

Marek BIAHUT, Aleksander OPILSKI,
Zbigniew OPILSKI, Roman ROGOZIŃSKI

ŚWIATŁOWODY GRADIENTOWE NA BAZIE SZKIEŁ

I ICH ZASTOSOWANIA W TECHNOLOGII

ROZGAŁĘZIACZY $N \times N$

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania teoretyczne i eksperymentalne nad opracowaniem technologii rozgałęziaczy światłowodowych $N \times N$. Rozgałęziacze wykonano techniką wielostopniową. W pierwszym etapie prowadzono dyfuzję wstępną jonów Ag ze stopionego $AgNO_3$. Otrzymane struktury rozdyfundowano, a następnie zagrzebano drogą dodatkowej dyfuzji jonów Na ze stopionego $NaNO_3$. Technologia ta umożliwia uzyskiwanie struktur światłowodowych dla szerokiego zakresu zmian współczynnika załamania i geometrii. Straty całkowite rozgałęziaczy tj. straty sprzężenia, tłumienie materiałowe oraz straty na rozgałęzieniu wynosiły około 3 dB ($NA \sim 0.19$), co stwarza dużą perspektywę szerszego zastosowania, zwłaszcza rozgałęziaczy o większym stosunku podziału - typu 1×4 .

WPROWADZENIE

Technika wymiany jonowej w szklach jest szczególnie wygodna i uniwersalną metodą wytwarzania szerokiej klasy elementów biernych optyki zintegrowanej. Poprzez odpowiedni wybór warunków technologicznych, tzn. rodzaju jonów domieszek, składu chemicznego soli i typu szkła, rozmiaru okna, czasu i temperatury procesu uzyskuje się falowody jedno- i wielomodowe, planarne i dwuwymiarowe, których rozmiar i apertura numeryczna może się zmieniać w szerokim zakresie [1].

Celem tej pracy jest opracowanie technologii rozgałęziaczy światłowodowych $N \times N$, wytwarzanych na bazie szkieł. Elementy te powinny współpracować z włóknami telekomunikacyjnymi produkcji krajowej. Aby połączenie włókna z

rozgałęziaczem było efektywne, muszą być spełnione następujące warunki:

- podobna geometria paska i włókna,
- identyczna apertura numeryczna,
- identyczna liczba modów prowadzona w pasku i we włóknie.

Produkowane w kraju gradientowe włókna telekomunikacyjne o profilu parabolicznym posiadają następujące parametry:

- współczynnik załamania w osi rdzenia $n_0 = 1.47212$,
- średnicę rdzenia $2r = 50\mu\text{m}$,
- aperturę numeryczną $NA = 0.21$.

1. WYBÓR RODZAJU JONÓW DOMIESZEK ORAZ MATERIAŁU PODŁOŻA

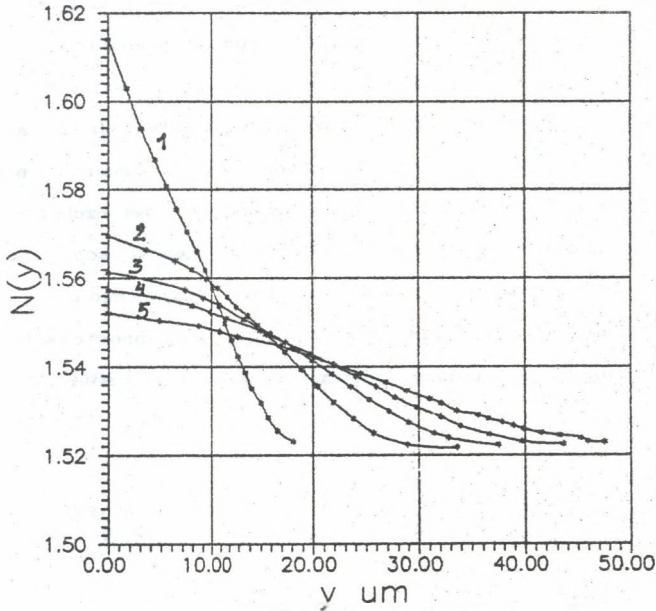
Pośród stosowanych jonów domieszek wyróżniają się jakością światłowody otrzymywane drogą wymiany jonów K^+ , Tl^+ i Ag^+ z jonami Na^+ .

Światłowody powstałe w trakcie wymiany K^+ - Na^+ charakteryzują się małym tłumieniem materiałowym ($< 1\text{dB/cm}$) i dużą stabilnością termiczną, ale mała zmiana wsp. załamania ($\Delta n \sim .01$) uniemożliwia zastosowanie tego materiału do wytwarzania struktur wielomodowych [2].

Prowadząc wymianę Tl^+ - Na^+ , uzyskuje się duże zmiany wsp. załamania ($\Delta n \approx 0.15$) i bardzo niskie ($\sim 0.1\text{dB/cm}$) tłumienie światłowodów [3]. Jednakże sole tego pierwiastka są silnie toksyczne, co ogranicza możliwości zastosowania talu w produkcji.

Z tego względu zdecydowano się na wykorzystanie jako źródła jonów Ag^+ z stopionego $AgNO_3$. Srebro jest popularnym materiałem powodującym zmiany wsp. załamania $\Delta n \sim 0.1$ i umożliwiającym uzyskiwanie już w temperaturach $> 473\text{K}$ struktur wielomodowych [4]. Falowody charakteryzowały się jednak stosunkowo dużą tłumiennością osiągającą wartość kilku dB/cm. Wysoka tłumienność otrzymywanych struktur falowodowych związana była z obecnością w stosowanym szkłe związków As i Fe i wynikała z redukcji jonów srebra przez jony tych pierwiastków, powodując formowanie się submikroskopowych kryształów srebra atomowego stanowiących centra barwne. Związki As i Fe, obecne w większości produkowanych szkieł, są dodawane w procesie technologicznym jako czynniki klarujące. Problem ten rozwiązano stosując jako podłoża szkła przygotowane w procesie technologicznym, wykorzystującym klarowanie mechaniczne. Było

to szkło borokrzemowe produkcji huty szkła "Białystok" o dużej zawartości jonów Na^+ .



Rys.1 Rozkład współzałamania falowodów planarnych dla procesu o parametrach: dyfuzja wstępna 1-T=573K,t=4h; wygrzewanie 2-T=723K,t=0.5h, 3-T=723K,t=1h, 4-T=723K,t=1.5h, 5-T=723K,t=2.5h.

Fig.1. Planar waveguides refractive index distribution for the technological parameters: preliminary diffusion 1-T=573K,t=4h; annealing 2-T=723K,t=0.5h, 3-T=723K,t=1h, 4-T=723K,t=1.5h, 5-T=723K,t=2.5h.

Na rys. 1 przedstawiono profile rozkładu współzałamania w falowodach planarnych, otrzymane w wyniku dyfuzji wstępnej oraz kolejnych rozdyfundowań w temperaturach wyższych. Profile określano eksperymentalnie metodą IWKB, mierząc efektywne współzałamania.

Dyfuzja w tym szkłe przebiega z szybkością zbliżoną do dyfuzji w szkłe sodowo-wapniowym. Otrzymano również bardzo podobne zmiany współzałamania.

Najkorzystniejszą własnością uzyskiwanych struktur jest mała tłumienność materiałowa, która bez żadnych dodatkowych zabiegów osiągała wartość $< 1 \text{ dB/cm}$

2. PROJEKTOWANIE DWUWYMIAROWYCH STRUKTUR ZAGRZEBANYCH

Przedstawione w poprzednim punkcie rozkłady wsp. załamania falowodów planarnych wykorzystano do projektowania falowodów paskowych zagrzebanych.

Rozważono w tym celu dwustopniowy proces dyfuzji - początkowo jonów Ag^+ poprzez maskę o promieniu a w czasie t_1 , a następnie jonów Na^+ w czasie t_2 . Dyfuzja jonów Ag^+ formuje dwuwymiarowy rozkład wsp. załamania z maximum ΔN na powierzchni. Dyfuzja jonów Na^+ obniża wartość wsp. załamania i przesuwa-
jąc maximum w głąb podłoża odseparowuje falowód od powierzchni. Poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu można uzyskać w ten sposób rozkład wsp. załamania zbliżony do rozkładu wsp. załamania włókna optycznego.

Dwuwymiarowy rozkład wsp. załamania $\Delta N(x,y)$ (oś y jest prostopadła do po-
wierzchni, a oś x równoległa) opisuje, jak można pokazać [5], równanie:

$$\Delta n(x,y) = \frac{\Delta N_0 w_1}{2(w_1^2 + w_2^2)^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{y^2}{(w_1^2 + w_2^2)}\right] \times$$

$$\left[\operatorname{ERFC}\left[\frac{x-a/2}{(w_1^2 + w_2^2)^{1/2}}\right] - \operatorname{ERFC}\left[\frac{x+a/2}{(w_1^2 + w_2^2)^{1/2}}\right] \right] \times$$

$$\left[1 - \frac{1}{w_1} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{t}{w_1} - \frac{t^2}{w_1^2 + w_2^2}\right] \operatorname{ERFC}\left[\frac{y+t}{(w_1^2 + w_2^2)^{1/2}} \frac{w_1}{w_2}\right] dt \right]$$

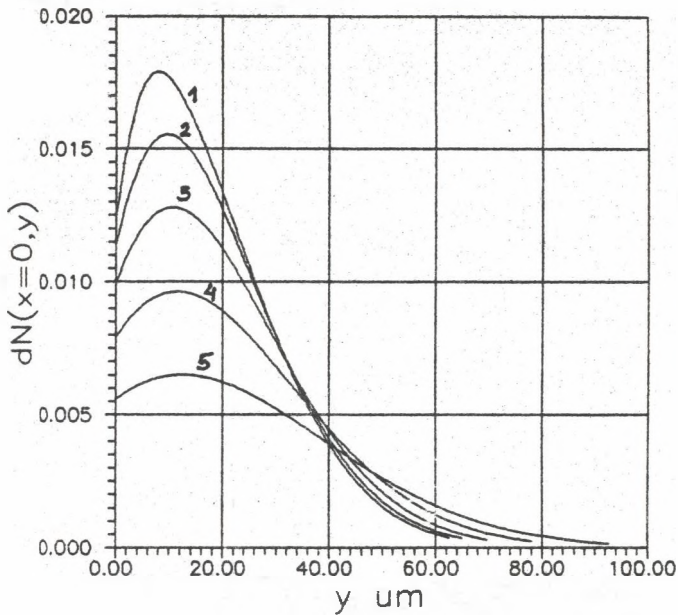
gdzie - $w_1 = 2\sqrt{D_1 t_1}$ jest głębokością dyfuzji jonów Ag^+ ,

- $w_2 = 2\sqrt{D_2 t_2}$ jest głębokością dyfuzji jonów Na^+ ,

- ΔN_0 jest zmianą wsp.załamania światłowodu planarnego, odpowiadająca głębokości w_1 i wyznaczoną na podstawie charakterystyk z Rys.1,

- D_1, D_2 - wsp. dyfuzji odpowiednio jonów Ag^+ i Na^+ .

Typowe rozkłady wsp. załamania przedstawiają Rys.2 i Rys.3. Wyniki te były podstawą dla projektowania parametrów procesu technologicznego przy wytwar-
zaniu rozgałęziaczy NxN.



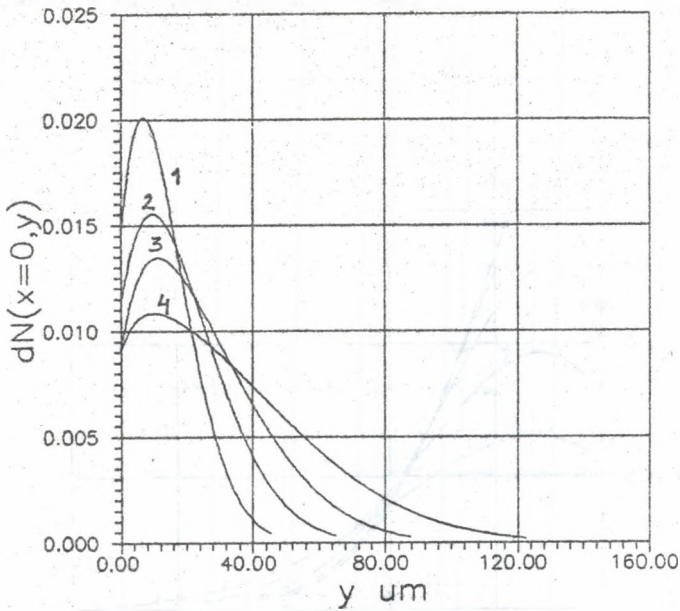
Rys.2 Falowody zagrzebane-rozkłady teoretyczne dla parametrów : szerokość okna- $37\mu\text{m}$; dyfuzja wstępna- $T=573\text{K}, t=4\text{h}$; wygrzewanie- $T=723\text{K}, t=2\text{h}$; zagrzebywanie- $T=643\text{K}$, 1- $t=1\text{h}$, 2- $t=2\text{h}$, 3- $t=4\text{h}$, 4- $t=8\text{h}$, 5- $t=16\text{h}$.

Fig.2 Burried waveguides-theoretical distributions for the technological parameters: window opening- $37\mu\text{m}$; preliminary diffusion- $T=573\text{K}, t=4\text{h}$; annealing- $T=723\text{K}, t=2\text{h}$; burrying- $T=643\text{K}$, 1- $t=1\text{h}$, 2- $t=2\text{h}$, 3- $t=4\text{h}$, 4- $t=8\text{h}$, 5- $t=16\text{h}$.

3. OPIS PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

Rozgałęziacze światłowodowe 1x2, 1x3, 1x4 wykonano w procesie o parametrach : dyfuzja wstępna - $t = 4\text{h}$, $T = 573\text{K}$; rozdyfundowanie - $t_1 = 2\text{h}$, $T_1 = 723\text{K}$; zagrzebanie - $t_2 = 1.5\text{h}$, $T_2 = 643\text{K}$. Szerokość okna wynosiła $37 \mu\text{m}$.

Geometrię rozgałęziaczy 1x2 , 1x3 , 1x4 przedstawia Rys.4. Na Rys.5 przedstawiono typowy obraz pola bliskiego na wyjściu rozgałęziacza 1x2.



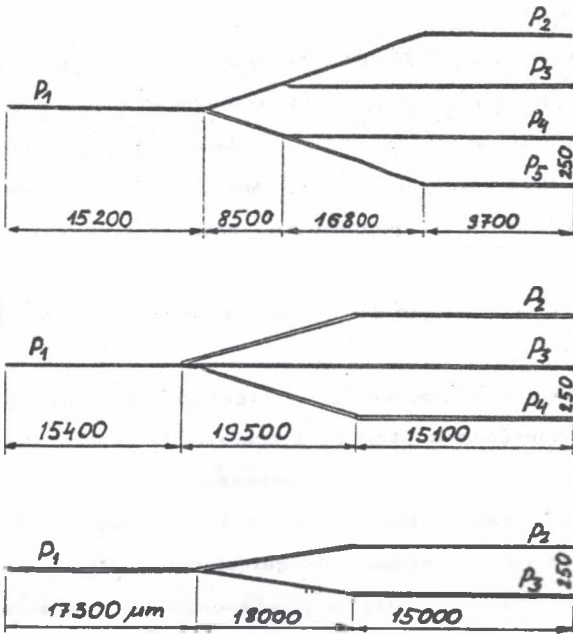
Rys.3 Falowody zagrzebane-rozkłady teoretyczne dla parametrów : szerokość okna- $37\mu\text{m}$; wygrzewanie- $T=723\text{K}$, 1- $t=1\text{h}$, 2- $t=2\text{h}$, 3- $t=4\text{h}$, 4- $t=8\text{h}$; zagrzebywanie- $T=643\text{K}, t=2\text{h}$.

Fig.3 Burried waveguides-theoretical distributions for the technological parameters:window opening- $37\mu\text{m}$; annealing- $T=723\text{K}$, 1- $t=1\text{h}$, 2- $t=2\text{h}$, 3- $t=4\text{h}$ 4- $t=8\text{h}$; burrying- $T=643\text{K}, t=2\text{h}$.

Osobnym problemem było rozwiązanie sposobu precyzyjnego justowania czołowych powierzchni światłowodów z włóknami optycznymi. W zaproponowanej w pracy metodzie do prowadzenia i umocowywania włókien wykorzystuje się struktury V-rowsków, wykonanych techniką chemicznego trawienia krzemu. Odpowiednio przygotowane struktury wykorzystywano następnie do sprzęgania włókien optycznych z rozgłęźnikami.

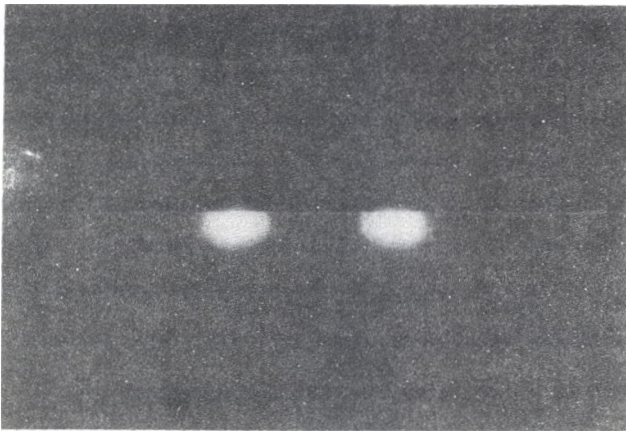
4. BADANIA MODELI LABORATORYJNYCH ROZGŁĘŻIONYCH

Badania rozgłęźniaczy światłowodowych obejmowały : pomiary rozkładu współczynnika załamania, geometrii, strat całkowitych oraz apertury numerycznej.



Rys.4 Topologia zaprojektowanych rozgaleźniaczy

Fig.4 Geometry of the considered dividers.



Rys.5 Pole bliskie na wyjściu rozgaleźniacza 1x2.

Fig.5 Near field at the divider 1x2 output.

Do pomiaru poprzecznego rozkładu wsp. załamania wybrano tzw. metodę pola bliskiego. Obraz płaszczyzny wyjściowej światłowodu rzutowany był za pomocą obiektywu mikroskopowego na widok kamery. Sygnał z kamery kierowany był na

wejście zbudowanego analizatora linii telewizyjnej. Za pomocą monitora podłączonego do analizatora linii TV można obserwować obraz światłowodu oraz wybrać fragment linii, która ma zostać poddana analizie fotometrycznej.

Prezentowany układ pomiarowy wykorzystano również do pomiaru geometrii światłowodów, równomierności podziału mocy oraz precyzyjnego sprzężenia i justowania. Wymiary geometryczne w przekroju poprzecznym światłowodów wynosiły 76 μ m i 51 μ m, co dość dobrze dopasowuje się do geometrii włókien optycznych.

Wyniki pomiarów strat całkowitych rozgałęziaczy, tj. strat sprzężenia, tłumienia materiałowego oraz strat na rozgałęzieniu zebrane są w tabelach 1 i 2. Światłowody sprzęgano cieczą imersyjną o wsp. załamania $n=1.515$. Osiągnięta wartość strat całkowitych około 3 dB stwarza dużą perspektywę na szersze zastosowania, zwłaszcza rozgałęziaczy o większym stosunku podziału - typu 1x4. Wyniki sugerują, że podstawowym źródłem strat są straty sprzężenia, które można jeszcze zmniejszać poprzez lepszy dobór parametrów procesu technologicznego.

Pomiary apertury numerycznej wykonano metodą pomiaru rozkładu kątego mocy w polu dalekim. Średnia wartość apertury numerycznej wynosiła 0.19 dla kierunku równoległego do powierzchni i 0.14 dla kierunku prostopadłego, co wynika z pewnej asymetrii otrzymanego rozkładu i zależy od sposobu pobudzania.

TABELA 1.

Wyniki pomiarów strat całkowitych 1x2

P_2	-	27.5 %
P_3	-	26 %
P_1	-	100 %

$$\alpha = -10 \log \left((P_2 + P_3) / P_1 \right) = 2.9 \text{ dB}$$

TABELA 2.

Wyniki pomiaru strat całkowitych 1x4

P_2	-	12.3 %
P_3	-	12.3 %
P_4	-	14.4 %
P_5	-	12.3 %
P_1	-	100 %

$$\alpha = -10 \cdot \log((P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / P_1) = 2.9 \text{ dB}$$

Wielkości P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 są zdefiniowane na Rys.4

LITERATURA

- [1] Białut M., Opilski A., Opilski Z., Rogoziński R.: Proc. of SPIE, vol 670, 250, (1986).
- [2] Jerominek H., Opilski Z., Kadziela J.: Optica Applicata, vol.13,159, (1983).
- [3] Izawa T., Nakagome H.: Appl. Phys. Lett., vol.21,584, (1972).
- [4] Walker R.G, Wilkinson C.D.W.: Appl. Opt., vol.22,1929, (1983).
- [5] Białut M., Opilski A., Opilski Z., Rogoziński R.: Materiały Konferencji Światłowodowy i ich zastosowania, Warszawa, (1989).

Recenzent: Doc. dr Zygmunt Surowiak

ГРАДЕНТНЫЕ СТЕКЛЯНЫЕ ВОЛНОВОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

К РАЗВЕТВИТЕЛЯМ NxN

Резюме

В этой работе представлена теория и технология градиентных стеклянных волноводов и их применения к разветвителям NxN.

Волноводы были изготовлены методом ионного обмена Ag^+ на Na^+ в трехступенном процессе диффузии.

В первом этапе проводилась диффузия ионов Ag^+ из расплавленной соли $AgNO_3$. Далее, волноводные структуры подвергались прогреву в высоких температурах (ограниченных температурой плавления стекла), что позволяло получать в короткое время глубокие диффузионные профили. В третьем этапе были изготовлены заглубленные волноводы, через селективную диффузию ионов Na^+ из расплавленной соли $NaNO_3$.

Используя описанную технологию получено различные типы разветвители с полными потерями ниже 3 дБ. В этой статье описаны их структура и свойства.

GRADIENT-INDEX PLANAR GLASS WAVEGUIDES AND THEIR APPLICATIONS TO A N-PORT BRANCHED CIRCUITS

S u m m a r y

In this paper theoretical and experimental investigations on the gradient-index glass waveguides and their applications to a N-port branched circuits are presented.

Waveguides were fabricated by Ag^+ Na^+ ion exchange in a three-step diffusion process.

At the first stage Ag^+ ions from the molten $AgNO_3$ salt were diffused to the alkali borosilicate glass substrate through the window area of the aluminium mask. After that, waveguide structures were annealed at high temperatures, which made it possible to obtain deep diffusion profiles in a short time (second stage). At the third stage buried waveguides are fabricated by the selective diffusion of Na^+ ions from molten $NaNO_3$.

Using this technology N-port branched circuits and star couplers were developed with total insertion loss $< 3dB$. In this paper their structure and properties are described.