnym, gdy szerokość żebra nie przekracza 3 μm . Tłumienność opracowanych światłowodów żebrowych wynosi 1,5 dB/cm. Przedstawione sprzęgacze kierunkowe zbudowane są ze światłowodów żebrowych o szerokości żebra 2 μm . Poprzez długość obszaru sprzężenia oraz separację światłowodów paskowych w obszarze sprzężenia można wpływać na podział mocy na wyjściu sprzęgacza. Opracowana technologia wytwarzania światłowodów paskowych i sprzęgaczy kierunkowych jest rozwijana i w przyszłości będzie wykorzystywana w technologii planarnych interferometrów światłowodowych do zastosowań w spektroskopii pola zanikającego.

Praca częściowo finansowana ze środków grantu N R01 0034 06/2009.

7. Literatura

- [1] Lukosz W.: Integrated optical chemical and direct biochemical sensors. *Sensors and Actuators B* 29, 37-50 (1995).
- [2] Lambeck P.V.: Integrated optical sensors for the chemical domain – review article. *Measurement Science and Technology*, Vol.17 (2006) R93-R116.
- [3] Rogoziński R.: Planarne struktury światłowodowe wytwarzane metodą wymiany jonowej w szklach. *Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice* (2007).
- [4] Wörhoff K., Lambeck P.V., Driessen A.: Design, tolerance analysis, and fabrication of silicon oxynitride based planar optical waveguides for communication devices. *Journal of Lightwave Technology*, Vol.17, No.8 (1999) 1401-1407.
- [5] Karasiński P., Rogoziński R.: Characterization and sensor properties of sol-gel $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ /ion-exchange glass waveguide. *Optics Communications* Vol.281 (2008) 2472-2480.
- [6] Karasiński P.: Sensor properties of planar waveguide structures with grating couplers. *Opto-Electronics Review*, 15 (3) (2007) 168-178.
- [7] Karasiński P., Rogoziński R.: Rib waveguides fabricated by means of chemical etching of sol-gel films $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$. *Optics Communications* 245 (2005) 237-242.
- [8] Karasiński P.: Sol-gel derived optical waveguide films for planar sensors with phase modulation. *Optica Applicata* Vol. 34, No. 4 (2004) 467-475.
- [9] Brinker C. J., G. Scherer W.: *Sol-gel science*. Academic Press, Inc. San Diego (1990).
- [10] Chiang K.S.: Effective-index analysis of optical wave-guides, *Proc. SPIE* 2399 (1995) 2-12.

otrzymano / received: 29.03.2010

przyjęto do druku / accepted: 04.05.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

**Zapraszamy do publikacji artykułów promocyjnych
w miesięczniku naukowo-technicznym PAK**

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl