

## ŚWIATŁOWODY KSZTAŁTOWANE

Technika światłowodowa: optotelekomunikacja, technika światłowodów nietelekomunikacyjnych (specjalne lub kształtowane). Światłowody kształtowane stosowane są w telekomunikacji jako elementy funkcjonalne o niewielkich długościach w porównaniu z optycznym torem transmisyjnym, w fonicznych systemach przetwarzania informacji, w hybrydowych zintegrowanych układach optoelektronicznych oraz w czujnikach światłowodowych. Wytwarzane są metodami hybrydowymi pręt-rura, tyglowymi oraz MCVD (niesymetryczne trawienie gazowe, szlifowanie preformy).

- izotropowe
- wielowarstwowe o złożonym profilu refrakcyjnym
- nieosiowe i niecylicydryczne – eliptyczne
- anizotropowe – dwójłomne, polaryzacyjne, polaryzujące,
- wielordzeniowe – bliźniaczo-rdzeniowe
- dziurawe i porowate, z kryształów fonicznych
- złożone, kompozytowe, wielomateriałowe (szklano-ceramiczne, mozaikowe
- nieliniowe i aktywne

### Światłowody izotropowe

Wykorzystywane do detekcji lub pomiaru wielkości elektrycznych poprzez zjawisko Faradaya (skręcenie polaryzacji światła pod wpływem pola magnetycznego).

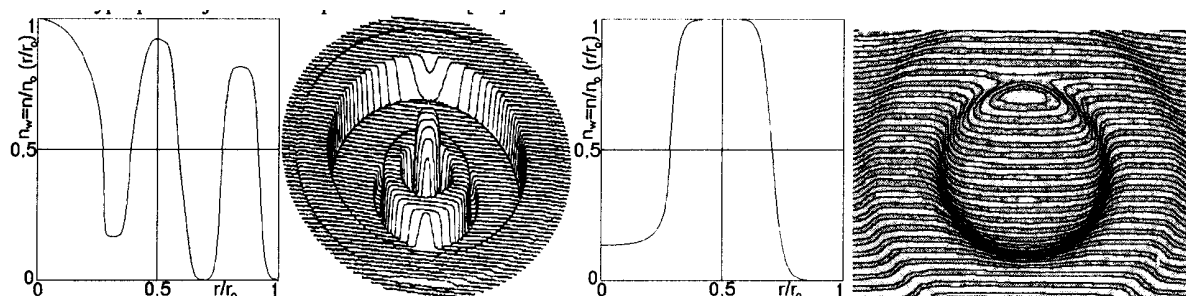


Rys. 1. Trzy odmienne rodzaje wizualizacji profilu refrakcyjnego transmisyjnego, izotropowego, gradientowego, światłowodu wielomodowego. a) trawienie selektywne, b) poprzeczna interferometria prążkowa, c) wzdłużna interferometria prążkowa.

Podstawowy parametr wysokiej jakości światłowodu izotropowego – profil refrakcyjny i jego jednorodność w przekroju poprzecznym i wzdłuż włókna.

### Światłowody o złożonym profilu refrakcyjnym

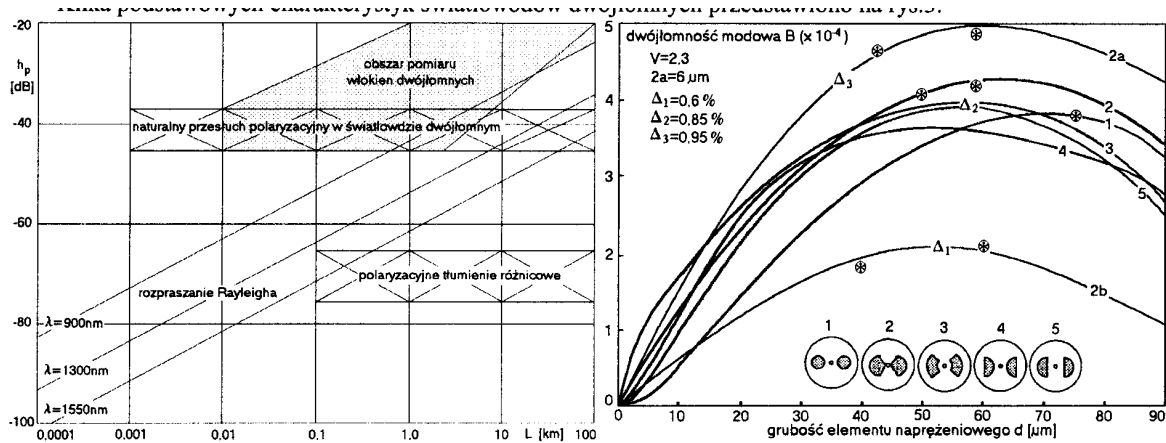
Parametry światłowodu wyrażane liczbami: apertura numeryczna NA, refrakcje różnicowe – bezwzględna  $\Delta n$  lub względna  $\Delta$ , tłumienie jednostkowe, dyspersja. Parametry funkcyjne – zależność  $w/w$  od długości fali oraz profil refrakcyjny  $n(r)$  lub  $n(r, \Theta)$ . Ten ostatni decyduje o wszystkich właściwościach sygnałowych i o wrażliwości światłowodu.



Rys.2. Profile refrakcyjne i ich wizualizacja dla światłowodów złożonych refrakcyjnie. a) Światłowod o profilu podwójne W, b) światłowod o profilu pierścieniowym.

## Światłowody polaryzacyjne

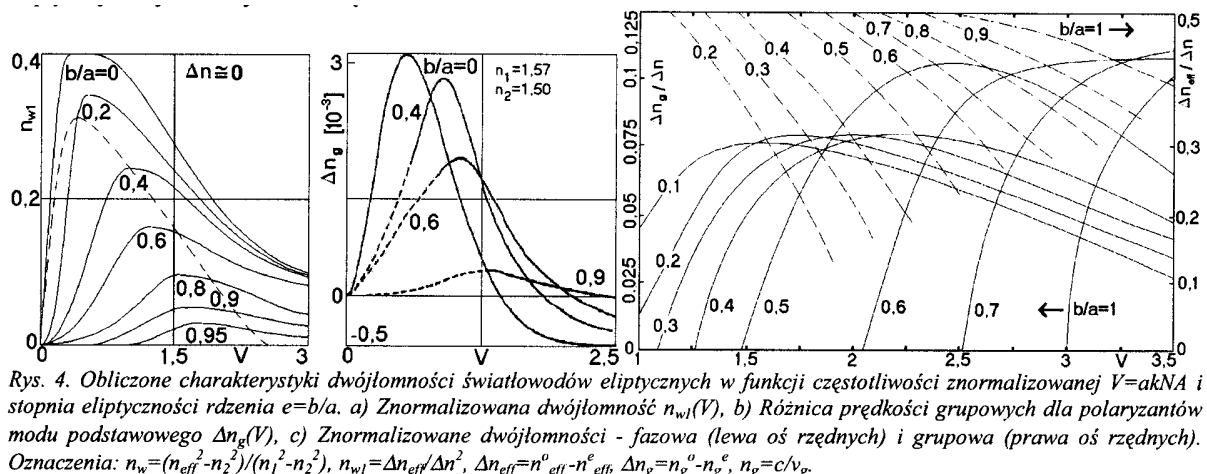
Anizotropowe, silnie dwójłomne o dwójłomności liniowej wprowadzonej do wnętrza światłowodu poprzez płaszczyznowy rozkład naprężeń ( $B=5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\text{dB/dT}=7[\text{rad/m}^\circ\text{C}]$ ,  $\text{dB/d}\varepsilon=100[\text{rad/mm}]$ ).



Rys. 3. Charakterystyki polaryzacyjne światłowodów dwójłomnych. a) Obliczone ograniczenia teoretyczne separacji polaryzantów modu podstawowego w światłowodach silnie dwójłomnych i polaryzujących oraz obszar parametrów światłowodów rzeczywistych. b) Obliczona i zmierzona znormalizowana dwójłomność światłowodów polaryzacyjnych  $B=n_x-n_y$  w funkcji grubości  $d$  borokrzemkowego elementu naprężeniowego dla kilku wartości refrakcji względnej  $\Delta=(n_1-n_2)/n_1$ . Gwiazdkami oznaczono punkty pomiarowe próbek światłowodów.

## Światłowody eliptyczne

O naturalnej geometrycznej dwójłomności liniowej, wielomodowe i jednomodowe do światłowodowych czujników interferometrycznych. Utrzymają stałą polaryzację poprzez separację stałych propagacji dwóch modów podstawowych.



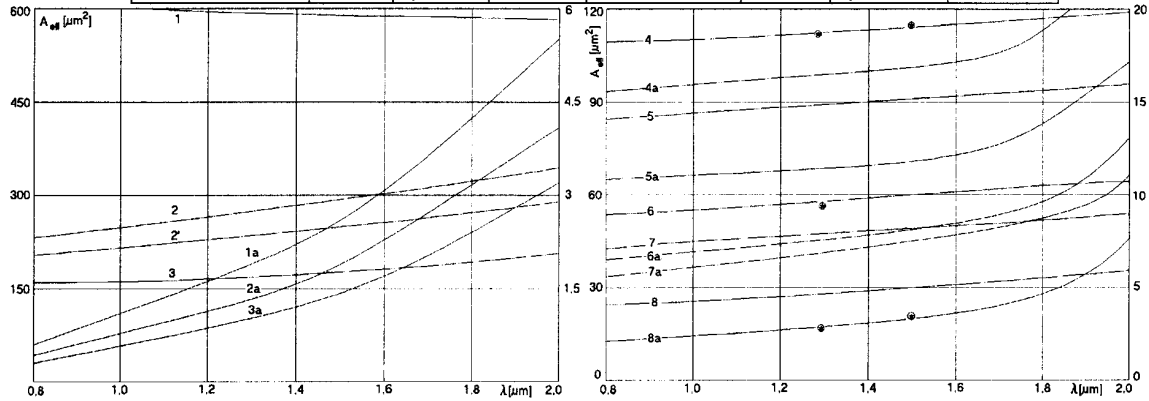
Rys. 4. Obliczone charakterystyki dwójłomności światłowodów eliptycznych w funkcji częstotliwości znormalizowanej  $V=akNA$  i stopnia eliptyczności rdzenia  $e=b/a$ . a) Znormalizowana dwójłomność  $n_{w1}(V)$ , b) Różnica prędkości grupowych dla polaryzantów modu podstawowego  $\Delta n_g(V)$ , c) Znormalizowane dwójłomności - fazowa (lewa oś rzędnych) i grupowa (prawa oś rzędnych). Oznaczenia:  $n_w=(n_{\text{eff}}^2-n_2^2)/(n_1^2-n_2^2)$ ,  $n_{w1}=\Delta n_{\text{eff}}/\Delta n^2$ ,  $\Delta n_{\text{eff}}=n_{\text{eff}}^0-n_{\text{eff}}^e$ ,  $\Delta n_g=n_g^0-n_g^e$ ,  $n_g=c/v_g$ .

## Światłowody dziurawe z amkrootworami i mikrorootworami (porowate)

Tworzony z pojedynczego materiału, a warunki propagacji ustalane są przez rozkład otworów oraz proporcje wymiarowe otwór-przerwa (fotoniczna przerwa zabroniona, lokalna zmiana efektywnego współczynnika załamania – mechanizmy propagacji fali w tym światłowodzie).

Tabela 1. Obliczone wymiary efektywnych pól modowych rodzaju podstawowego  $A_{eff}$  w światłowodach porowatych o różnych wartościach względnego wymiaru poru wypełnionego powietrzem  $r/a$ . Pierwsza kolumna tabeli przedstawia numery obliczonych krzywych na rys. 5.  $a$  - odstęp między porami,  $r=Ca$  - promień rdzenia,  $C$  - stała wymiarowa światłowodu porowatego, współczynnik porowatości;

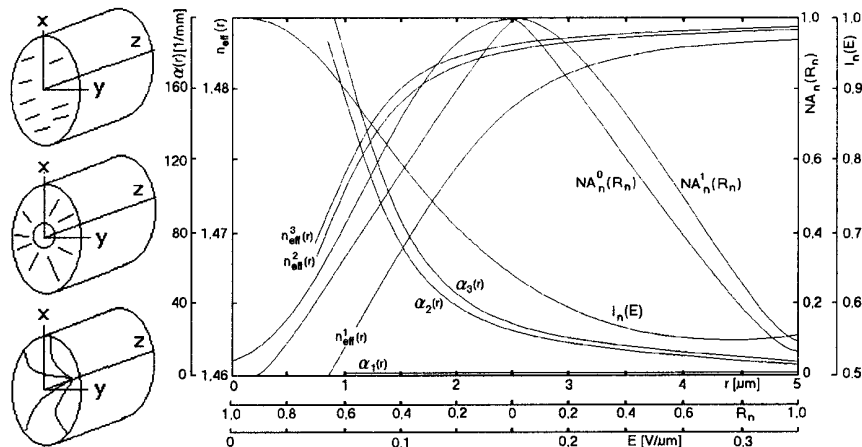
# Krzywa z rys.5	$a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C=r/a$	$A_{eff}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	# Krzywa z rys.5	$a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C=r/a$	$A_{eff}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]
3a	0,75	0,45	1,3				
2a	0,75	0,4	1,6	7	5	0,10	40
1a	0,75	0,35	2,3	6	5	0,05	60
	0,9	0,3	3,1	5	9	0,05	100
8a	1,4	0,15	3,8	4	10	0,05	115
	1,8	0,25	4,7		15	0,05	220
	2,3	0,15	9,4		25	0,02	1500
	2,3	0,3	7,1	1	25	0,25	600
5a	3,2	0,3	12	2 / 2'	25	0,35 / 0,37	280 / 250
8	5	0,2	30	3	25	0,45	170



Rys. 5. Obliczone efektywne pole modu podstawowego  $A_{eff}$  światłowodu porowatego jako funkcja długości fali dla współczynników porowatości  $C$  z tabeli 1. a) Ekstremalne parametry geometryczne światłowodów porowatych – duże pory dają małe wartości  $A_{eff}$  - prawa oś rzędnych i krzywe 1a, 2a i 3a; Duże separacje między otworami dają duże wartości  $A_{eff}$  - lewa oś rzędnych i krzywe 1, 2 i 3. b) Parametry geometryczne światłowodów porowatych dobrane tak, aby otrzymać wartości  $A_{eff}$  porównywalne ze światłowodami klasycznymi. Krzywe 4-8 odnoszą się do lewej osi rzędnych. Krzywe 4a-8a odnoszą się do prawej osi rzędnych.

## Światłowody nieliniowe

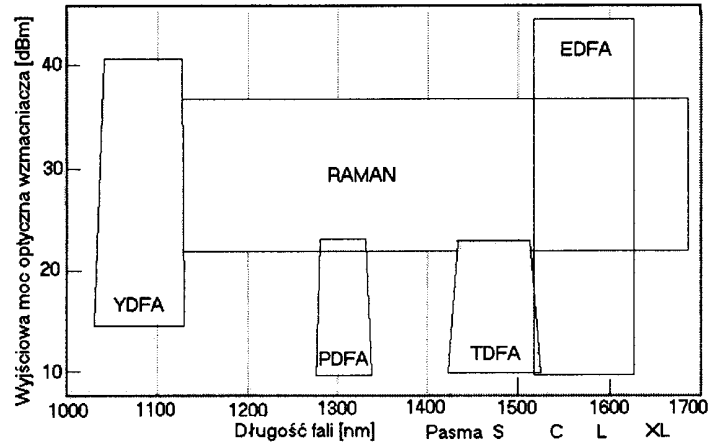
Możliwość wykorzystania zjawisk nieliniowych w światłowodzie do budowy: przesuwników, dzielników i mnożników częstotliwości, wzmacniaczy ramanowskich, elementów nieodwracalnych itp.



Rys.6. Światłowody nieliniowe o rdzeniu ciekłokrystalicznym. a) Ułożenie molekuł ciekłego kryształu w rdzeniu światłowodu, od góry – planarne, radialne, osiowe, b) Charakterystyki światłowodu ciekłokrystalicznego: Efektywny współczynnik załamania  $n_{eff}(r)$  i współczynnik strat  $\alpha(r)$  w funkcji promienia rdzenia  $r$ ; 1 -  $TE_{01}$ , 2 -  $TM_{01}$ ,  $\Theta=90^\circ$ , 3 -  $TM_{01}$ ,  $\Theta=0^\circ$ ,  $\Theta$  - kąt pomiędzy директором i osią symetrii;  $NA_n(R_n, E)$  – rozkład pola dalekiego jako miary zależności apertury numerycznej od zewnętrznego pola elektrycznego,  $E_0=0V/\mu\text{m}$ ,  $E_1=0,2V/\mu\text{m}$ ;  $I_n(E)$  – znormalizowana transmisja światła w światłowodzie ciekłokrystalicznym w funkcji zewnętrznego pola elektrycznego [28].

## Światłowody aktywne i dużej mocy

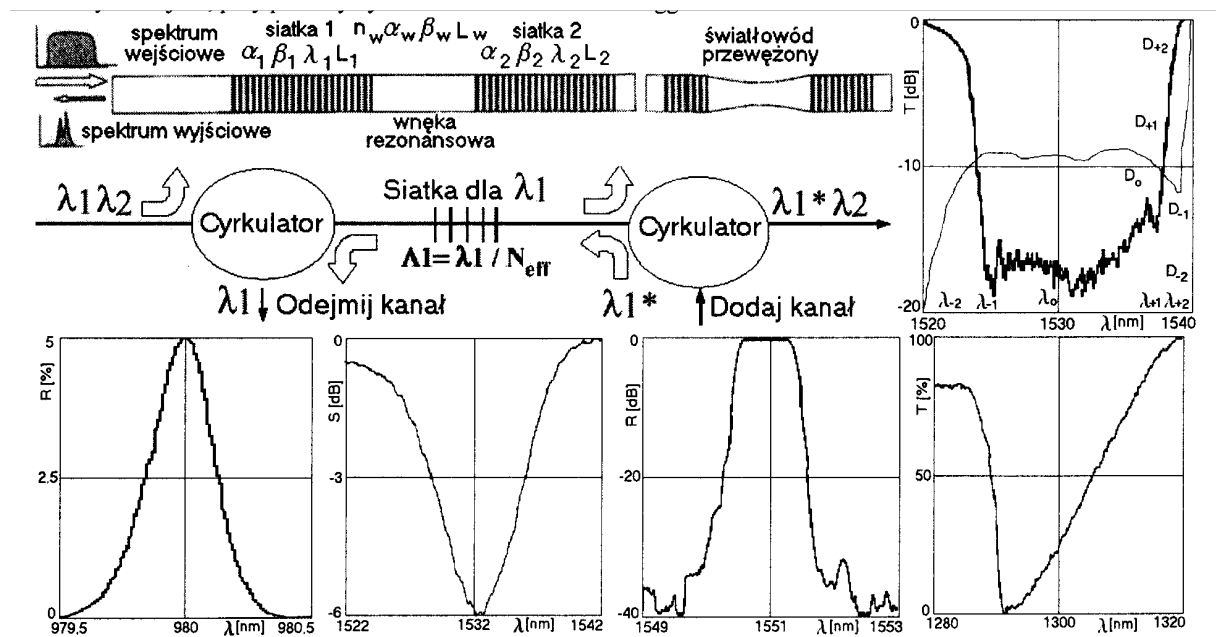
Domieszkowane jonami ziem rzadkich o zastosowaniach telekomunikacyjnych. Wzmacniacze EDFA, TDFA, PDFA.



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie pasm wzmacnienia światłowodów aktywnych wysokokrzemionkowych domieszkowanych ziemiami rzadkimi oraz światłowodów ramanowskich [57].

## Światłowody Braggowskie

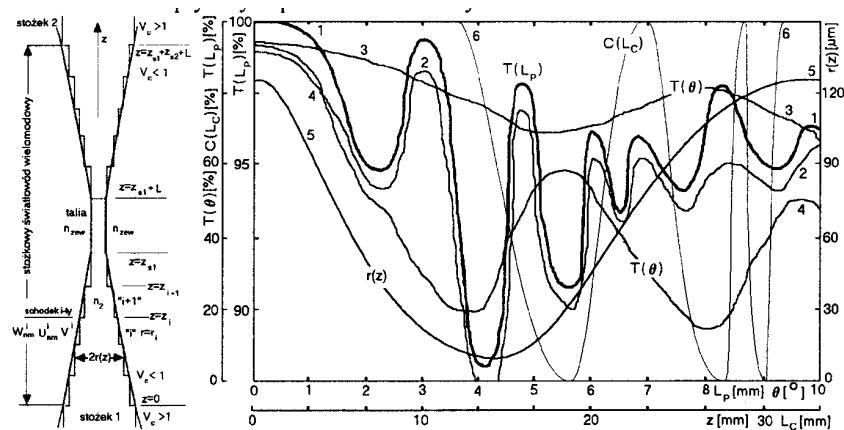
Przeznaczone do systemów telekomunikacyjnych. Z siatką Bragga – bezstratne zwierciadło dla długości fali  $\lambda_1$ .



Rys. 8. Wybrane realizacje układów ze światłowodami Bragga oraz zmierzone charakterystyki transmisyjne światłowodów Bragga [61-62]. a) Wybrane funkcje realizowane przez światłowody braggowskie. Transformacja znormalizowanego widma falowego ITU WDM. Światłowodowa magistrala OADM (Optical Add/Drop Multiplexing). b) Filtr, tłumik emisji spontanicznej we wzmacniaczu EDFA. Charakterystyka transmisji i dyspersji. c) Filtr stabilizujący kilka sygnałów pompy we wzmacniaczu EDFA; d) Filtr wyrównujący wzmacnienie wzmacniacza EDFA w paśmie C; e) Wąskopasmowy filtr dla znormalizowanej siatki fal ITU DWDM; f) Filtr z liniowym zboczem charakterystyki spektralnej dla czujnika światłowodowego. Oznaczenia:  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\Lambda_i$ ,  $n_b$ ,  $L_i$ ,  $N_{eff}$  parametry siatki dyfrakcyjnej i wężki rezonansowej.

## Światłowody przewężane

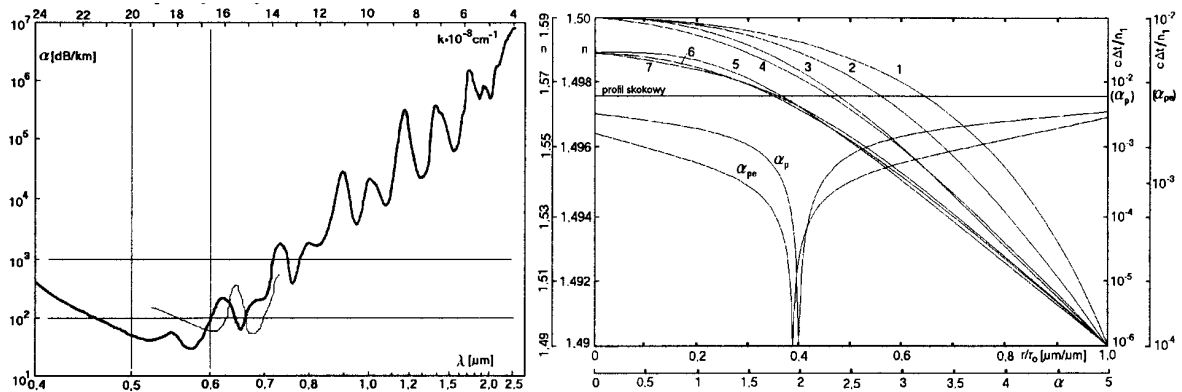
Światłowody o zmiennej wzdłuż włókna aperturze i profilu refrakcyjnym – sprzęgacz, czujnik z polem zanikającym



Rys. 9. Światłowod przewężony, jego model schodkowy do analizy i wybrane charakterystyki obliczone i zmierzone. Dane włókien I i II:  $l_p$  – długość rejonu o  $V_c < 1$   $l_{wm} = 15$  mm, długość talii  $l_t = 2,5$  mm, standardowa średnica zewnętrzna włókna  $125 \mu\text{m}$ , światłowod I – średnica rdzenia  $2r = 4,5 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1,464$ ,  $n_2 = 1,460$ ,  $\lambda_1 = 633$  nm,  $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$ , światłowod II – średnica rdzenia  $9,5 \mu\text{m}$ ; Charakterystyki: 1 i 2 –  $T(L_p)$  – obliczona i zmierzona transmisja  $T$  w funkcji długości przewężenia  $L_p$  dla światłowodu I, 3 i 4 –  $T(\theta)$  – Obliczone charakterystyki transmisji w funkcji kąta wygięcia przewężenia dla światłowodu I i długości fali  $\lambda_2$  i  $\lambda_1$ ; 5 –  $r(z)$  zmierzony profil geometryczny przewężenia światłowodu I; 6 –  $C(L_c)$  - zmierzony współczynnik sprzężenia w funkcji długości wydłużenia w czasie wyciągania przewężenia dla dwóch światłowodów II;

## Światłowody plastikowe

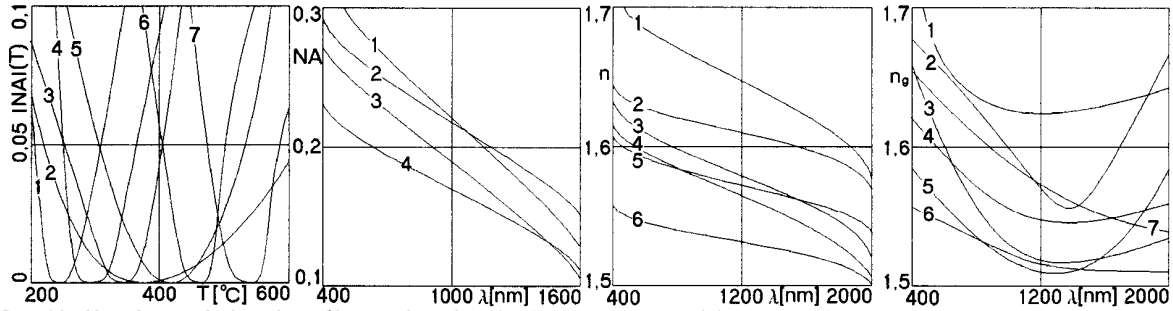
Wielomodowe, gradientowe – bardziej elastyczne od szklanych, inny sposób łączenia i zestawiania, do celów obrazowodowych, czujnikowych, nieliniowych i transmisyjnych na niewielkie odległości. Z PMMA – polimetakrylanu akrylu, FP – fluoropolimerów i PS – polistyrenu.



Rys.10. Charakterystyki światłowodów plastikowych. a) Zmierzone charakterystyki spektralne tłumienia wysokiej jakości światłowodów o profilu refrakcyjnym skokowym z PMMA/FP i PS/PMMA (pomiar własny).  $2a = 100 \mu\text{m}$ ,  $d = 750 \mu\text{m}$ ,  $NA \approx 0,5$ ; b) Obliczone i zmierzone profile refrakcyjne gradientowych światłowodów plastikowych (firmy Asahi GC, BOF MA) i ich charakterystyki dyspersji (pomiar własny). Profile 1-4 obliczone dla skali  $n = 1,49 \div 1,5$ ,  $1 - \alpha_{pe} = 4$ ,  $2 - \alpha_{pe} = 3$ ,  $3 - \alpha_p = 2$ ,  $4 - \alpha_{pe} = 2$ , Profile 5-7 dla skali  $n = 1,49 \div 1,59$ ;  $5 - \alpha_p = 3$ ,  $6 - \text{profil zmierzony}$ ,  $7 - \alpha_{pe} = 3,6$ ;

## Światłowody uczulane technologicznie

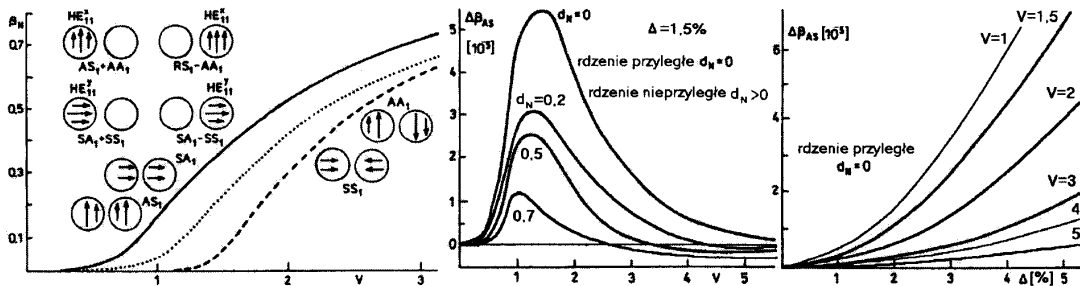
Np. o płaszczu czułym na oddziaływanie pola elektrycznego.



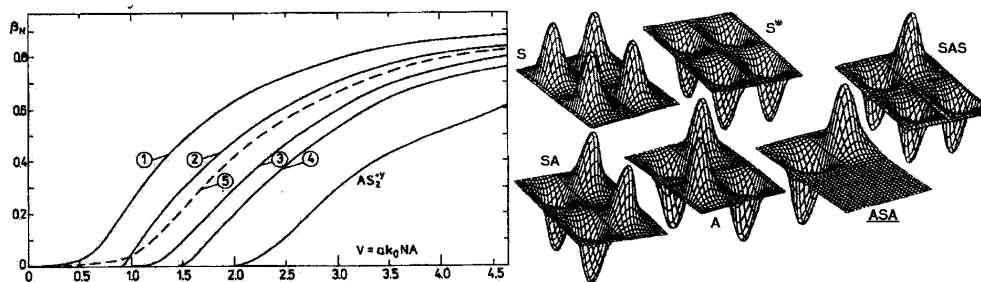
Rys. 11. Charakterystyki światłowodów uczulanych technologicznie poprzez dobór materiałów układu rdzeń-płaszcz. a) Zmierzone zjawisko zerowania się apertury numerycznej światłowodów wykonanych ze szkieł wieloskładnikowych o różnej termicznej dyspersji refrakcji. Szkła BaSF12, BaFN10, SK52, SF7, BaK1, TiF1. b) Zmierzone krzywe dyspersji apertury numerycznej dla światłowodów kształtowanych, c) Zmierzone krzywe dyspersji materiałowej dla wybranych wieloskładnikowych szkieł światłowodowych, d) Dyspersja grupowego współczynnika załamania dla wybranych wieloskładnikowych szkieł światłowodowych. Dla niektórych szkieł nie występuje w użytecznym paśmie zerowanie się dyspersji materiałowej  $dn_g/d\lambda$ .

## Światłowody wielordzeniowe

Interferencja fali pomiędzy rdzeniami, multipleksowanie sygnału pomiędzy rdzeniami oraz transmisja wielokanałowa.



Rys 12. Obliczone z równania własnego podstawowe modowe charakterystyki jednomodowych światłowodów dwurdzeniowych o jednakowych rdzeniach. a) Krzywe dyspersji  $\beta(V)$  dla modów SA1, AS1, HE11 oraz modów SS1, AA1,  $\Delta=1,5\%$ ;  $\Delta$  - względna refrakcja różnicowa światłowodu; S.A.- mody Symetryczno-Antysymetryczne; b) Funkcja dwójtłumności  $\Delta\beta_{AS}(V)$  dla różnych wartości parametru  $d_N=d/a$ ;  $a$ -promień rdzenia,  $d$ -separacja między rdzeniami,  $d_N$ -znormalizowana separacja między rdzeniami;  $\Delta\beta_{AS}$ -różnicowa stała propagacji pomiędzy rdzeniami; c) Funkcja  $\Delta\beta_{AS}(\Delta)$  dla różnych wartości częstotliwości znormalizowanej  $V=1-5$ ;  $V$ -częstotliwość znormalizowana;



Rys 13. Charakterystyki modowe światłowodu czterordzeniowego, o kwadratowym układzie jednakowych rdzeni. a) Obliczone, znormalizowane stałe propagacji modów podstawowych SA światłowodu czterordzeniowego o kwadratowym układzie jednakowych rdzeni w funkcji częstotliwości znormalizowanej (podstawowe charakterystyki dyspersyjne);  $\beta_N=(\beta^2/k_0^2-\epsilon_s)(\epsilon_r-\epsilon_s)$ ;  $\epsilon_i(i=1,2,3,4)$  refrakcja rdzeni;  $\epsilon_i(i=5)$  refrakcja płaszczka; warunki homordzeniowości-  $n_1=n_2=n_3=n_4=n_r=(\epsilon_i)^{1/2}>n_s=n_p$ ,  $a_1=a_2=a_3=a_4=a$ ; Dane światłowodu: średnica rdzenia  $2a=2,5\mu m$ , separacja międzyrdzeniowa  $d=0,5\mu m$ ,  $NA=0,05=0$ , refrakcja rdzenia  $n_1=n_r=1,6$ , profil refrakcyjny skokowy, krzywa 1 - cztery mody zdegenerowane w przypadku światłowodu idealnie izotropowego SA<sup>xx</sup>, SA<sup>xy</sup>, AS<sup>xy</sup>, AS<sup>yy</sup>; krzywa 2 - rodzina modów trzyindeksowa np. SAA<sup>xx</sup>, ASA<sup>xy</sup>, itp.; krzywa 3 - rodzaje jednoindeksowe: S<sup>xx</sup>, S<sup>xy</sup>, S<sup>yy</sup>, A<sup>xx</sup>, A<sup>xy</sup>, A<sup>yy</sup>, gdzie np. A<sup>\*</sup>=A±z odwróconą kolejnością znaków + i -, tzn. zamiast ± powinno być ∓; krzywa 4 - rodzaje podstawowe SA<sup>xy</sup>, SA<sup>yy</sup>, AS<sup>xx</sup>, AS<sup>xy</sup>; krzywa 5 - odniesienie dla rodzaju podstawowego HE<sub>11</sub> dla cylindrycznego światłowodu jednorodnego o analogicznych parametrach, krzywa AS<sub>2</sub><sup>xy</sup> - odcięcie i krzywa dyspersji modu drugiego rzędu w światłowodzie czterordzeniowym; b) Schematycznie przedstawione, obliczone numerycznie, rozkłady pola modów podstawowych SA w analizowanym światłowodzie czterordzeniowym; Podstawowy mod symetryczny (S), Podstawowy mod symetryczno-antysymetryczny (SA), Podstawowy mod antysymetryczny (A), Podstawowy mod symetryczny SA (SAS), Sprzężony mod antysymetryczny SA (ASA=SAS+ASS).

Na podstawie: R.S. Romaniuk, „Światłowody kształtowane”