

Marek BŁAHUT, Kazimierz GUT, Paweł KARASIŃSKI,
Aleksander OPILSKI, Zbigniew OPILSKI, Tadeusz PUSTELNY,
Roman ROGOZIŃSKI

WYBRANE ZASTOSOWANIA OPTYKI ŚWIATŁOWODOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane zastosowania optyki światłowodowej — rozgałęziacze światłowodowe $N \times M$, interferometr planarny w symetrycznej konfiguracji Macha-Zehndera i wielomodowy refraktometr planarny, wykonane monolitycznie na podłożowej płytce szklanej techniką wymiany jonowej, oraz czujniki światłowodowe podstawowych wielkości fizycznych — temperatury, przemieszczenia, siły, oparte w swym działaniu na światłowodowych włóknach optycznych.

FIBER OPTIC TECHNIQUES FOR SOME SENSOR APPLICATIONS

Summary. In the paper are presented same aspects of lighthwave optic applications — $N \times M$ waveguide beam splitter, planar Mach-Zender interferometer in symmetrical configuration and multimode planar refractometer. The fiber optic sensors of basic physical magnitudes — temperature, displacement, force are presented, too.

НЕКОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТЛОВОДОВОЙ ОПТИКИ

Резюме. В статье представлено некоторые аспекты использования элементов светлководовой оптики для конструкции некоторых приборов. Представлено интерферометр Мах-Зендере и планарный рефрактометр, а также различные светлководовые датчики.

1. Wstęp

Optyka światłowodowa jest w ostatnich piętnastu latach jedną z najintensywniej rozwijanych dziedzin fizyki technicznej i elektroniki. Ogromna liczba publikowanych prac naukowych i aplikacji sprawiła, że w obszarze jej zainteresowań wyodrębniły się samodzielne dziedziny badawcze, m.in. optyki obrazowej, sensorów optycznych, optyki zintegrowanej, telekomunikacji optycznej.

Prace badawcze w Zakładzie Akustooptoelektroniki prowadzone są w dwóch kierunkach — technologii elementów biernych optyki zintegrowanej, wykonanych monolitycznie na podłożowej płytce szklanej, oraz sensorów optycznych, wykonanych w oparciu o technologię światłowodowych wielomodowych włókien optycznych.

2. Wymiana jonowa w szklach

Wymiana jonowa jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną technologią wytwarzania gradientowych struktur światłowodowych. Poprzez odpowiedni wybór warunków technologicznych — rodzaju jonów domieszek, składu chemicznego szkła, jak również rozmiaru okna, czasu i temperatury procesu uzyskuje się struktury falowodowe jedno- i wielomodowe, których geometria i apertura numeryczna mogą się zmieniać w szerokim zakresie [1, 2]. Opracowane światłowody znalazły zastosowanie w technologii mikrosoczewek planarnych [3, 4], jedno- i wielomodowych elementów biernych optyki zintegrowanej [5, 6], oraz w technologii planarnych czujników światłowodowych pracujących w układach z modulacją amplitudy [7, 8, 9] i w układach interferencyjnych [10], wykonanych monolitycznie na podłożowej płytce szklanej. W obecnej pracy przedstawimy niektóre przykłady zastosowań techniki wymiany jonowej w szklach, opracowane w Zakładzie Akustooptoelektroniki Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej.

2.1. Teoretyczny opis procesu wymiany jonowej

2.1.1. Wymiana jonowa bez zewnętrznego pola elektrycznego

Podstawą każdego procesu wymiany jonowej jest zjawisko dyfuzji dwuskładnikowej [1]. W procesie tym jony podstawiane o koncentracji n_a zajmują miejsce jonów n_b , będących naturalnymi składnikami podłoża szklanego (zakładamy, że są to jedyne ruchliwe w danej temperaturze jony podłoża). Różnice polaryzowalności elektrycznej i rozmiarów promieni jonowych prowadzą do formowania się rozkładu współczynnika załamania proporcjonalnego do koncentracji wprowadzonych jonów n_a .

W analizie tego procesu rozważyć należy skierowany w głąb ośrodka strumień j_a jonów typu (a) i zwrócony w stronę powierzchni strumień j_b jonów typu (b):

$$\vec{j}_a = -D_a \cdot \nabla n_a + \mu_a \cdot \vec{E} \cdot n_a \quad (1)$$

$$\vec{j}_b = -D_b \cdot \nabla n_b + \mu_b \cdot \vec{E} \cdot n_b$$

gdzie μ_a , D_a , μ_b , D_b oznaczają odpowiednio ruchliwości i współczynniki dyfuzji jonów (a) i (b).

Natężenie wewnętrznego pola elektrycznego \vec{E} związane jest z różnicą ruchliwości wymiennianych jonów. Pole elektryczne \vec{E} przyspiesza dyfuzję jonów szybszych — jest więc czynnikiem sprzęgającym migrację obu typów jonów. Stan ustalony powstaje przy takiej wartości pola \vec{E} , dla której $\vec{j}_a = -\vec{j}_b$.

Uwzględniając w (1) warunek ciągłości oraz warunek neutralności elektrycznej otrzymuje się równanie dyfuzji dla jonów podstawianych:

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \frac{D_a \cdot n_0}{n_0 - (1-r) \cdot n_a} \cdot \nabla n_a \right\} \quad (2)$$

W którym n_0 jest koncentracją równowagową, $r = \mu_a/\mu_b$.

Na rys. 1 przedstawiono unormowane profile rozkładu współczynnika załamania falowodów planarnych, obliczone numerycznie na podstawie (2) dla różnych wartości parametru r . Zwraca uwagę bardzo istotna zależność charakteru rozwiązania od wartości tego parametru, związanego ściśle ze składem chemicznym szkła podłożowego [1].

2.1.2. Wymiana w obecności zewnętrznego pola elektrycznego

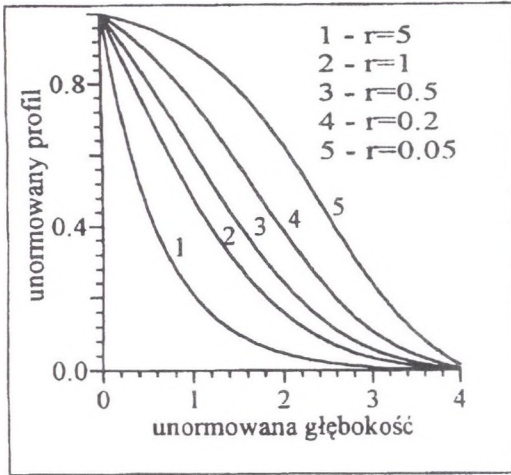
Procesem umożliwiającym kształtowanie głębokich profili zmian współczynnika załamania jest dyfuzja w obecności zewnętrznego stałego pola elektrycznego \vec{E}_z [1] (elektrodyfuzja).

Zewnętrzne pole elektryczne wymusza stały przepływ jonów w kierunku od płaszczyzny będącej w kontakcie ze źródłem domieszek do płaszczyzny zewnętrznej. Wypadkowy strumień jonów (prąd) jest sumą obu strumieni jonów typu (a) i (b):

$$\vec{j}_a = -D_a \cdot \nabla n_a + \mu_a \cdot (\vec{E} + \vec{E}_z) \cdot n_a \quad (3)$$

$$\vec{j}_b = -D_b \cdot \nabla n_b + \mu_b \cdot (\vec{E} + \vec{E}_z) \cdot n_b$$

gdzie \vec{E}_z oznacza natężenie zewnętrznego pola elektrycznego.



Rys. 1. Unormowane profile rozkładu dla dyfuzyjnych falowodów planarnych; głębokość falowodu w jednostkach $\sqrt{D_a \cdot t}$

Fig. 1. Normalized index distribution profiles for diffused planar waveguides; waveguides depth in $\sqrt{D_a \cdot t}$ units

W stanie ustalonym:

$$\vec{j}_a + \vec{j}_b = \mu_b \cdot n_0 \cdot \vec{E}_z = \vec{j}_0 \quad (4)$$

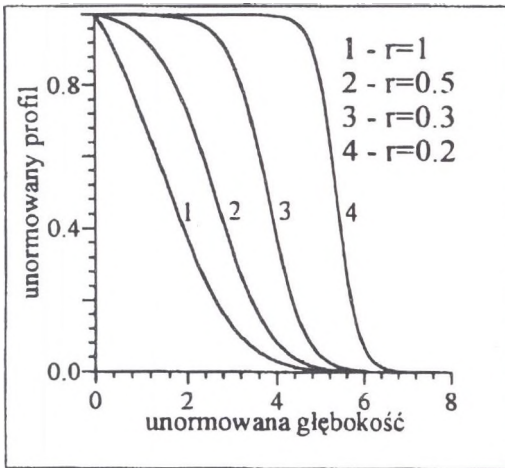
gdzie j_0 jest strumieniem jonów podłożowych w głębi szkła. Wykorzystując (4) oraz warunki ciągłości i neutralności elektrycznej otrzymujemy równanie opisujące proces elektrodyfuzji:

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = \nabla \left\{ \frac{D_a \cdot n_0}{n_0 - (1-r) \cdot n_a} \cdot \nabla n_a \right\} - \mu_a \cdot E_z \cdot \nabla \left\{ \frac{n_a}{n_0 - (1-r) \cdot n_a} \right\} \quad (5)$$

Rozwiązanie numeryczne tego równania dla jednowymiarowego przypadku falowodów planarnych dla różnych parametrów r przedstawia rys. 2. Wraz ze wzrostem r profil rozkładu współczynnika załamania zbliża się do profilu typu *step index*. Podobnie jak w przypadku profili dyfuzyjnych obserwujemy silną zależność rozkładu od parametru materialowego r .

2.1.3. Światłowodowe struktury zagrzebane

Technika wymiany jonowej umożliwia również uzyskiwanie struktur światłowodowych zagrzebanych, odseparowanych od powierzchni szkła drogą wielostopniowej dyfuzji jonów podwyższających, a następnie obniżających współczynnik załamania materiału podłożowego. W pracy [11] przedstawiono analizę czterech procesów technologicznych, podstawo-



Rys. 2. Unormowane profile rozkładu dla elektrodyfuzyjnych falowodów planarnych; głębokość falowodu w jednostkach $\sqrt{D_a \cdot t}$

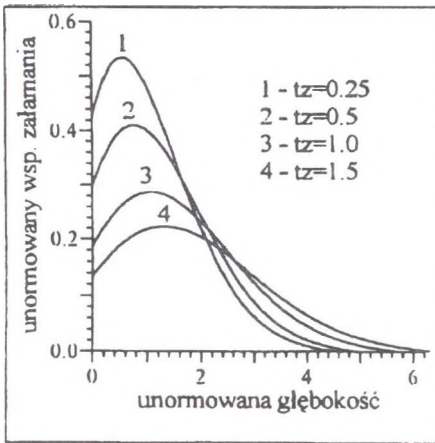
Fig. 2. Normalized index distribution profiles for electrodiffused planar waveguides: waveguide depth in $\sqrt{D_a \cdot t}$ units

wych dla wytwarzania światłowodów zagrzebanych. Dwa pierwsze dotyczyły profili rozkładu otrzymanych drogą wstępnej dyfuzji termicznej lub elektrodyfuzji jonów (a), które następnie zagrzebano drogą dyfuzji termicznej jonów (b). Dla pozostałych procesów wymiany zagrzebywanie początkowych profili rozkładu realizowano w procesie elektrodyfuzji jonów (b).

Na rys. 3 przedstawiono zależność unormowanego profilu rozkładu od czasu zagrzebywania t_z dla falowodów planarnych otrzymanych podczas dyfuzji wstępnej jonów (b). Zaproponowany w pracy [12, 13] parametr wymiany powierzchniowej S , będący funkcją rodzaju jonów domieszki i składu chemicznego szkła, opisuje szybkość wymiany powierzchniowej na powierzchni podłoża.

Wzrost czasu zagrzebywania wpływa na wartość maximum i rozmiar przestrzenny profilu rozkładu współczynnika załamania, w mniejszym stopniu na separację maximum od powierzchni podłoża.

Zagrzebywanie w procesie elektrodyfuzji jest popularną metodą wytwarzania w stosunkowo krótkim czasie głębokich i symetrycznych profili zmian współczynnika załamania [11]. Na rys. 4 przedstawiono typową zależność unormowanego profilu rozkładu od czasu zagrzebywania (w obecności pola elektrycznego $E_z = 30 \text{ V/mm}$) dla rozkładu otrzymanego w procesie dyfuzji wstępnej w czasie $t_D = 4 \text{ h}$.



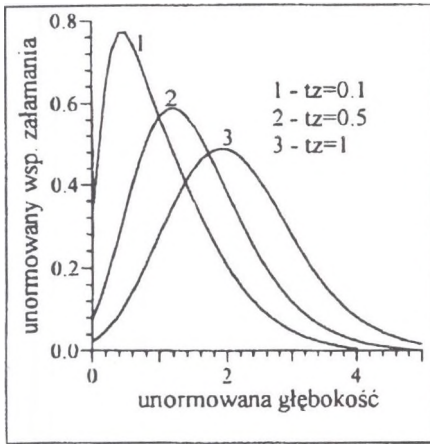
Rys. 3. Unormowane profile dyfuzyjne dla różnych czasów zagrzebienia dyfuzyjnego t_z (w h); głębokość w jednostkach $\sqrt{D_a \cdot t_D}$; $S = 1 \mu\text{m}/\text{h}$

Fig. 3. Normalized buried profiles for the different time of burying t_z (in h); depth in $\sqrt{D_a \cdot t_D}$ units; $S = 1 \mu\text{m}/\text{h}$

2.2. Wielomodowe rozgałęziacze światłowodowe NxM

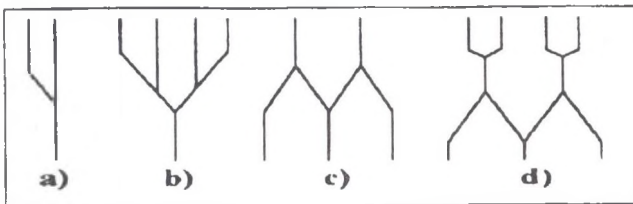
Rozgałęziacze światłowodowe $1 \times N$ i $N \times N$ są podstawowymi elementami układów optycznych optyki zintegrowanej i planarnych czujników światłowodowych, pracującymi jako przełączniki, separatory modów i dzielniki mocy. W pracach [2, 5, 6] przedstawiono technologię wielomodowych rozgałęziaczy światłowodowych wytwarzanych na bazie szkieł techniką wielostopniowej wymiany jonowej $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$, przystosowanych do współpracy z włóknami telekomunikacyjnymi.

Srebro jest popularnym materiałem powodującym zmiany współczynnika załamania $\Delta n \sim 0.1$ i umożliwiającym uzyskiwanie struktur wielomodowych już w temperaturach $> 473\text{K}$. Podstawową wadą tej wymiany jonowej jest stosunkowo duża tłumienność materiałowa, osiągająca wartość kilku dB/cm , związana z obecnością w szkle związków As, Fe. Redukcja jonów srebra przez jony tych pierwiastków powoduje 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. Dopiero zastosowanie jako podłoża szkła przygotowanego w procesie technologicznym wykorzystującym klarowanie mechaniczne [6] pozwoliło obniżyć tłumienność do poziomu poniżej $1 \text{ dB}/\text{cm}$. Topologię opracowanych rozgałęziaczy przedstawia rys. 5.



Rys. 4. Unormowane profile dyfuzyjne dla różnych czasów zagrzebania elektrodyfuzyjnego t_z (w h); głębokość w jednostkach $\sqrt{D_a \cdot t_D}$; $E_z = 30 \text{ V/mm}$

Fig. 4. Normalized buried profiles for the different time of burying t_z (in h); depth in $\sqrt{D_a \cdot t_D}$ units; $E_z = 30 \text{ V/mm}$



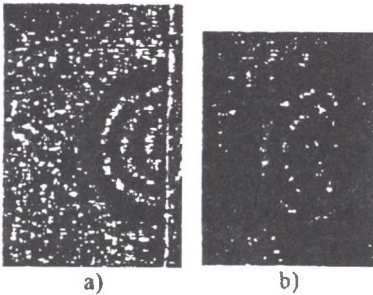
Rys. 5. Topologia rozgłęziaczy światłowodowych NxM

Fig. 5. The topology of NxM waveguide splitters

Rozgłęziacze wytwarzano techniką wielostopniową. W pierwszym etapie prowadzono dyfuzję jonów Ag^+ ze stopionego AgNO_3 w temperaturach ograniczonych temperaturą rozkładu soli. W drugim etapie otrzymane struktury rozdyfundowano w temperaturze wysokiej, uzyskując w stosunkowo krótkim czasie głębokie obszary zmian współczynnika załamania. W celu lepszego dopasowania falowodów paskowych do włókien optycznych i odseparowania od powierzchni przeprowadzono proces zagrzebywania drogą dodatkowej dyfuzji termicznej jonów Na^+ ze stopionego NaNO_3 .

Rozkład współczynnika załamania w poprzecznym przekroju światłowodu mierzono metodą interferencyjną. Metoda ta wymaga specjalnego przygotowania próbki w postaci „plasterka” (płytki) o grubości kilkudziesięciu μm . Fotograficznej rejestracji obrazu in-

terferencyjnego dokonano za pomocą mikroskopu interferencyjno-polarizacyjnego typu „Biolar PI”. Na rys. 6 a, b przedstawiono typowe obrazy interferencyjne dla falowodu otrzymanego w procesie o parametrach: dyfuzja wstępna przez maskę o szerokości $30\ \mu\text{m}$ w czasie $T=4\ \text{h}$ i temperaturze $T=573\ \text{K}$, rozdyfundowane (rys. 6 a) – $t=4\ \text{h}$, $T=723\ \text{K}$, zagrzebywanie (rys. 6 a) – $t=2\ \text{h}$, $T=673\ \text{K}$.



Rys. 6. Obraz interferencyjny powierzchni stałych wartości wsp. załamania falowodu paskowego

Fig. 6. Interferometric pattern of the surface of equal refractive index profiles for the channel waveguides



Rys. 7. Struktura V-rowków

Fig. 7. The V-grooves structure

Do prowadzenia, justowania i umocowania włókien optycznych do powierzchni czołowych światłowodów paskowych wykorzystywano struktury V-rowków, przygotowane techniką chemicznego trawienia krzemu. Na rys. 7 przedstawiono zdjęcie takiej struktury przystosowanej do geometrii telekomunikacyjnych włókien optycznych.

Badania rozgałęziaczy światłowodowych obejmowały pomiary strat całkowitych, tj. strat sprzężenia falowód paskowy — włókno optyczne, strat na rozgałęzieniu i tłumienności materiałowej oraz apertury numerycznej. Średnia wartość apertury NA wynosiła 0.19 dla kierunku równoległego do powierzchni i 0.14 dla kierunku prostopadłego, co wynika z pewnej asymetrii otrzymanego rozkładu. Wyniki pomiaru strat całkowitych oraz rozkładu mocy na wyjściu dla struktury rozgałęziacza 1×4 (rys. 5 b) przedstawia tabela 1.

Rozgałęziacz charakteryzował się tłumieniem całkowitym wynoszącym około 3.3 dB i dobrą równomiernością rozkładu mocy na wyjściu.

Rozkład pola bliskiego na wyjściu pracującego rozgałęziacza 1x4 przedstawiono na rys. 8.

Tabela 1

P(1)	29 %
P(2)	25 %
P(3)	25 %
P(4)	21 %



Rys. 8. Pole bliskie rozgałęziacza 1x4

Fig. 8. Near field of the 1x4 beam splitter

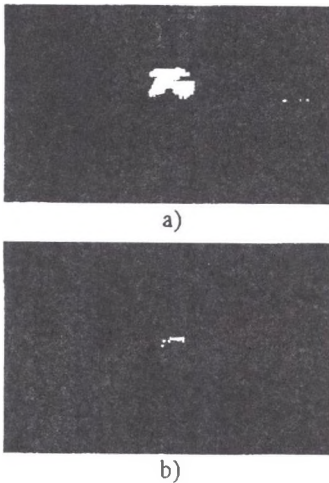
2.3. Interferometr planarny w konfiguracji Macha-Zehndera

Interferometry planarne Macha-Zehndera (M-Z) znalazły ważne zastosowania w jednomodowych obwodach optyki zintegrowanej w układach multidemultiplekserów i filtrów, rezonatorów optycznych (*ring resonator*), optycznych (*all optical*) przełączników paskowych i jednomodowych czujników światłowodowych. Optyczne własności takich interferometrów zależą od parametrów zastosowanego procesu technologicznego. W pracach [10, 14] przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem wymiany jonowej $K^+ - Na^+$ w szkłe BK-7 w technologii światłowodowej struktury paskowej w konfiguracji interferometru (M-Z). Badania obejmowały opracowanie technologii jednomodowych światłowodów paskowych i optymalizację geometrii interferometru planarnego.

Światłowodowy otrzymane drogą wymiany jonów K^+ z jonami Na^+ charakteryzują się małym tłumieniem materiałowym (poniżej 1dB/cm) i dużą stabilnością termiczną, a małą

zmiana współczynnika załamania ($\Delta n \sim 0.01$) wyróżnia ten proces w zastosowaniach jednomodowych.

Na rys. 9 przedstawiono obraz pola na wyjściu światłowodu paskowego uzyskanego podczas dyfuzji przez maskę $8 \mu\text{m}$ w czasie 10 h, pobudzonego światłem o długości odpowiednio: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ i 1300 nm . Uzyskane wyniki wskazują, że opisywana struktura jest kilkumodowa dla $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (obraz na wyjściu zależy od sposobu pobudzenia na wejściu) i jednomodowa dla $\lambda = 1300 \text{ nm}$. Opracowane elementy wykorzystano w technologii symetrycznego interferometru (M-Z).

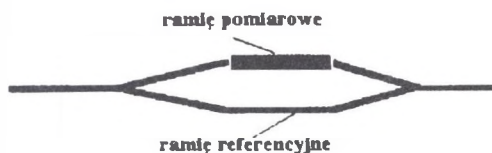


Rys. 9. Obraz pola bliskiego na wyjściu falowodu paskowego dla: a) $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$, b) $\lambda=1.3 \mu\text{m}$

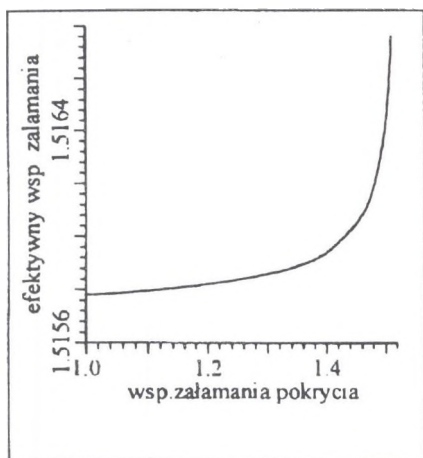
Fig. 9. Near field pattern of the channel waveguide output for: a) $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$, b) $\lambda=1.3 \mu\text{m}$

Topologię interferometru przedstawia rys. 10. Podstawowymi jego elementami są złącza światłowodowe typu Y, których konfiguracja geometryczna profilu rozkładu współczynnika załamania decyduje o jakości pracy całego urządzenia. Badania dotyczyły optymalizacji geometrii złącza Y w obszarze jego pracy jako separatora modów (małe kąty rozgałęzienia) i dzielnika mocy, dla konfiguracji symetrycznej, którą wybrano w perspektywie zastosowań czujnikowych.

Na rys. 11 przedstawiono [10], bardzo istotną dla projektowania jednomodowych czujników światłowodowych, zależność efektywnego współczynnika załamania modu falowego (dla $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) od współczynnika załamania pokrycia ramienia pomiarowego dla symetrycznego interferometru (MZ) otrzymanego w procesie dyfuzji (8 h) przez okno ($9 \mu\text{m}$).



Rys. 10. Konfiguracja planarnego interferometru Macha-Zahndera
 Fig. 10. The configuration of the planar Mach-Zahnder interferometr



Rys. 11. Zależność efektywnego wsp. załamania od wsp. załamania pokrycia w ramieniu pomiarowym.

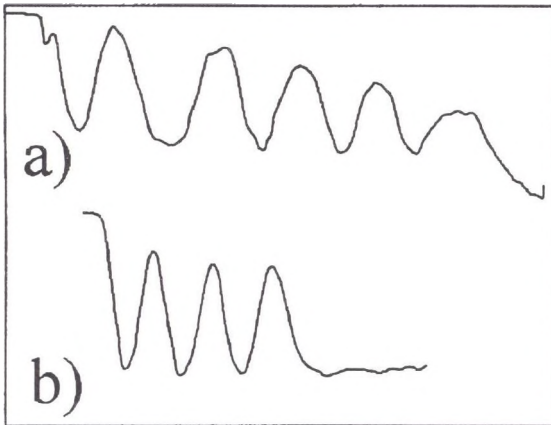
Fig. 11. The dependence of the effective index on the refractive index of the cover.

Obserwujemy bardzo silny wpływ pokrycia zwłaszcza w pobliżu punktu odcięcia modu falowodowego. Wyniki wykorzystano przy projektowaniu jednomodowego refraktometru planarnego.

Na rys. 12 przedstawiono typowe charakterystyki transmisyjne opracowanego refraktometru w zależności od długości ramienia pomiarowego, która zmieniała się w przedziale (0 - 17.5) mm, dla współczynnika załamania pokrycia $n=1.509$ i 1.503 . Uzyskana czułość pracy przetwornika $d\phi/dn$ (ϕ - różnica faz w ramieniu referencyjnym i pomiarowym) wynosiła 45 rad dla $n=1.33$ i 457 rad dla $n=1.49$.

2.4. Wielomodowy refraktometr planarny

Refraktometry światłowodowe oprócz pomiarów współczynnika załamania światła znajdują zastosowanie w pomiarach gęstości, temperatury cieczy i stężenia roztworów.

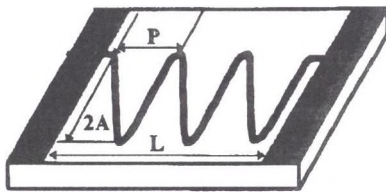


Rys. 12. Charakterystyki transmisyjne w zależności od długości ramienia pomiarowego (0 - 17.5) mm, dla współczynnika załamania pokrycia: a) $n=1.509$ i b) $n=1.503$

Fig. 12. Transmission characteristics as the function of the arm length (0 - 17.5) mm for the refractive index of the cover: a) $n=1.509$ and b) $n=1.503$

Są wykorzystywane jako przetworniki w czujnikach temperatury, odczynu pH oraz w czujnikach gazów. W pracach [7, 8, 9, 15] przedstawiono zastosowanie wymiany jonowej $Ag^+ - Na^+$ w szkle borokrzemowym do wytwarzania wielomodowego refraktometru planarnego. Badania obejmowały wpływ czynników technologicznych (czasy wygrzewania i szerokość maski użytej w procesie fotolitografii) i geometrycznych (długość odcinka oddziaływania, liczba i amplituda zaburzeń) wytwarzanych struktur na charakterystyki refraktometru.

Konfiguracja przetwornika refraktometru planarnego przedstawiona jest na rys. 13.



Rys. 13. Konfiguracja przetwornika

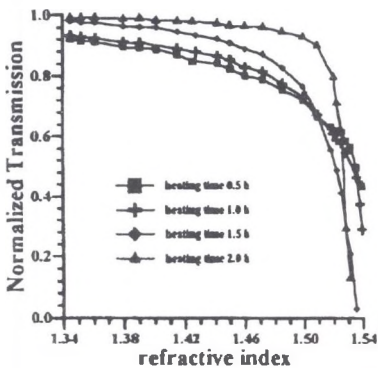
Fig. 13. The configuration of the transducer

Zasadniczym jego elementem jest światłowód paskowy maskowany poza obszarem pomiarowym (oknem) odpowiednią warstwą dielektryczną. Zmiany współczynnika załamania pokrycia w obszarze okna wpływają na tłumienie sygnału w torze pomiarowym. Faliwód w obszarze pomiarowym o długości L ma kształt wolnozmiennnej sinusoidy o parametrach P (okres) i A (amplituda). Pofalowanie światłowodu, podobnie jak w przypadku

czujnika mikrozgięciowego na włóknach optycznych [16], indukuje sprzężenie pomiędzy prowadzonymi modami, w wyniku którego następuje przepływ energii do modów najsilniej oddziaływających z pokryciem. Mechanizm ten wpływa na wielkość wprowadzonej mocy i czułość pracy przetwornika.

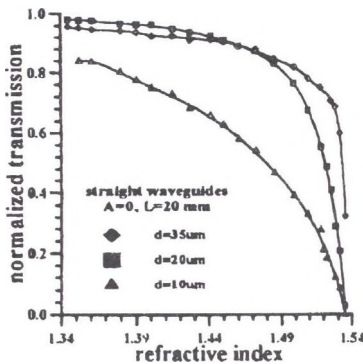
Światłowody wykonywano w procesie obejmującym dyfuzję wstępną jonów Ag^+ ze stopionego AgNO_3 w czasie 4 h i w temperaturze 573 K, przez maski o różnych szerokościach otwarcia, oraz wygrzewanie (w czasie od 0.5 h - 2 h) w temperaturze 723 K.

Wytwarzane struktury planarne maskowano warstwą gumy silikonowej SILGEL 600. Na otrzymywanych charakterystykach można wyróżnić dwa zakresy. Pierwszy, o stosunkowo małym nachyleniu charakterystyki, odpowiadający niższym wartościom współczynnika załamania, oraz drugi, dla wyższych wartości współczynnika załamania (bliższych odcięcia), w którym nachylenie rośnie gwałtownie. Dla zakresu pierwszego oddziaływanie światła z pokryciem realizuje się głównie poprzez pole propagujących się modów wnikaających do niego (*evanescent fields*). Zakres drugi dotyczy wartości współczynników załamania bliskich punktom odcięcia modów falowodowych, których energia poczynając od modów wyższych rzędów wprowadzona jest do otoczenia.



Rys. 14. Wpływ czasu wygrzewania na charakterystyki przetwornika $A=0$, $L=20$ mm
Fig. 14. Characteristics for different times of hesting $A=0$, $L=20$ mm

Wpływ czasu rozdyfundowania na otrzymane charakterystyki transmisyjne $T(n)$, dla światłowodów paskowych ($A=0$) wytworzonych przez maskę aluminiową o szerokości $d=20 \mu\text{m}$, pokazano na rys. 14. Unormowana transmisja $T(n)$ zdefiniowana jest jako stosunek sygnału pomiarowego do wartości sygnału, gdy pokryciem jest powietrze ($n=1$). Wspólnym procesem technologicznym dla wszystkich struktur była czterogodzinna dyfuzja w temperaturze 573 K. W zależności od czasu wygrzewania zmienia się wartość wsp. załamania odpowiadającego punktowi odcięcia; od wartości 1.532 dla czasu wygrzewania 2 godziny, do wartości 1.540 dla czasu wygrzewania 0,5 godziny.



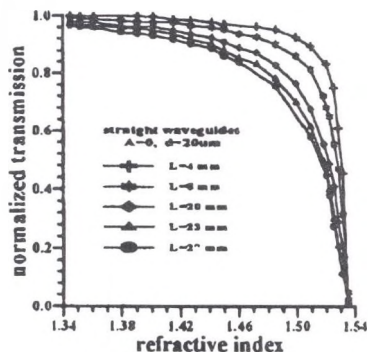
Rys. 15. Wpływ szerokości użytej maski na charakterystyki przetwornika
 Fig. 15. Characteristics for different mask widths

Wpływ szerokości użytej maski w procesie technologicznym na otrzymane charakterystyki refraktometru przedstawia rys. 15. Światłowody paskowe ($A=0$, $L=20$ mm) otrzymano w procesie o parametrach – dyfuzja wstępna $T=573$ K, $t=4$ h, wygrzewanie $T=723$ K, $t=1.5$ h. Szerokość maski wpływa na wartość punktu odcięcia i wielkość obszaru oddziaływania z pokryciem. W związku z tym obserwujemy wpływ tego parametru na oba omawiane powyżej zakresy pomiarowe.

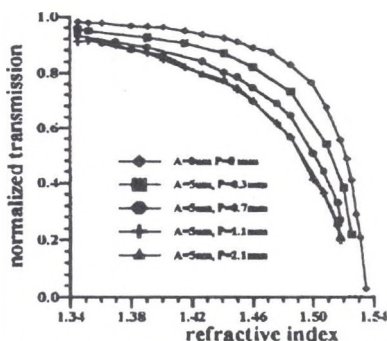
Na rys. 16 przedstawiono wpływ długości odcinka oddziaływania na charakterystyki transmisyjne $T(n)$ w przypadku prostych ($A=0$) światłowodów paskowych. Badane struktury wytwarzane były w czterogodzinnej dyfuzji w temperaturze 723 K przez 1.5 godziny. Ze względów technologicznych przebadano falowody paskowe o długościach odcinka oddziaływania od 4 mm do 27 mm. Wzrost długości obszaru pomiarowego zwiększający całkowitą wartość tłumienia fali wpływa na dynamikę zmian unormowanej transmisji światłowodu.

Badania struktur pofalowych, przeprowadzone dla falowodów otrzymanych w procesie: dyfuzji wstępnej ($T=671$ K, $t=4$ h) i rozdyfundowania ($t=1.5$ H), dotyczyły wpływu amplitudy, okresu oraz liczby zaburzeń. Badania charakterystyk transmisyjnych $T(n)$ przeprowadzone w 20 mm obszarze oddziaływania dla różnych amplitud pofalowania ($A=5$, 10, 15 i 20 μm) wykazały brak zależności unormowanej transmisji przetwornika od amplitudy pofalowania. Wyniki badań wpływu liczby zaburzeń w obszarze oddziaływania na otrzymane charakterystyki $T(n)$ przedstawiono w pracy [9].

Badania nad określeniem wpływu okresu pofalowania były prowadzone na światłowodach paskowych wytwarzanych przez maski o szerokości 20 μm , pofalowanych z amplitudą 5 μm na 20 mm odcinku oddziaływania. Przebadano światłowody paskowe o okresie po-



Rys. 16. Wpływ długości odcinka oddziaływania na charakterystyki przetwornika
 Fig. 16. Characteristics for different lengths of the interaction section



Rys. 17. Wpływ zaburzenia falowodu na charakterystyki przetwornika
 Fig. 17. Characteristics for wavy waveguides and a straight strip

falowania zmieniającym się w granicach od 0.1 mm do 2.2 mm co 0.1 mm. Wybrane przebiegi przedstawiono na rys. 17. Dla okresów zaburzenia od 0.1 mm do 1.1 mm otrzymane charakterystyki w coraz większym stopniu odseparowują się od charakterystyki światłowodu prostego. Dla okresów pofalowania powyżej 1.1 mm nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy otrzymanymi przebiegami charakterystyk przetwornika.

Dla światłowodów paskowych odległości pomiędzy stałymi propagacji w przestrzeni wektorów falowych od modu do modu są różne [1]. Tak więc efektywnemu sprzężaniu pomiędzy poszczególnymi parami prowadzonych modów będą odpowiadać różne okresy

pofalowania światłowodu [16]. Jest to przyczyną tego, że dla okresów pofalowania od 1 mm do 2 mm są otrzymywane takie same charakterystyki refraktometru.

Z porównania czułości $dT(n)/dn$ przetworników z falowodem pofalowanym z przetwornikami z falowodem prostym [9] wynika, że pofalowanie powoduje wzrost czułości w pierwszym zakresie pomiarowym. Dla wartości współczynników załamania bliskich odcięcia większą czułość wykazują przetworniki z falowodem prostym.

3. Czujniki światłowodowe na bazie wielomodowych światłowodów włóknistych

Sensory na włóknach światłowodowych często klasyfikuje na jednomodowe i wielomodowe, w zależności od tego, jaki rodzaj włókna (jedno- czy wielomodowe) stosuje się do pomiaru określonej wielkości fizycznej.

Dlatego ta grupa w literaturze jest określana jako czujniki amplitudowe lub natężeniowe [17]. Czujniki jednomodowe stosowane są w takich układach pomiarowych, w których odpowiedzią na zmiany wielkości fizycznej jest zmiana fazy fali lub zmiana jej płaszczyzny polaryzacji. Układy jednomodowe są znacznie droższe od układów wielomodowych. Pozwalają jednak na uzyskanie doskonałości pomiaru nieosiągalnej dla tych pierwszych [18].

Bardzo ważnym problemem wszystkich czujników natężeniowych są zmiany sygnału wynikające ze zmian w ułożeniu kabla światłowodowego, generalnie – wszelkie zakłócenia i zmiany warunków zewnętrznych, nie związane ze zmianami wielkości mierzonej. W torze odbiorczym mogą zostać zinterpretowane jako zmiany sygnału pomiarowego. W systemach światłowodowych czujników natężeniowych wyeliminowanie tego typu źródeł błędów często wiąże się z koniecznością stosowania toru referencyjnego wrażliwego tylko na zmiany zewnętrznych warunków propagacji, niewrażliwego zaś na sygnał pomiarowy [19]. Komplikuje to układ, lecz pozwala na ograniczenie wpływu zewnętrznych czynników zakłócających.

Innym skutecznym sposobem ograniczania zewnętrznych czynników zakłócających jest stosowanie zarówno w torze nadawczym, jak i odbiorczym mieszaczy modów.

O natężeniu światła w detektorze decydują zarówno mody rdzeniowe, jak i mody płaszczowe, propagujące się w płaszczu i na granicy rdzeń-płaszcz. To przede wszystkim mody płaszczowe są wrażliwe na zewnętrzne warunki propagacji. Zastosowanie mieszaczy eliminuje w dużym stopniu mody płaszczowe, ograniczając wpływ zewnętrznych czynników zakłócających na dokładność pomiaru.

W tej części pracy przedstawiono niektóre z opracowanych w Zakładzie Akustooptyki Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej światłowodowych czujników wielomodowych. Wiele opracowań ma charakter oryginalny i prototypowy. Niektóre z czujników znalazły już praktyczne zastosowania.

3.1. Sensory temperatury

3.1.1. Czujniki zgięciowe

W światłowodzie, jeżeli poddać go deformacji, obserwuje się dodatkowe straty energii, tzw. straty zgięciowe. Straty te są związane z wypromieniowywaniem energii świetlnej z rdzenia do płaszczu i do ośrodka zewnętrznego. Wielkość strat zgięciowych jest zależna od promienia zgięcia, a także od własności optycznych samego światłowodu – przede wszystkim od różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszczu [18, 19]. Dla celów czujnikowych światłowód zagina się w postaci pętli o promieniu około 1 mm. Pętlę umieszcza się w materiale wykazującym silną zależność współczynnika załamania od temperatury. Wraz ze zmianami temperatury wzrasta ilość energii wypromieniowywanej ze światłowodu do ośrodka otaczającego pętlę.

Silne efekty temperaturowe typu mikrozgięciowego obserwuje się na światłowodach o rdzeniu ze szkła kwarcowego i o pokryciu polimerowym.

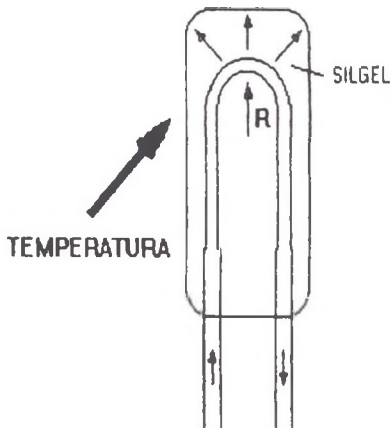
Idea czujnika mikrozgięciowego została przedstawiona na rys. 18.

Na bazie światłowodowego czujnika zgięciowego został opracowany i wykonany system pomiaru temperatury oleju w transformatorach energetycznych na stanowisku laboratoryjnym. System pozwala na pomiary temperatury w zakresie od -30°C — $+150^{\circ}\text{C}$. Górny zakres pomiarowy wynika z maksymalnej możliwej temperatury oleju transformatorowego w czasie awarii w transformatorze lub awarii w systemie energetycznym.

W czujniku zastosowano światłowód o średnicy rdzenia $200\ \mu\text{m}$ oraz płaszczu $300\ \mu\text{m}$ i skokowej zmianie współczynnika załamania. Zastosowano światłowody o podwyższonej odporności termicznej, pozwalające na pracę ciągłą w temperaturze 200°C . Światłowody wykonano w Pracowni Światłowodów Uniwersytetu Lubelskiego. Pętlę o średnicy wewnętrznej $0.7\ \text{mm}$ umieszczono w odpowiednio przygotowanej żywicy typu SILGEL wykazującej silną zależność współczynnika załamania od temperatury.

Element termoczuły znajdował się w szklanej osłonie w celu zabezpieczenia go przed uszkodzeniami mechanicznymi, a także w celu ochrony przed szkodliwym działaniem oleju transformatorowego.

Na rys. 19 została przedstawiona zależność natężenia światła w torze odbiorczym od temperatury. Natężenie jest unormowane do wartości natężenia w temperaturze 0°C .



Rys. 18. Idea zgięciowego czujnika temperatury
Fig. 18. The idea of bending fiber optic sensor

Wadą czujników zgięciowych jest, że termoczule żywice pokrywające pętle podlegają długoczasowemu procesowi ustalania własności optycznych. Proces ten trwa nawet kilka tygodni.

W zakresie temperatur wyższych jako czujniki stosuje się światłowody wygięte w pętlę o średnicy kilku milimetrów bez specjalnego pokrywania pętli materiałem termoczulym.

Czasami dla zwiększenia czułości stosuje się pętle o kilku zwojach.

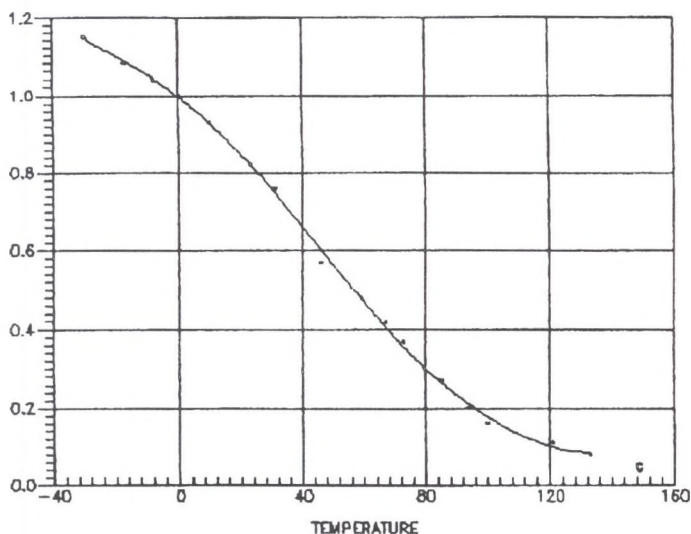
Na podstawie doniesień literaturowych wynika, że przy zastosowaniu odpowiednich pokryć można tego typu czujniki zastosować do pomiaru temperatury do ok. 400°C [23].

3.1.2. Czujniki półprzewodnikowe

W czujnikach półprzewodnikowych wykorzystywana jest temperaturowa zależność absorpcji światła w półprzewodnikach. Niektóre związki półprzewodnikowe wykazują silny wpływ szerokości przerwy energetycznej od temperatury. Wraz z temperaturą silnie zmienia się wtedy współczynnik absorpcji światła.

Długość fali świetlnej λ_g , odpowiadająca krawędzi absorpcji, zmienia się ze wzrostem temperatury w kierunku fal dłuższych. Jeżeli jako źródła światła użyć diody elektroluminescencyjnej, której widmo promieniowania przypada na zakres zmian λ_g , to natężenie światła przechodzącego przez półprzewodnik maleje ze wzrostem temperatury [20].

Odpowiednio dużą wrażliwość krawędzi absorpcji od temperatury w zakresie widmowym diod elektroluminescencyjnych wykazują niektóre półprzewodniki grupy III-V, między innymi GaAs oraz InP.



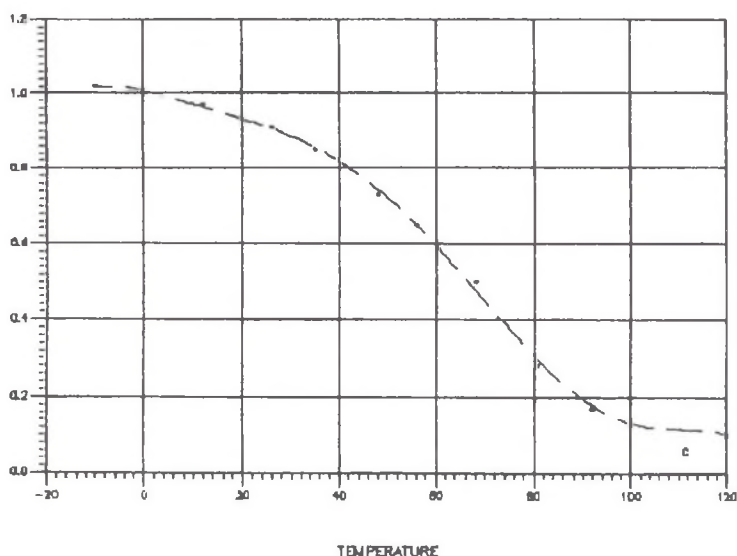
Rys. 19. Natężenie światła w funkcji temperatury dla czujnika zgięciowego
Fig. 19. Temperature dependance of the light intensity for the bending sensor

Na rys. 20 przedstawiono zależność natężenia światła po przejściu przez półprzewodnik od temperatury. Natężenie jest wyrażone w jednostkach względnych, unormowanych do wartości natężenia dla 0°C.

Z rys. 20 wynika, że natężenie jest silnie nieliniową funkcją temperatury. Możliwy do wykorzystania zakres temperatury: od ok. 0°C do ok. 130°C. Czujnik półprzewodnikowy został zbadany na stanowisku laboratoryjnym WAT do pomiaru temperatury cieczy łatwo palnych.

3.1.3. Czujniki luminescencyjne

Luminescencyjne czujniki temperatury stanowią grupę sensorów, w których wykorzystuje się wpływ temperatury na własności fluorescencyjne i fosforescencyjne niektórych fosforów krystalicznych. Przejściu światła przez substancję luminescencyjną towarzyszy zjawisko emisji wtórnej światła o rozkładzie widmowym innym niż widmo światła pobudzającego. Zarówno widmo, jak i natężenie promieniowania wtórnego zależą silnie od składu chemicznego luminoforu. Niewielkie ilości domieszek mogą czasami w zdecydowany sposób zmienić jego charakterystykę widmową i zdolność emisyjną [21]. O własnościach optycznych danego luminoforu decyduje jego temperatura.



Rys. 20. Natężenie światła w funkcji temperatury dla czujnika półprzewodnikowego
 Fig. 20. Temperature dependance of the light intensity for the semiconductor sensor

Dla luminoforów krystalicznych opartych na bazie ZnS oraz ZnCd wpływ temperatury na charakterystykę widmową i natężenie promieniowania obserwuje się w zakresie od 200 K do 700 K [22].

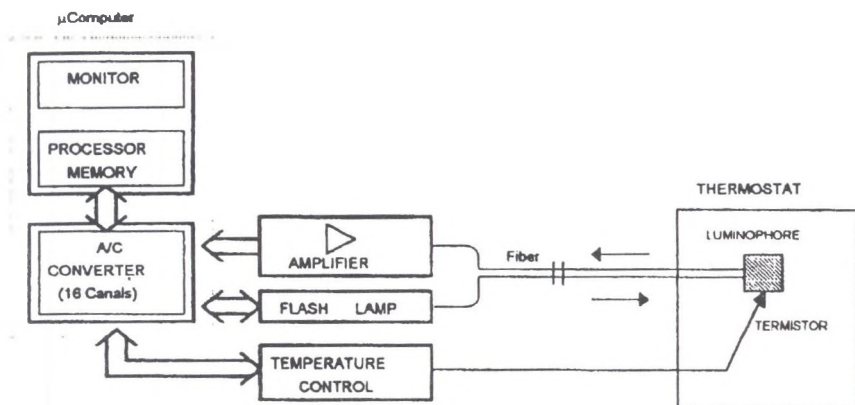
W pierwszych luminescencyjnych sensorach temperatury jako termoczuły materiał były stosowane tlenki ziem rzadkich, między innymi tlenki lantanu i tlenki gadolinu aktywowane europem.

Do określania temperatury wykorzystywano pomiary spektralne. Idea oparta była na wyznaczeniu stosunku natężeń dla dwóch długości fali λ_1 oraz λ_2 z charakterystyki emisyjnej luminoforu. W widmie emisyjnym można wybrać długości fali, których stosunek jest jednoznaczną, monotoniczną funkcją temperatury [22]. Idea ta jest znana — w oparciu o tę zasadę działają pirometry dwubarwowe. Systemy i układy pomiarowe wykorzystujące tego typu sensor są skomplikowane i drogie. Utrudniło to stosowanie ich na szerszą skalę.

W nowej generacji fosforescencyjnych światłowodów — sensorów temperatury wykorzystuje się wpływ temperatury na szybkość zaniku sygnału luminescencji [22, 23]. Wykonany na bazie ZnS oraz ZnCd luminofor, pobudzony krótkim (kilkumilisekundowym) impulsem świetlnym w dolnym zakresie widma widzialnego i w nadfiolecie, emituje światło w zakresie widzialnym i podczerwieni. Z reguły dla luminoforów krystalicznych maksimum natężenia luminescencji przypada na zakres ok. 500 – 600 nm. Szybkość zaniku natężenia luminescencji zależy od temperatury luminoforu.

Wykorzystanie stałej czasowej zaniku luminescencji jako miary temperatury powoduje, że sensor tego typu, mimo że wykonany w technice układów wielomodowych, nie jest czujnikiem natężeniowym. Nie wykazuje wad tego typu sensorów, między innymi nie jest wrażliwy na straty zgięciowe i na zmiany warunków zewnętrznych toru światłowodowego.

Na rys. 21 przedstawiono ideę stanowiska pomiarowego.

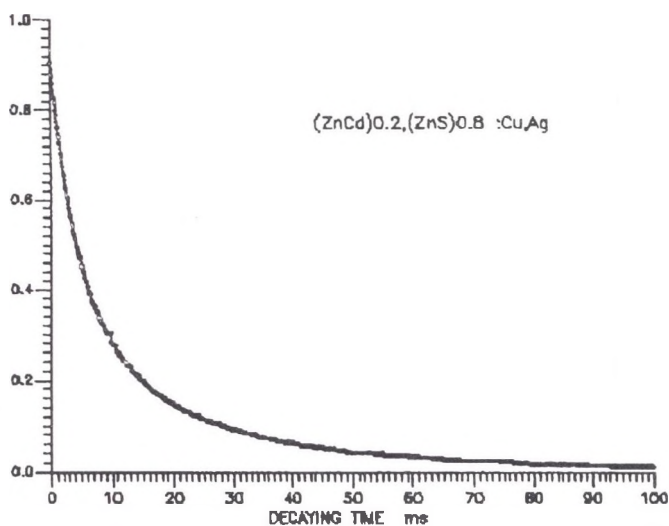


Rys. 21. Stanowisko do badania termicznych własności luminoforów

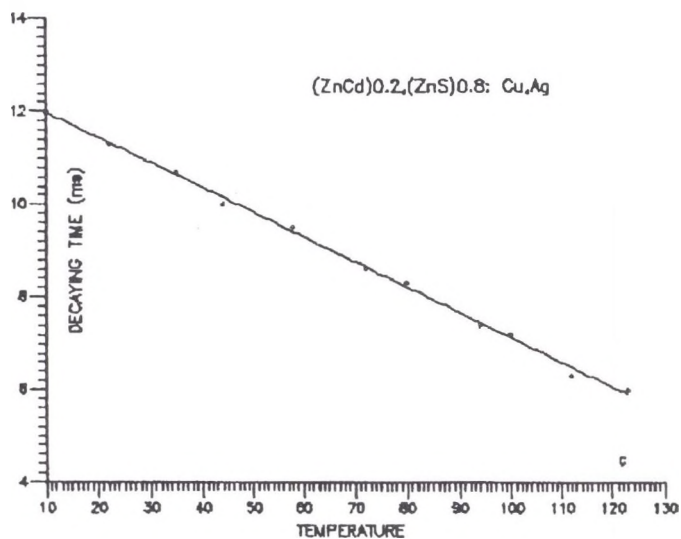
Fig. 21. The idea of the measuring station for temperature investigation of luminescent materials

Światło lampy błyskowej torem światłowodowym oświetla luminofor. Drugim światłowodem sygnał luminescencji wraca do mikroprocesorowego układu detekcyjnego, gdzie na jego podstawie zostaje wyznaczona temperatura.

Rys. 22 przedstawia przykładowy przebieg zaniku świecenia luminoforu $(\text{ZnCd})_{0,2}(\text{ZnS})_{0,8}$: Ag, Cu w temperaturze ok. 20°C . Stała czasowa τ zaniku jest miarą temperatury T . Na rys. 23 przedstawiono zależność stałej zaniku τ w funkcji temperatury luminoforu dla $(\text{ZnCd})_{0,2}(\text{ZnS})_{0,8}$: Ag, Cu.



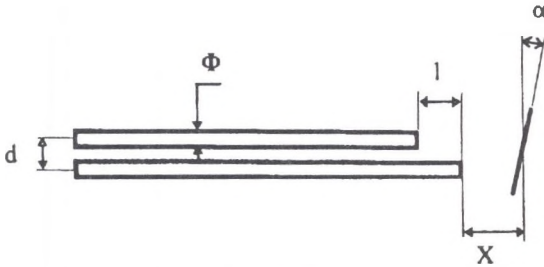
Rys. 22. Przebieg zaniku luminescencji
 Fig. 22. Time decating of phosphorescent signal



Rys. 23. Stała czasowa zaniku luminescencji w funkcji temperatury
 Fig. 23. Time decating constance as the function of temperature

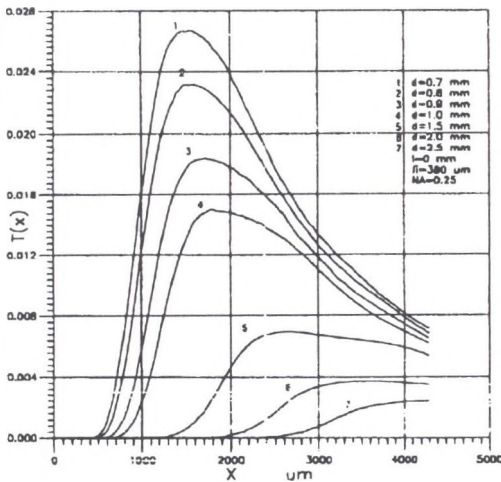
3.2. Światłowodowy czujnik przemieszczenia

Idea czujnika przemieszczenia oparta jest na pomiarze transmisji światła pomiędzy dwoma światłowodami: nadawczym i odbiorczym. Na drodze pomiędzy nimi światło ulega odbiciu od zwierciadlanej powierzchni, której przemieszczenia są mierzone jak na rys. 24. W niektórych rozwiązaniach jeden i ten sam światłowód jest jednocześnie światłowodem nadawczym i odbiorczym.



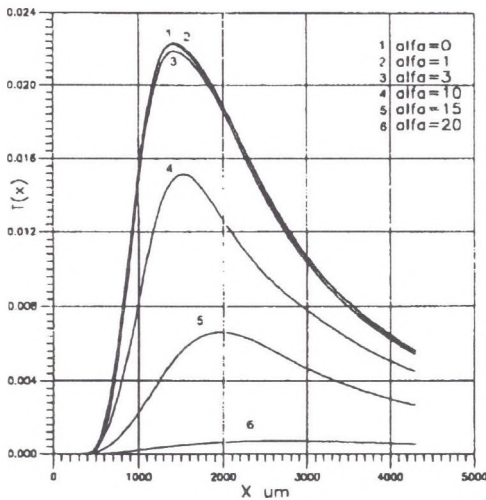
Rys. 24. Geometria światłowodowego czujnika przemieszczenia
Fig. 24. The geometry of the fiber optic sensor

Wielkość transmisji zależy od wielu czynników, między innymi od odległości x pomiędzy światłowodami a powierzchnią odbijającą. Zależność ta wykorzystywana jest w czujnikach przemieszczenia.



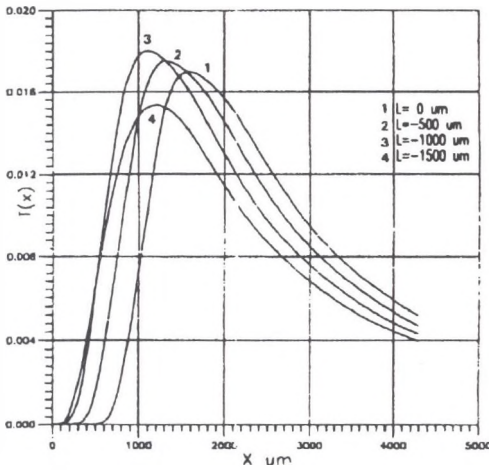
Rys. 25. Charakterystyka transmisyjna czujnika
Fig. 25. The transmission vs. displacement

Transmisja światła w takim układzie jest jednak funkcją wielu innych parametrów, takich jak: współczynnik odbicia światła od zwierciadła, charakteru odbicia, własności ośrodka w objętości pomiarowej, tzn.: współczynnika załamania, współczynnika tłumienia, geometrii układu pomiarowego, tzn.: odległości osi światłowodów d , wzajemnego przesunięcia światłowodów l , kąta pochylenia zwierciadła α , oraz wielkości charakteryzujących światłowody: ich średnicy f_i , apertury numerycznej NA , a także rozkładu kąтового natężenia światła emitowanego ze światłowodu nadawczego. Poniżej przedstawiono wyniki badań czujnika przemieszczenia zbudowanego w oparciu o krajowy światłowod typu PCS o średnicy $f_i=380$ μm i aperturze numerycznej $NA=0.25$. Badania przeprowadzono w układzie jak na rys. 24. Wykresy te przedstawiają zależność transmisji T od przemieszczenia x . Na kolejnych wykresach zmianom ulegały różne parametry, i tak na rys. 25 była to odległość światłowodów d , na rys. 26 parametrem jest kąt pochylenia zwierciadła α , natomiast na rys. 27 parametrem jest wielkość wyprzedzenia światłowodu l .



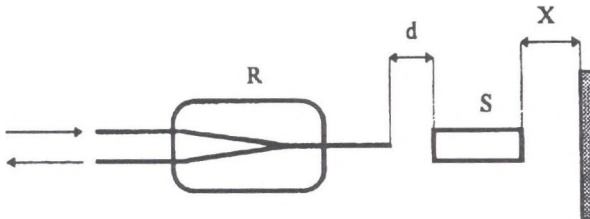
Rys. 26. Wpływ pochylenia zwierciadła na charakterystykę przemieszczeniową
Fig. 26. The mirror tilting influence on transmission vs. displacement

Widać, że parametr d może zostać użyty do zmian czułości i położenia punktu pracy, który wybiera się w środku narastającej części charakterystyki. Z rys. 26 widać, że należy kontrolować prostopadłość zwierciadła z dokładnością około 1 stopnia, by parametr ten nie miał wpływu na wynik pomiaru odległości. Zmiana parametru l pozwala natomiast przesunąć punkt pracy czujnika. Ze wszystkich wykresów widać, że maksymalna transmisja przekracza 3%.



Rys. 27. Wpływ parametru L na charakterystykę przemieszczeniową
 Fig. 27. The transmission vs. displacement for the different parameter L

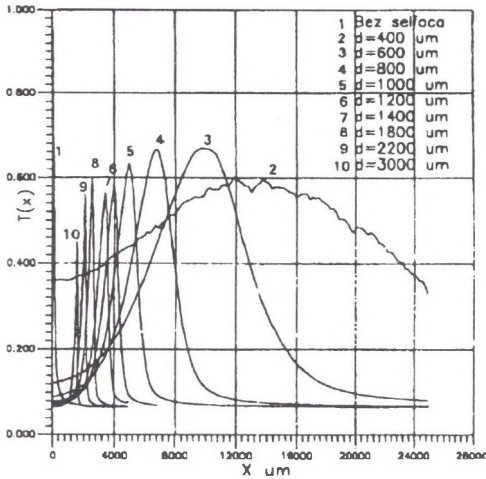
Na rys. 28 przedstawiono schemat optyki światłowodowej czujnika przemieszczenia z soczewką gradientową typu SELFOC.



Rys. 28. Schemat optyki czujnika światłowodowego zbudowanego w oparciu o soczewkę gradientową typu SELFOC

Fig. 28. The scheme of the fiber optic sensor based on a SELFOC lens

Zastosowanie tej soczewki w układzie optycznym czujnika pozwala zwiększyć maksymalną transmisję oraz stwarza możliwość wygodnego manewrowania położeniem punktu pracy, zakresem pomiarowym czy czułością przemieszczeniową czujnika za pomocą ogniskowej soczewki, jej odległości od końca włókna oraz średnicy światłowodu f_i . Na rys. 29 przedstawione zostały charakterystyki transmisji $T(x)$ w zależności od zmian odległości d przy zastosowaniu standardowego włókna telekomunikacyjnego i soczewki o $P=0.23$.



Rys. 29. Wpływ parametru d na charakterystykę przemieszczeniową
 Fig. 29. The transmission vs. displacement for the different parameter d

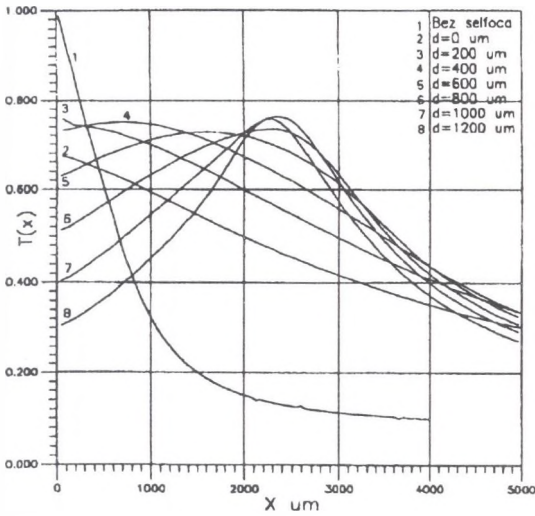
Rys. 30 przedstawia te same charakterystyki dla włókna typu PCS o średnicy $f_i = 400 \mu\text{m}$.

Widać, że w przedstawionym układzie maksymalna transmisja wzrosła do około 70% oraz zwiększyły się możliwości zmiany zakresu pomiarowego. W oparciu o zmodyfikowany układ optyki światłowodowej, przedstawiony na rys. 31, zrealizowany został model użytkowy czujnika przemieszczenia. Układ ten składa się z pary światłowodów stanowiących tor pomiarowy i oddzielnej pary toru odniesienia.

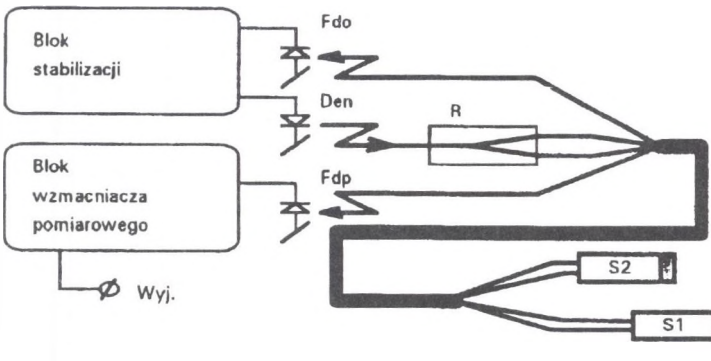
Światło jest wprowadzone do układu za pomocą diody elektroluminescencyjnej Den. W rozgałęziaczu R zostaje rozdzielone pomiędzy obydwa tory. Po przebyciu kabla światłowodowego światło toru pomiarowego oświetla soczewkę gradientową S1. Soczewka ta formuje pomiarową wiązkę światła (wpływając na jej kąt rozbieżności).

Po odbiciu od ruchomej powierzchni zwierciadlanej światło przechodzi ponownie przez soczewkę i oświetla światłowód, na końcu którego znajduje się fotodioda odbiorcza Fdp. Charakterystyka pracy czujnika $U(x)$ przedstawiona została na rys. 32.

Zadaniem toru odniesienia ułożonego w tym samym kablu światłowodowym jest kompensacja strat mocy świetlnej powodowanej fluktuacjami w pracy diody elektroluminescencyjnej i strat wynikających ze zmian w ułożeniu kabla (straty mikrozgięciowe). Procedurę uwzględniania tych strat wykonuje automatycznie odpowiednio zaprojektowana część elektroniczna urządzenia.



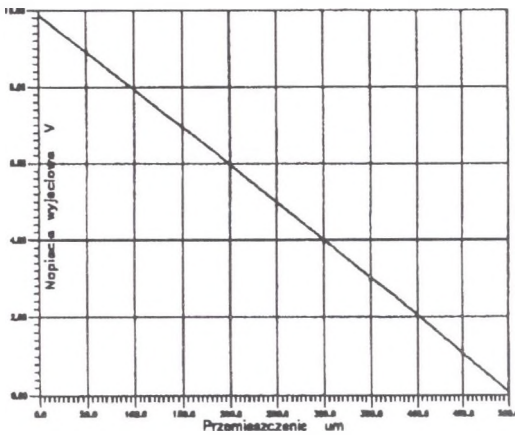
Rys. 30. Wpływ parametru d na charakterystykę przemieszczeniową
 Fig. 30. The transmission vs. displacement for the different parameter d



Rys. 31. Schemat modelu użytkowego światłowodowego czujnika przemieszczenia
 Fig. 31. The useful model scheme of a fiber optic displacement sensor

Przedstawiony układ przystosowano do pracy z mikroprocesorowym sterownikiem, którego zadaniem jest zbieranie wyników jednocześnie z większej ilości takich układów pomiarowych, ich linearyzacja, uśrednianie i wyświetlanie wyników. Ponadto układ ma możliwość współpracy z komputerem klasy IBM poprzez łącze szeregowo RS 232C. Czujnik powyższy może zostać przystosowany do pomiaru współczynnika załamania światła medium znajdującego się w przestrzeni pomiarowej czujnika. Czujniki o budowie przedstawionej powyżej zostały zastosowane między innymi do budowy czujników: bicia promieniowego wału napędowego głowicy urabiającej kombajnu węglowego, czujnika siły, czujnika ciśnienia.

Praca została wykonana w ramach CPBR 8.12.



Rys. 32. Charakterystyka czujnika przemieszczenia

Fig. 32. The dependance of the fiber optic sensor output voltage vs. displacement

Literatura

- [1] M. Błahut, A. Opilski, R. Rogoziński, *Investigations of usability of the selected types of glass in planar waveguide technology*, *Optica Applicata* **22**, 3-4 (1992), 161-169.
- [2] M. Błahut, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Passive integrated optical components made by ion exchange in glass*, *Proc. of SPIE* **670** (1986), 250-254.
- [3] M. Błahut, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Investigations on the gradient microlenses technology*, *Optical Fibers and Their Applications* **136** (1986).

- [4] M. Błahut, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Gradient microlenses technology*, Proc. Third School on Acoustooptic and Applications, Wieżycza 1986, 187-193.
- [5] M. Błahut, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Światłowody gradientowe na bazie szkła i ich zastosowania w technologii rozgałęziaczy $N \times N$* , Zeszyty Naukowe Politech. Śląsk. **60** (1989), 31.
- [6] M. Błahut, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Gradient-index planar glass waveguides and their application to a N-port branched circuits*, Optical Fibers and their Applications **4** (1989), 79.
- [7] M. Błahut, K. Gut, P. Karasiński, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Zastosowanie techniki wymiany jonowej w szklach w technologii czujników światłowodowych*, Mat. Konf. COE'92 (1992), 124-126.
- [8] M. Błahut, K. Gut, P. Karasiński, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Światłowodowy wielomodowy refraktometr planarny*, Akustyka Molekularna i Kwantowa (1993).
- [9] M. Błahut, K. Gut, P. Karasiński, A. Opilski, *Optical planar refractometr*, 2nd European Conf. on Optical Chemical Sensors and Biosensors. Florence (1994).
- [10] M. Błahut, A. Opilski, R. Rogoziński, *Zastosowanie wymiany jonowej K^+ - Na^+ w technologii planarnego interferometru Macha-Zehndera*, V Konferencja Naukowa ELTE'94 (1994).
- [11] M. Błahut, R. Rogoziński, *Modal properties of waveguide structures made by K^+ - Na^+ ion-exchange*, Eight Cimec Forum on New Materials, Florence 1994.
- [12] M. Błahut, R. Rogoziński, *Waveguide buried structures produced by two-step thermal diffusion*, GRIN-92 Tenth Topical Meeting, Santiago de Compostela 1992, 179-182.
- [13] M. Błahut, R. Rogoziński, *Application of two-stage thermal diffusion in the technology of buried channel waveguides*, Optica Applicata **22**, **2** (1992), 109-115.
- [14] M. Błahut, K. Gut, P. Karasiński, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Zastosowanie wymiany jonowej K^+ - Na^+ w technologii jednomodowych struktur światłowodowych*, Akustyka Molekularna i Kwantowa (1993).
- [15] M. Błahut, K. Gut, P. Karasiński, A. Opilski, Z. Opilski, R. Rogoziński, *Światłowodowy wielomodowy refraktometr planarny*, Mat. Konf. COE'94 (1994).
- [16] P. Karasiński, A. Opilski, *Results of the investigation on microbend fiber-optic sensor*, Proc. 5th Symp. on Optical Fibers And Their Applications **2**, Warsaw 1989, 174-179.

- [17] T. Pustelny, A. Opilski, *Natężeniowe czujniki światłowodowe*, Zeszyty Naukowe Politech. Śląsk. Mat.-Fiz. **60** (1989), 124-134.
- [18] T. Pustelny, *Temperaturowe Czujniki Światłowodowe*, 4th Domestic School of Optoelectronics **V** (1989), 129.
- [19] T. Pustelny, A. Opilski, *Czujnik światłowodowy do pomiaru temperatury w transformatorach energetycznych*, Czujniki Optyczne i Elektroniczne, Materiały Konferencyjne **V**, Zegrze 1992, 104-109.
- [20] T. Pustelny, A. Opilski, J. Krzak, *Światłowodowy czujnik temperatury z absorpcją światła w półprzewodniku*, Konferencja: Zastosowania Światłowodów, Białowieża 1987.
- [21] T. Pustelny, *Phosphorescence Temperature Sensor*, Conference EUROPT(R)ODE II, Firenze 1994, 206.
- [22] T. Pustelny, *Fiber optic temperature sensors with fluoro optic effect*, OptoElectronics Review **4** (1993), 121-129.
- [23] T. Pustelny, Z. Opilski, *Luminescence Temperature Sensor*, Materiały Konferencyjne, Coe93 **II** (1994).
- [24] T. Pustelny, *Luminescence Temperature Sensor for High-Voltage Arrangements*, Sensors and Actuators (1994, praca złożona do publikacji).
- [25] A. Opilski, *Czujniki światłowodowe (natężeniowe)*, I Krajowa Szkoła Optoelektroniki, Unieście 1987.
- [26] T. Pustelny, A. Opilski, Z. Opilski, M. Chudek, *System pomiaru wychylenia w obszarach górniczych*, Mat. Konf. II Dni Górnictwa Węglowego i Ochrony Terenów Górniczych (1993), 211-225.
- [27] A. Opilski, *Czujniki światłowodowe do zastosowań w przemyśle i robotyce*, IV Krajowa Szkoła Optoelektroniki, Waplewo 1990, 5-27.

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Ranachowski

Wpłynęło do redakcji 14.12.1994 r.

Abstract

In the paper are presented some aspects of lightwave optics application — in integrated optical structures, made monolithically on the glass substrate by the ion-exchange technique and fiber optics sensors of basic physical magnitudes (temperature, displacement, force).

Planar optical structures, produced in the multistep process of Ag-Na and K-Na ion-exchange including initial diffusion or electrodiffusion, heating and burning were examined both theoretically and experimentally. On the base on it some multimode lightguide beam splitters, planar Mach-Zender interferometers for sensor applications and multimode planar refractometer in a waved channel lightguide structure were fabricated.

In this paper the some multimode types of fiber optics temperature sensors are described. It was presented the sensor with the light absorption in semiconductor, the microbending sensor, as well as the luminescence sensor.

The possibility of industrial applications the fiber temperature sensors of the kind are presented, too.