

Longin KOCISZEWSKI, Jan BUŻNIAK, Ryszard STĘPIEŃ
INSTYTUT TECHNOLOGII MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

Ryszard S. ROMANIUK
INSTYTUT PODSTAW ELEKTRONIKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Światłowody mozaikowe

Streszczenie

Artykuł składa się z trzech głównych części:

- 1/ ogólna idea wytwarzania włókien optycznych,
- 2/ proces technologiczny i uwarunkowania materiałowe,
- 3/ rozważania dotyczące zastosowań.

W niniejszej pracy opisano nową oryginalną technikę komponowania włókien optycznych do specjalnych zastosowań z prętów szklanych /prostokątnych względnie okrągłych/ w celu utworzenia bardziej lub mniej klasycznych struktur zawierających jeden lub wiele rdzeni i jednorodny lub niejednorodny płaszcz optyczny.

W tej podstawowej technologii kompozytowania można wykorzystywać wielostopniowy hybrydowy proces formowania za pomocą metod wielotyglowych lub wielordzeniowych w rurze.

Sugerujemy przyjęcie nazwy ŚWIATŁOWODY MOZAIKOWE na określenie włókien wytwarzanych z zastosowaniem nowej technologii kompozytowania preform.

Przeprowadzono pierwsze eksperymenty technologiczne wytwarzania kilku podstawowych rodzajów światłowodów mozaikowych, m.in. z zastosowaniem włókien gradientowych z niejednorodnym optycznie płaszczem lub włókien o skokowej zmianie wsp. załamania światła z wbudowanymi pułapkami optycznymi.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny rozwój technologii wytwarzania szklanych włókien optycznych do zastosowań niatelekomunikacyjnych. Jednakże nie są to już klasyczne włókna optyczne o prostej budowie z jednym rdzeniem walcowym otoczonym pojedynczym cylindrycznym płaszczem optycznym.

Obecnie opracowywane włókna mają bardzo złożoną strukturę, zarówno w sensie mechanicznym, jak i optycznym.

Jednym z głównych problemów związanych z dalszym rozwojem technologii optyki światłowodowej jest optymalizacja włókien dla ich zastosowania do wytwarzania różnego rodzaju sensorów i urządzeń optoelektronicznych, kabli do połączeń pokładowych, wewnątrzobiektywnych, międzykomputerowych i wreszcie do tworzenia całych systemów optoelektronicznych.

Najtrudniejszy technologicznie jest problem rozwoju technologii sensorów i urządzeń na ich bazie, przeznaczonych do pracy w szczególnie niekorzystnych warunkach środowiskowych.

Z trzech aspektów procesu optymalizacji włókien optycznych, tj.:

- czynników materiałowych,
- struktury mechanicznej i optycznej włókna,
- uwarunkowań środowiskowych,

w niniejszych rozważaniach ograniczyliśmy się do dwóch pierwszych. Zamierzamy przedstawić problematykę niestandardowych włókien optycznych do celów specjalnych, wykorzystywanych jako mikrouządzenia i sensory, które posiadają istotnie różną, i to najczęściej lepszą, charakterystykę niż te wytwarzane z udziałem powszechnie dostępnych standardowych telekomunikacyjnych włókien optycznych typu CVD czy też VAD.

Termin "niestandardowe" oznacza tutaj:

- nową metodykę projektowania włókna,
- nowe reguły doboru materiałów,
- nową metodę wyciągania włókna.

Do grupy nowych niestandardowych włókien optycznych można zaliczyć między innymi następujące włókna: wielordzeniowe, z kształtowanymi niekołowymi rdzeniami, z rdzeniami segmentowymi, z niską lub wysoką dwójłomnością, z możliwością polaryzowania względnie modulowania fali, wzmacniające, z niejednorodnymi rdzeniami i płaszczami, wytworzone ze szkła o specjalnych właściwościach magnetostrykcyjnych, przewodzących lub półprzewodzących, fotochromowych, piezoelektrycznych, włókna z wbudowanym przewodnikiem, włókna zawierające elementy grzejnikowe, itd.

Do wytwarzania tego typu włókien była stosowana dotychczas bardzo pracochłonna i droga, wielostadiowa technologia hybrydowa, w której konieczne było sporządzanie kilku kolejnych preform budowanych z niezunifikowanych szklanych elementów konstrukcyjnych. W procesach pocieniania wykorzystywano przy tym kilka różnych metod: podwójnego, wielokrotnego tygla, pręta w rurze, wreszcie klasycznej CVD.

W niniejszej pracy proponujemy nową technologię wyciągania włókna optycznego, która jest znacznie prostsza i tańsza od technologii dotychczas stosowanych.

W nowej metodzie stosowana jest najczęściej tylko jedna preforma budowana ze zunifikowanych rdzeniowych i płaszczowych pręcików szklanych, których przekrój poprzeczny może być kwadratowy, sześciokątny, ośmiokątny i w granicznym przypadku - okrągły.

Znaczne ułatwienia występują wtedy, gdy do budowy preformy o złożonej strukturze mechanicznej i optycznej, stosuje się elementy pręcikowe o przekroju kwadratowym.

Komponowanie preformy przypomina do złudzenia układanie mozaiki z dużej ilości drobnych elementów strukturalnych. Z tego względu na określenie włókien optycznych otrzymanych w wyniku pocieniania w ten sposób skomponowanej preformy zaproponowano nazwę ŚWIATŁOWODY MOZAIKOWE.

Nowa technologia umożliwia wytwarzanie włókien o bardzo złożonych, mechanicznie i optycznie, przekrojach poprzecznych. Ilość poszczególnych stadiów technologicznych procesu jest przy tym znacznie zmniejszona. Najczęściej potrzebny jest jednostadiowy proces pocieniania. W bardziej złożonych wersjach technologii kompozytowania wprowadza się dwustadiowy proces wyciągania włókna. Najczęściej dotyczy to specjalnych jednomodowych włókien optycznych.

Do najważniejszych parametrów technologicznych procesu kompozytowania należą:

- refrakcyjne, mechaniczne i termiczne właściwości prętów /pręcików/ szklanych /rdzeniowych i płaszczowych/,
- rozkład pręcików w przekroju poprzecznym preformy i włókna,
- metodyka składania /komponowania/ preformy,
- kontrolowana, zamierzona, niesymetryczność rozkładu naprężeń w wyciąganym włóknie.

2. BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI ŚWIATŁOWODÓW MOZAIKOWYCH

Światłowody mozaikowe stanowią klasę światłowodów włóknistych. Są one uzyskiwane przez pocienienie preformy, która składana jest w odpowiedni sposób z pojedynczych pręcików szklanych. Ogólną ideę komponowania preformy przedstawiono na rysunku 1a. Obszar oznaczony literą A stanowi rdzeń natomiast obszar B jest płaszczem optycznym. Na rysunku przedstawiono również przekroje poprzeczne włókien wytworzonych ze skomponowanej preformy w różnych warunkach pocieniania: w stosunkowo niskiej temperaturze /pokrój kwadratowy/ i w temperaturze wysokiej, w której siły napięcia powierzchniowego przewyższyły siły tarcia wewnętrznego /lepkości/ i dzięki temu możliwy stał się okrągły pokrój uzyskiwanego włókna. W trakcie termicznego procesu pocieniania preformy zanikają granice pomiędzy poszczególnymi pręcikami składowymi z tego samego materiału szklanego.

Włókno wytworzone nową metodą pod względem optycznym nie różni się od włókna uformowanego w konwencjonalny sposób, np. metodą podwójnego tygla, czy też pręta w rurze.

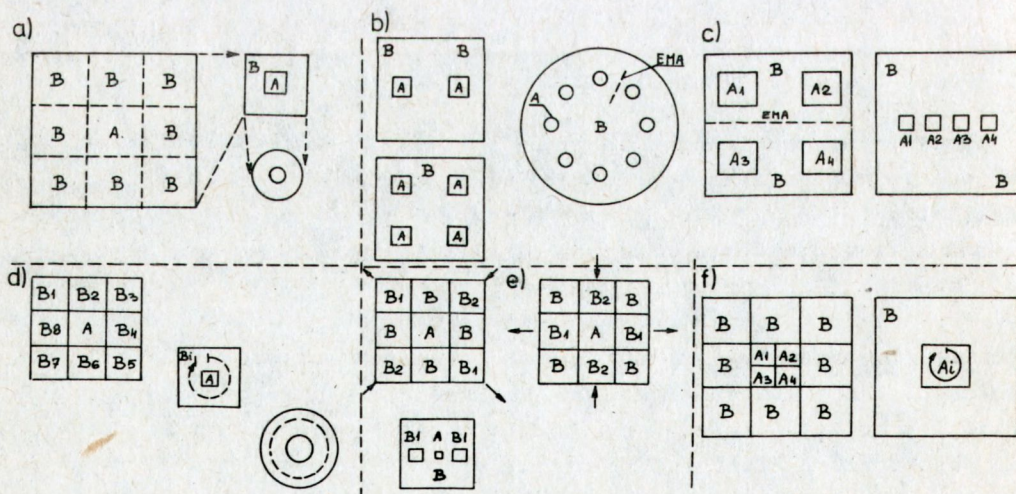
Wszystkie modyfikacje tej podstawowej idei wykorzystują tę samą technikę składania preformy mozaikowej. Co więcej, wszystkie modyfikacje mogą być wykonane z **użyciem** pręcików A i B o tych samych wymiarach bazowych lub też stanowiących ich wielokrotność.

W rozdziale niniejszym nie zajmujemy się bliżej problemami technologicznymi wytwarzania struktur mozaikowych. Ograniczamy się do rozważań dotyczących topologii możliwych przekrojów poprzecznych oraz wpływu tej topologii na potencjalne właściwości światłowodów mozaikowych.

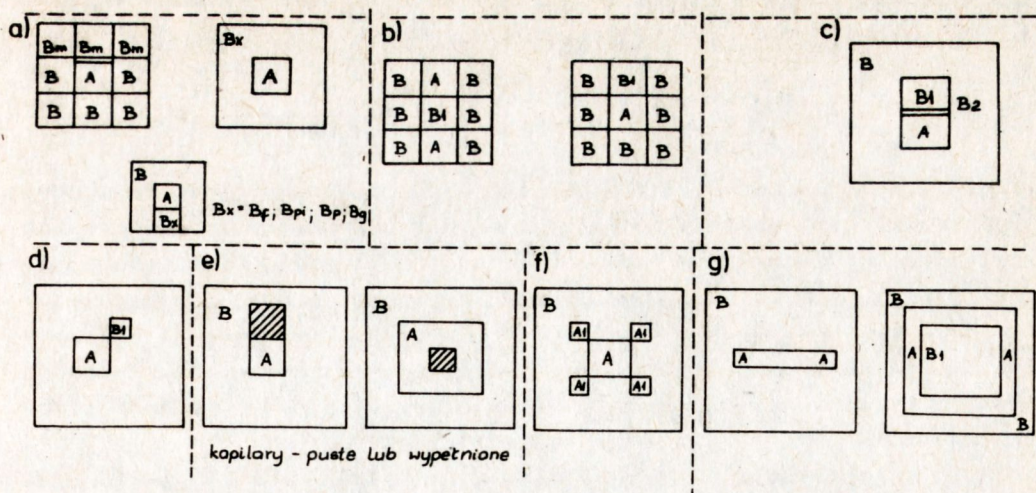
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przykłady najprostszycy rozwiązań topologicznych. Wyróżnić można kilka najważniejszych kierunków modyfikacji podstawowej topologii mozaikowej. Są to włókna optyczne:

- z kształtowanym rdzeniem,
- z niejednorodnym płaszczem,
- wielordzeniowe,
- z materiałów szklanych o specjalnych właściwościach,
- z wbudowanymi obszarami nie posiadającymi właściwości wodzenia fali optycznej.

Rysunki 1b i 1c pokazują wielordzeniowe światłowody mozaikowe. Pierwsze z nich są homordzeniowe /rys. 1b/, a drugie heterordzeniowe /rys. 1c/. Włókna heterordzeniowe mają przynajmniej dwa różne rdzenie. Różnią się one między sobą właściwościami refrakcyjnymi, wymiarami i innymi właściwościami fizyko-chemicznymi w obszarach rdzeniowych.



Rys. 1. Przykłady ilustrujące ogólną zasadę komponowania światłowodów mozaikowych



Rys. 2. Przykłady ilustrujące ogólną zasadę komponowania światłowodów mozaikowych /cd./

Przez przemieszczanie obszarów rdzeniowych otrzymuje się kołowy /rys. 1b/, liniowy /rys. 1c/ lub bardziej złożony rozkład rdzeni w obszarze płaszczywnym.

Problemy wewnętrznego sprzężenia są istotne we włóknie z więcej niż jednym rdzeniem. Sprzężenie jest bardziej skomplikowane w przypadku włókna wielordzeniowego. Dla wyeliminowania sprzężenia pomiędzy poszczególnymi rdzeniami stosuje się szkło EMA /extra mural absorption/, które stwarza optyczną izolację pomiędzy określonymi obszarami mozaikowymi. Dla przykładu, EMA zastosowana pomiędzy dwoma rdzeniami we włóknie o geometrii kołowej przedstawionym na rysunku 1b stwarza układ, w którym sprzężenie optyczne rdzeni jest możliwe jedynie w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, gdy jako pierwszy pobudzony zostanie rdzeń po prawej stronie warstwy zaporowej EMA.

Drugi kierunek sprzężenia /niezgodnie z ruchem wskazówek zegara/ jest możliwy po pobudzeniu rdzenia po drugiej stronie warstwy EMA.

Na rysunkach 1d, 1e, 2a pokazano włókna z niejednorodnym płaszczem. Wydaje się nam, że jest to całkowicie nowa idea budowania takich włókien dla sensorów i urządzeń optoelektronicznych. Płaszcz jest niejednorodny pod względem swych optycznych lub innych właściwości fizykochemicznych. W płaszczu mogą zmieniać się w sposób pożądaný i ukierunkowany właściwości refrakcyjne, mechaniczne, absorpcyjne, magnetyczne itd.

Rysunek 1e ilustruje przypadek niejednorodnego płaszcza z celowo wytworzonym układem naprężeń mechanicznych uzyskiwanym przez wbudowywanie w płaszcz obszarów o odmiennym współczynniku rozszerzalności termicznej. Jest tutaj możliwe klasyczne rozwiązanie włókna typu Panda.

Głównym celem stosowania niejednorodnego płaszcza jest wytworzenie naprężeń mechanicznych wpływających na propagację fali w rdzeniu.

Wszystkie powstałe naprężenia mogą wzajemnie na siebie oddziaływać, dodawać się i odejmować, tworząc pożądany rozkład dookoła rdzenia. Każda niejednorodność rozkładu naprężeń w rdzeniu powoduje pojawienie się optycznej dwójłomności lub innych efektów, takich jak nielinowość czy bistabilność.

Na rysunku 2a przedstawiono światłowody mozaikowe z niejednorodnym płaszczem, lecz aktywnie reagującym na warunki środowiskowe. Płaszcz częściowo lub całkowicie budowany jest ze szklistego materiału o właściwościach magnetostrykcyjnych $/B_m/$, fotochromatycznych $/B_f/$, piezoelektrycznych $/B_{pi}/$, przewodnikowych lub półprzewodnikowych $/B_p/$, rezystywnych /grzewczych/ $/B_g/$. Takie włókna są typowymi przykładami układów sensorowych i im właśnie w najbliższym czasie fizycy i technolodzy poświęcać powinni dużo uwagi i czasu.

Rysunek 1f przedstawia światłowód z niejednorodnym zwielokrotnionym rdzeniem. W obrębie jednego dużego rdzenia "podrdzenie" A_1, A_2, A_3, A_4 mogą się różnić bądź współczynnikiem załamania, bądź współczynnikiem rozszerzalności. Takie rozwiązanie jest możliwe do zrealizowania jedynie z zastosowaniem nowej zaproponowanej przez nas technologii tworzenia struktur mozaikowych.

Również typowymi sensorami są włókna z częściowo tylko lub też całkowicie na zewnątrz ulokowanymi rdzeniami /rys. 2b/. Są to tzw. optyczne włókna mozaikowe z "przeciekającymi" rdzeniami. W pierwszym przypadku dwa rdzenie optyczne są umieszczone całkowicie na zewnątrz i odizolowane od siebie za pomocą słabej bariery refrakcyjnej B_1 . Rdzenie są zwykle z zewnątrz pokryte cienkim płaszczem dla uniknięcia zbyt wysokich strat optycznych tego typu włókna. W drugim przypadku pojedynczy rdzeń jest izolowany za pomocą odpowiednio zaprojektowanej bariery refrakcyjnej. Czynnym elementem tak zbudowanego sensora jest strona BB_1B . W tym przypadku właściwości refrakcyjne B_1 są bardzo zbliżone do właściwości rdzenia A.

Rozwiązania zaprezentowane na rysunkach 2c, 2d i 2f są nazywane światłowodami mozaikowymi z rdzeniami przepełnieniowymi. Optyczne rdzenie przepełnieniowe są rozmieszczane symetrycznie lub niesymetrycznie względem głównego rdzenia i są słabo lub silnie sprzężone.

Pomiędzy rdzeniami są umieszczane różne bariery refrakcyjne lub stratnościowe w celu zmodyfikowania charakterystyki sprzęgania. Sprzężenie zależy od rzędowości modu wodzonego przez główny rdzeń, jak również od kąta modowego propagacji /w przypadku wielomodowym/. Zmieniając aperturę wiązki wzbudzającej albo poziom mocy powoduje się przepływ mocy do rdzenia pomocniczego. Światłowód mozaikowy może także zawierać puste przestrzenie /rys. 2e/. Jest to realizowane przez wyjęcie pręta z odpowiedniego miejsca preformy mozaikowej. Dla zachowania

wania pustej przestrzeni, w czasie procesu pocieniania do preformy podaje się gaz pod niewielkim ciśnieniem, przez co przeciwdziała się zakłębnięciu się /collapsing/ preformy i włókna.

Światłowód mozaikowy może również zawierać inne obszary niewodzące fali świetlnej, takie jak drut przewodzący, drut półprzewodzący - grzewczy itd., co daje możliwość tworzenia nowych rodzin falowodów optycznych do specjalnych celów /rys. 2e/.

Ten krótki przegląd rozlicznych możliwości, jakie kryją się w zaproponowanej technice struktur mozaikowych, kończymy przypadkiem światłowodów mozaikowych z rdzeniem paskowym i rdzeniem pierścieniowym /rys. 2g/. Włókna te są najprostszą modyfikacją podstawowej struktury zaproponowanej na rys. 1a.

3. ROZWAŻANIA TECHNOLOGICZNE NAD WYTWARZANIEM MOZAIKOWYCH WŁÓKIEN OPTYCZNYCH

Wśród metod wytwarzania światłowodów ze szkła wieloskładnikowych z niekonwencjonalnym profilem refrakcyjnym, kształtem geometrycznym i układem naprężeń mechanicznych w rdzeniu i w płaszczu, prym wiedzie - jak dotychczas - metoda wielokrotnego tygla.

Metoda ta ma szereg poważnych wad. Przy jej stosowaniu szkła wsadowe są ogrzewane do wysokiej temperatury umożliwiającej osiągnięcie lepkości formowania rzędu $10^7 - 10^8$ puazów. Sprzyja to jednak daleko posuniętej dyfuzji wzajemnej szkła rdzeniowych i płaszczowych, prowadzącej do rozmycia granic refrakcyjnych poszczególnych składników szklanych. Jest to główną przyczyną występowania tzw. przesłuchów dyfuzyjnych we włóknach optycznych i sensorach włóknistych.

W metodzie tyglowej formowania włókien światłowodowych nie mogą być wykorzystywane szkła o specjalnie pożądanym właściwościach fizycznych, lecz charakteryzujące się podwyższoną skłonnością do krystalizacji. W dotychczasowej literaturze przedmiotu autorzy niniejszej pracy nie spotkali się z opisem podobnej do zaproponowanej tutaj, technologicznej metody komponowania wieloelementowych struktur światłowodowych.

Ponieważ proces przygotowywania "preformy" w pierwszym stadium wytwarzania włókien optycznych nową metodą przypomina układanie z pręcików szklanych misternej mozaiki, na określenie włókien otrzymanych tą metodą zaproponowano nazwę ŚWIATŁOWODY MOZAIKOWE

3.1. Podstawowe zasady metody tworzenia struktur mozaikowych

Dla uproszczenia opisu metody przyjęto moduł kwadratu, zarówno dla gotowego światłowodu, jak również dla poszczególnych elementów jego budowy wewnętrznej. Z równym powodzeniem można jednak zastosować rów-

niez moduł sześciokąta czy też ośmiokąta. Ze względów technologicznych najwygodniejszym okazał się kwadrat.

Proces wytwarzania światłowodów mozaikowych można podzielić na następujące operacje:

- a/ wytopienie szkieleń rdzeniowych i płaszczowych o pożądanym właściwościach,
- b/ odlanie z nich długich prostopadłościennych bloków szklanych,
- c/ pocięcie bloków na pręty o kwadratowym przekroju poprzecznym,
- d/ frezowanie, szlifowanie i polerowanie mechaniczne prętów,
- e/ pocienianie prętów metodą termiczną z zachowaniem ich pokroju kwadratowego,
- f/ układanie preformy z uzyskanych pręcików płaszczowych i rdzeniowych, czyli wytworzenie wyjściowego wielopręta mozaikowego,
- g/ termiczne pocienianie preformy mozaikowej dla otrzymania szklanego światłowodu mozaikowego, włóknowego lub pręcikowego w zależności od stopnia pocieniania preformy,
- h/ pokrycie włókna dodatkowym ochronnym grubym płaszczem organicznym,
- i/ cięcie na żądane odcinki i preparowanie czół.

W najprostszym wykonaniu preforma mozaikowa składa się z 9 pręcików /8 ze szkła płaszczowego i 1 ze szkła rdzeniowego/ ułożonych w kwadracie /3x3/, przy czym pręcik rdzeniowy zajmuje pozycję centralną.

Ze względów technologicznych wskazane jest, by preforma miała bok o długości około 15 mm. A zatem pojedynczy pręcik w wykonaniu podstawowym preformy musi mieć wymiary poprzeczne 5x5 mm. Pręciki takie uzyskuje się albo bezpośrednio z operacji cięcia, frezowania, szlifowania i polerowania /operacje c i d/, z pominięciem operacji e/ pocieniania, bądź przygotowuje się najpierw pręty grube/np. 20x20 mm/ ze szkieleń wyjściowych, pocienia je /op. e/ na wymiar 5x5 mm i dopiero wtedy układa preformę.

A zatem operacja wstępnego pocieniania prętów szklanych nie jest niezbędna, co ma duże znaczenie w przypadku szkieleń łatwo ulegających krystalizacji.

Preforma pocieniana jest na włókno o grubości około 75-100 μm , tzn. stopień pocieniania wynosi 150-200 razy. W tych warunkach rdzeń włókna osiąga wymiary poprzeczne 25-35 μm .

Uformowane włókno szklane jest pokrywane najpierw warstwą lakieru silikonowego termoutwardzalnego, a następnie warstwą lakieru akrylowego utwardzanego promieniowaniem UV. Uzyskany w ten sposób światłowod mozaikowy posiada teraz grubość 250-350 μm i operowanie nim jest o wiele łatwiejsze niż gołym cienkim włóknem.

Dla niektórych celów korzystniejsza od włókna jest postać pręcika o grubości ok. 1 mm. W tym wypadku rdzeń osiąga wymiar 333 μm przy stopniu pocieniania preformy zaledwie 15-krotnym.

3.2. Rozwiązanie podstawowe

W rozwiązaniu podstawowym światłowód mozaikowy składa się z jednego centralnie rozmieszczonego rdzenia ze szkła A otoczonego jednolitym pod względem zarówno współczynnika załamania światła n_D jak i współczynnika rozszerzalności termicznej α płaszczem szklanym B /rys. 1a/.

Z podstawowej zasady budowy światłowodu wynika warunek by:

$$n_D^A > n_D^B$$

Natomiast prawidłowe kompozytowanie materiałów wymaga, by:

$$\alpha_B < \alpha_A$$

$$\text{oraz } \Delta \alpha = \frac{|\alpha_A - \alpha_B|}{\alpha_A} \cdot 100\% < 15\%$$

Najbezpieczniej jednak, dla uniknięcia nadmiernych naprężeń mechanicznych i niebezpieczeństwa pęknięcia włókna, należy utrzymywać $\Delta \alpha < 10\%$.

Poniżej rozpatrzono stronę materiałową dwóch przypadków szczególnych rozwiązania podstawowego światłowodu mozaikowego.

3.2.1. Światłowód jednorodzeniowy o wysokiej aperturze numerycznej /NA \approx 0,060/ i z małą różnicą współczynników rozszerzalności termicznej rdzenia i płaszcza / $\alpha_A \approx \alpha_B$ /

W tabeli 1 zestawiono składy chemiczne szkła rdzeniowego i szkła płaszczowego wraz z wartościami dwóch podstawowych właściwości: współczynnika załamania światła n_D mierzonych w temperaturze 293 K i współczynnika rozszerzalności termicznej α mierzonych w zakresie temperatur 293–573 K.

Tabela 1. Proponowane szkła do budowy jednorodzeniowego światłowodu z małymi naprężeniami na granicy płaszcz-rdzeń

Rodzaj szkła \ Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	CaO	Na ₂ O	Właściwość	
									$n_D^{293\text{ K}}$	$\alpha_{293\text{ K}}^{573\text{ K}} \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
Rdzeń A	48	12	5	-	12	10	5	8	1,603	80,63
Płaszcz B	44	30	17	9	-	-	-	-	1,486	76,76

$$\Delta n_D = 0,117 \quad NA = 0,60 \quad \Delta \alpha = 3,87 \quad \frac{\Delta \alpha}{\alpha_A} = 4,8\%$$

3.2.2. Światłowod jednorodzeniowy o wysokiej aperturze numerycznej /NA ≈ 0,68/ii z dużą różnicą współczynników rozszerzalności

Tabela 2. Szkła na jednorodzeniowy światłowod z wysokimi naprężeniami

Rodzaj szkła / Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	CaO	Na ₂ O	Właściwość	
									n _D ^{293 K}	α _{293 K} ^{573 K} × 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Rdzeń A	40	11	3	-	13	15	10	8	1,633	86,13
Płaszcz B	44	30	17	9	-	-	-	-	1,486	76,76

$$n_D = 0,147$$

$$NA = 0,68$$

$$\Delta\alpha = 9,37$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_A} = 10,9\%$$

3.3. Wybrane rodzaje mozaikowych włókien optycznych ze złożoną strukturą wewnętrzną

Dla zilustrowania zasad budowy i kompozytowania materiałowego, jak i również wpływu tych ostatnich na właściwości propagacyjne i układ naprężeń mechanicznych w formowanych światłowodach mozaikowych, rozpatrzono przykładowo kilka wybranych modyfikacji rozwiązania podstawowego. Przykłady te obejmują struktury dwurdzeniowe:

- homordzeniowe,
- heterordzeniowe,

jak również struktury jednorodzeniowe z niejednorodnym układem naprężeń w płaszczu:

- z eliptyczną symetrią naprężeń,
- ze spiralnym rozkładem naprężeń.

3.3.1. Homordzeniowa struktura z dwoma rdzeniami /podwójna struktura podstawowa/

W najprostszym wykonaniu jest to struktura składająca się w przekroju poprzecznym z 25 elementów o wymiarach w preformie 5x5 mm. Preforma wyjściowa o wymiarach 25x25 mm po pocienieniu 200-krotnym daje włókno mozaikowe o przekroju 125x125 μm z rdzeniami o przekroju 25x25 μm. Strukturę taką schematycznie przedstawiono na rysunku 1b, natomiast rysunek 3 przedstawia sposób budowania preformy z pręcików wyjściowych. Rdzenie A₁ i A₂ mogą być wykonane z tego samego szkła, bądź z dwóch różniących się chemicznie szkieł o jednakowym n_D i α, jak to przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Propozycja szkieł do budowy podwójnej homordzeniowej struktury mozaikowej

Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	BaO	La ₂ O ₃	ZrO ₂	CdO	ZnO	Właściwość	
										n _D ^{293 K}	α _{293 K} ^{573 K} × 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Płaszczyzna B	44	30	17	9	-	-	-	-	-	1,486	76,76
Rdzeń A ₁	19	10	-	1	38	19	3	9	1	1,754	82,49
Rdzeń A ₂	20	10	-	-	39	19	3	9	-	1,753	82,54

$$\Delta n_D / A_1 - A_2 / = 0,001 \approx 0$$

$$\Delta \alpha / B - A_2 / = 5,78$$

$$NA_1 = NA_2 = 0,91$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha_{A_2}} = 7\%$$

3.3.2. Heterordzeniowa struktura z dwoma rdzeniami o różnym współczynniku załamania

Materiały do budowy takiej struktury mozaikowej podano przykładowo w tabeli 4. Schemat budowy preformy jest taki sam, jak w przypadku poprzednim /rys. 3/.

Tabela 4. Szkła do wytwarzania podwójnego światłowodu heterordzeniowego /różne n_D rdzeni/

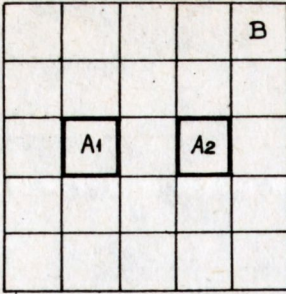
Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	BaO	La ₂ O ₃	ZrO ₂	CdO	Bi ₂ O ₃	Właściwość	
										n _D ^{293 K}	α _{293 K} ^{573 K} × 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Płaszczyzna B	44	30	17	9	-	-	-	-	-	1,486	76,76
Rdzeń A ₁	21	10	-	1	39	19	3	7	-	1,743	80,18
Rdzeń A ₂	47	12,5	11	-	-	-	-	-	25,9	1,574	80,20

$$NA_1 = 0,91$$

$$NA_2 = 0,52$$

$$\Delta \alpha / A - B / = 3,44$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha_A} = 4,3\%$$



Rys. 3. Przykład komponowania dwurdzeniowego /homo- lub heterordzeniowego/ światłowodu mozaikowego

3.3.3. Heterordzeniowa struktura z dwoma rdzeniami ze szkła o różnym współczynniku rozszerzalności /tab. 5/

Zasada budowy takiego światłowodu pozostaje taka sama /rys. 3/. Z powodu różnych współczynników α , wokół rdzeni wytwarzają się odmiennie pola naprężeń mechanicznych. W rdzeniu A₂ o wyższym α powstają w czasie studzenia włókna czy pręcika po procesie pocieniania większe naprężenia rozciągające na granicy rdzeń-płaszcz.

Tabela 5. Szklą do wytwarzania światłowodu heterordzeniowego /różne α rdzeni/

Rodzaj szkła / Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	CaO	Na ₂ O	Właściwość	
									n _D ^{293 K}	α ^{573 K} / α ^{293 K} x 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Płaszcz B	44	30	17	9	-	-	-	-	1,486	76,76
Rdzeń A ₁	48	12	5	-	12	10	5	8	1,603	80,63
Rdzeń A ₂	40	11	3	-	13	15	10	8	1,633	86,13

$$\Delta n_D / A_2 - A_1 / = 0,03$$

$$NA_1 = 0,60$$

$$NA_2 = 0,68$$

$$\Delta \alpha / A_1 - A_2 / = 5,50$$

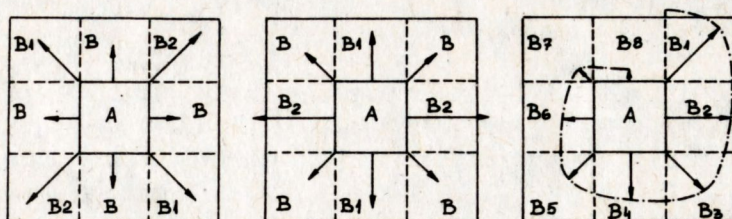
$$\Delta \alpha / A_2 - B / = 9,37$$

$$\frac{\Delta \alpha / A_1 - A_2 /}{\alpha_{A_1}} = 6,8\%$$

$$\frac{\Delta \alpha / A_2 - B /}{\alpha_{A_2}} = 10,9\%$$

3.3.4. Struktura jednorodzeniowa z dwukierunkowym układem naprężeń mechanicznych w płaszczu /eliptyczna symetria naprężeń/

Struktura ta zbudowana jest z czterech różnych szkła /rys. 4a/: jednego rdzeniowego A i trzech płaszczowych B, B₁, B₂, charakteryzujących się praktycznie jednakowym współczynnikiem załamania i różnymi współczynnikami rozszerzalności /tab. 6/.



Rys. 4. Rozkład naprężeń mechanicznych działających na rdzeń w światłowodach mozaikowych z niejednorodnym płaszczem

Tabela 6. Proponowane szkła do wytwarzania jednorodzeniowego światłowodu mozaikowego z eliptyczną symetrią naprężeń

Rodzaj szkła \ Skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	CaO	Na ₂ O	Właściwość	
									n _D ^{293 K}	α _{293 K} ^{573 K} × 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Rdzeń A	48	12	5	-	12	10	5	8	1,603	80,63
Płaszcz B	44	31	16	9	-	-	-	-	1,485	73,58
Płaszcz B ₁	44	30	17	9	-	-	-	-	1,486	76,76
Płaszcz B ₂	38	39	15	8	-	-	-	-	1,483	70,11

Szklą płaszczowe B₁ i B₂, rozmieszczone w narożach zaproponowanej struktury, różnią się znacznie współczynnikiem rozszerzalności zarówno między sobą jak i w stosunku do szkła rdzeniowego.

Na złączu płaszcz B₁ - rdzeń A powstają naprężenia mechaniczne wynikające z niedopasowania współczynnika rozszerzalności, przy czym ich wartość na kier. B₂ - A jest zdecydowanie wyższa niż na kierunku B₁ - A. Rdzeń poddawany będzie na całym swym obwodzie działaniu niejednorodnego pola naprężeń rozciągających, jak to przedstawiono schematycznie na rysunku 4a.

Drugą odmianą światłowodu z eliptycznym układem naprężeń jest struktura przedstawiona na rysunku 4b. Działaniu większych naprężeń poddawa-

ne są w niej boki kwadratowego rdzenia, małe naprężenia działające na naroża, czyli odwrotnie jak w strukturze poprzednio omówionej.

W obydwu omówionych wyżej przypadkach, podobnie zresztą jak we wszystkich światłowodach prawidłowo skomponowanych pod względem doboru współczynnika rozszerzalności rdzenia i płaszczka, w płaszczku powstaje odpowiedni układ równowagowych naprężeń ściskających, dzięki czemu cała struktura nie ulega dezintegracji.

3.3.5. Struktura jednordzeniowa z niejednorodnym płaszczem o spiralnym układzie naprężeń na granicy rdzeń-płaszcz

W tabeli 7 zawarto propozycję 9 szkieł budujących bardzo interesujący światłowod mozaikowy ze spiralnym układem naprężeń. Jego budowę mozaikową przedstawiono natomiast na rysunku 4c. Struktura ta jest trudna technologicznie ze względu na silną tendencję do spiralnego skręcania się formowanego włókna czy pręcika wokół osi podłużnej.

Stopniowo malejący współczynnik rozszerzalności szkieł w płaszczku /od B_1 do B_8 / powoduje wytworzenie się złożonego układu sił rozciągających działających na obwodzie rdzenia /rozkład śrubowy naprężeń/.

Tabela 7. Szklą do formowania jednordzeniowego światłowodu mozaikowego ze spiralnym układem naprężeń

Rodzaj szkła / skład szkła [% wag]	SiO ₂	B ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	BaO	CaO	Na ₂ O	Właściwość szkła		
									$n_D^{293 K}$	$\alpha_{293 K}^{573 K} \times 10^{-7} K^{-1}$	$\Delta\alpha$ %
Rdzeń A	48	12	5	-	12	10	5	8	1,603	80,63	-
Płaszcz B ₁	44	30	17	9	-	-	-	-	1,486	76,76	4,8
Płaszcz B ₂	42	35	17	6	-	-	-	-	1,484	75,77	1,3
Płaszcz B ₃	44	31	16	9	-	-	-	-	1,485	73,58	2,9
Płaszcz B ₄	44	33	16	7	-	-	-	-	1,484	72,98	0,8
Płaszcz B ₅	47	32	16	5	-	-	-	-	1,483	72,44	0,7
Płaszcz B ₆	41	39	16	4	-	-	-	-	1,482	72,06	0,5
Płaszcz B ₇	45	31	15	9	-	-	-	-	1,484	70,45	2,2
Płaszcz B ₈	38	39	15	8	-	-	-	-	1,483	70,11	0,5

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_A} / A - B_8 / = 13,7\% \quad NA \approx 0,60; \quad \frac{\Delta\alpha_{max}}{\alpha_{B_8}} / B_1 - B_8 / = 9,5\%$$

3.4. Uwarunkowania i bariery technologiczne wytwarzania światłowodów mozaikowych

W podstawowym wykonaniu światłowodu mozaikowego, podobnie jak ma to miejsce również w przypadku klasycznych włókien optycznych, fundamentalnym wymogiem warunkującym prawidłowe wodzenie światła jest to, by współczynnik załamania rdzenia był wyższy od współczynnika załamania płaszczka. Uzyskuje się to przez dobór odpowiednich pod względem składu chemicznego typów szkielek.

Rdzeń jest wykonywany ze szkielek optycznych, które dla podwyższenia n_D , zawierają duże ilości takich tlenków jak: ZrO_2 , TiO_2 , La_2O_3 , Bi_2O_3 , PbO , BaO . Płaszcz natomiast stanowią szkielek z grupy borokrzemowych lekkich kronów.

Drugim podstawowym wymogiem, warunkującym wytrzymałość mechaniczną formowanych włókien i pręcików mozaikowych, jest konieczność wytworzenia w zewnętrznych warstwach przypowierzchniowych płaszczka układu naprężeń ściskających.

Uzyskuje się to przez stosowanie na płaszcz szkielek o współczynniku rozszerzalności niższym w stosunku do szkielek na rdzeń.

W czasie stygnięcia włókna mozaikowego po procesie termicznego pocieniania preformy część wewnętrzna włókna, czyli rdzeń, kurczy się bardziej niż zewnętrzne warstwy płaszczkowe.

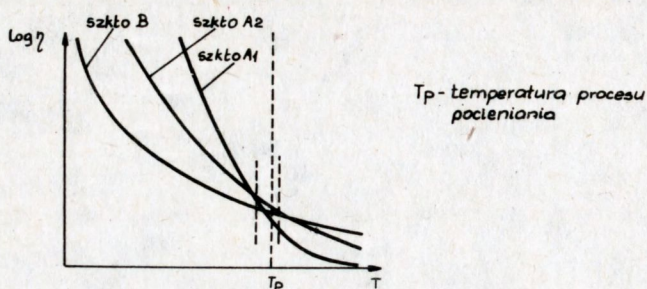
W związku z tym rdzeń, już w stanie nieplastycznym w temperaturze poniżej temperatury transformacji szkielek T_g jest poddawany działaniu naprężeń rozciągających, natomiast szkielek płaszczka znajduje się w polu naprężeń ściskających, utrzymujących w całości rozpatrywany kompozyt szklany.

W związku ze stosunkowo niską wytrzymałością szkielek na rozrywanie wprowadza się ograniczenie na dopuszczalną różnicę współczynników rozszerzalności rdzenia i płaszczka. Różnica ta nie może przekraczać 15% w stosunku do współczynnika rdzenia. W praktyce - dla bezpieczeństwa - dąży się do tego, by ta różnica nie przekraczała wartości 10%. W przypadku niewłaściwego skompozytowania i umieszczenia na zewnątrz rdzenia szkielek płaszczkowego o współczynniku rozszerzalności dużo wyższym od współczynnika rozszerzalności rdzenia, włókno staje się kruche, jego wyciąganie w procesie pocieniania, jak również nawijanie na bęben, staje się niemożliwe. Wytwarzające się wysokie naprężenia rozciągające w płaszczku powodują jego pękanie i niszczenie mechanicznej spójności włókna.

Bardzo poważną barierą technologiczną jest spełnienie wymogu, by krzywe lepkości $\log \eta = f/T$, czyli logarytm lepkości w funkcji temperatury, wszystkich składających się na mozaikowe włókno optyczne szkielek były możliwie maksymalnie do siebie zbliżone lub przecinały się w punktach odpowiadających temperaturom w pobliżu tempera-

tury T_p pocieniania preformy mozaikowej /rys. 5/. W przypadku dużych różnic lepkości poszczególnych szkieł proces pocieniania preformy jest bardzo utrudniony lub wręcz niemożliwy.

Duże różnice lepkości poszczególnych szkieł składowych¹⁾ zmuszają do stosowania wysokich temperatur pocieniania, a to z kolei powoduje zintensyfikowanie niekorzystnego niekiedy procesu dyfuzji pomiędzy szklami rdzeniowymi i płaszczowymi.



Rys. 5. Przebieg krzywych lepkości $\log \eta = f/T$ dla szkieł kompozytowych w światłowodach mozaikowych

Dyfuzja wzajemna składników szklanych jest dalszą poważną barierą trudną do pokonania, szczególnie wtedy, gdy dąży się do uzyskania struktur mozaikowych o skokowej zmianie właściwości n_D, α , zarówno w rdzeniu jak i warstwach płaszczowych.

Przy kompozytowaniu szklanych światłowodowych struktur mozaikowych należy zwracać baczną uwagę na to, by dobierane szkła charakteryzowały się możliwie jak najmniejszą skłonnością do krystalizacji.

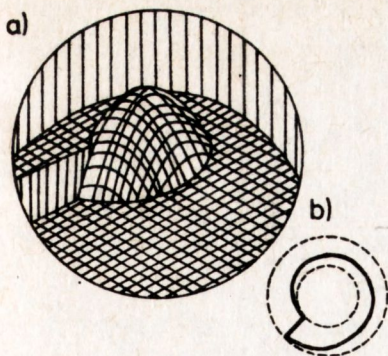
Niebezpieczeństwo krystalizacji pojawia się szczególnie w przypadku niskokrzemionkowych szkieł rdzeniowych o wysokim współczynniku załamania.

Dla uniknięcia krystalizacji czas rozgrzewania preformy, jak również przebywania szkła w wysokiej temperaturze pocieniania, powinien być możliwie krótki.

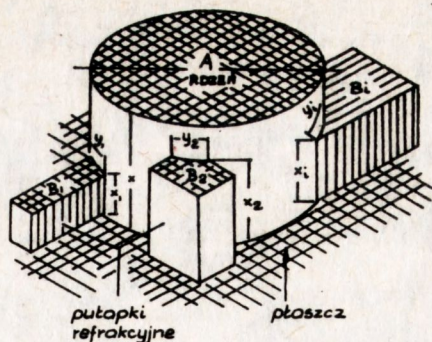
4. PRÓBY APLIKACYJNE

Dla praktycznego zilustrowania materiału przedstawionego w niniejszym artykule pragniemy przedstawić dwa konkretne zastosowania nowej techniki mozaikowej do wytwarzania:

- a/ gradientowego włókna optycznego z niejednorodnym optycznie płaszczem /rys. 6/,
- b/ wielomodowego włókna optycznego ze skokową zmianą współczynnika załamania i z wbudowanymi w płaszcz pułapkami refrakcyjnymi /rys. 7/.



Rys. 6. Wielomodowy światłowód mozaikowy z optycznie niejednorodnym płaszczem
 a/ profil refrakcyjny, b - schematycznie ukazany wzrost apertury numerycznej



Rys. 7. Profil refrakcyjny światłowodu mozaikowego z niejednorodnym płaszczem ze skokową zmianą współczynnika załamania światła z wbudowanymi pułapkami optycznymi

W pierwszym przypadku współczynnik załamania światła w płaszczu wzrasta w sposób ciągły niezgodnie z ruchem wskazówek zegara. Widoczny jest wyraźny uskok współczynnika załamania w płaszczu. Włókno to można zaliczyć do rodziny światłowodów mozaikowych o strukturze zaprezentowanej na rysunku 1d. Stratość tego włókna w sposób istotny zależy od warunków wzbudzenia.

Na rysunku 6a pokazano schematycznie aperturę numeryczną tego włókna, która wzrasta w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara.

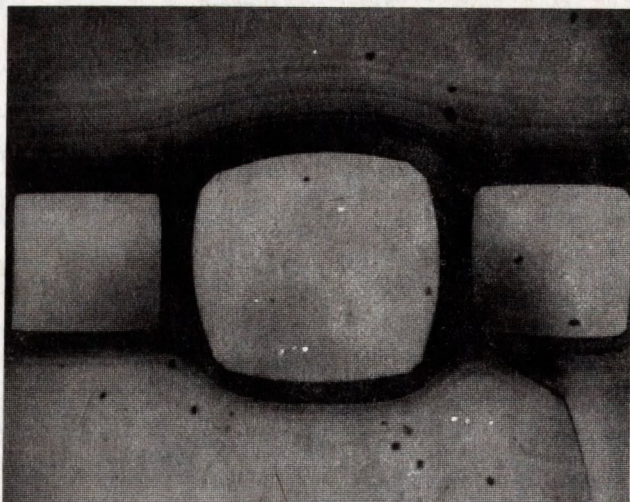
Profil refrakcyjny włókna będącego drugim rozwiązaniem praktycznym przedstawiono na rysunku 7. W płaszczu tego włókna znajdują się wąskie pułapki refrakcyjne odpowiedzialne za wypromieniowywanie mocy w określonym kierunku i pod określonymi kątami. Znaczenie oznaczeń na rysunku jest następujące:

- x - maksymalna różnica współczynnika załamania pomiędzy rdzeniem a płaszczem,
- x_1 - lokalna różnica współczynnika załamania,
- y_1 - lokalna szerokość pułapki refrakcyjnej.

Na rysunku 8 przedstawiono fotografię konkretnego rozwiązania technologicznego światłowodu mozaikowego wielordzeniowego, z układem paskowym rdzeni wtopionych w jednorodny optycznie płaszcz.

Skrajne rdzenie są wykonane z tego samego szkła. Rdzeń środkowy jest zbudowany ze szkła o odmiennej charakterystyce optycznej.

Włókna optyczne, sensory i urządzenia prezentowane w tej pracy znajdują obecnie lub wkrótce znajdą praktyczne zastosowania w systemach optoelektronicznych pracujących głównie w trudnych warunkach środowiskowych. Warunki te mogą zaistnieć w inżynierii elektrycznej



Rys. 8. Przekrój poprzeczny światłowodu mozaikowego w konkretnym rozwiązaniu technologicznym

wysokiej mocy, w systemach pokładowych samolotowych i kosmicznych, w systemach pokładowych morskich, w górnictwie węglowym, w robotyce przemysłowej i in.

Niektóre dokładniejsze dane o tych zoptymalizowanych systemach optoelektronicznych dla niekorzystnych warunków środowiska znaleźć można m.in. w publikacjach [1, 2].

LITERATURA

1. Greenwell R., Romaniuk R.: Fiber optics in harsh and industrial booklet, SPIE'S OE/Fibers '87, San Diego, CA, 16 Aug. 1987
2. Szczot F., Romaniuk R.: Optical fibre local measurement systems for ship, Proceedings of SPIE, vol. 842
D.K. Paul edit., Fiber optics reliability: benign and adverse environments, 1987

/Tekst dostarczono 1988.02.01/