

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

BIULETYN

INFORMACYJNY

2 (180)

1979

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 19

WARSZAWA 1979

NR 2/180/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędziński
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

doc. mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:
Instytut Łączności
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej
Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: W. Żychowski

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 620. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 30.01.1979 r.
Druk ukończono w lutym 1979 r.

Władysław Cetner

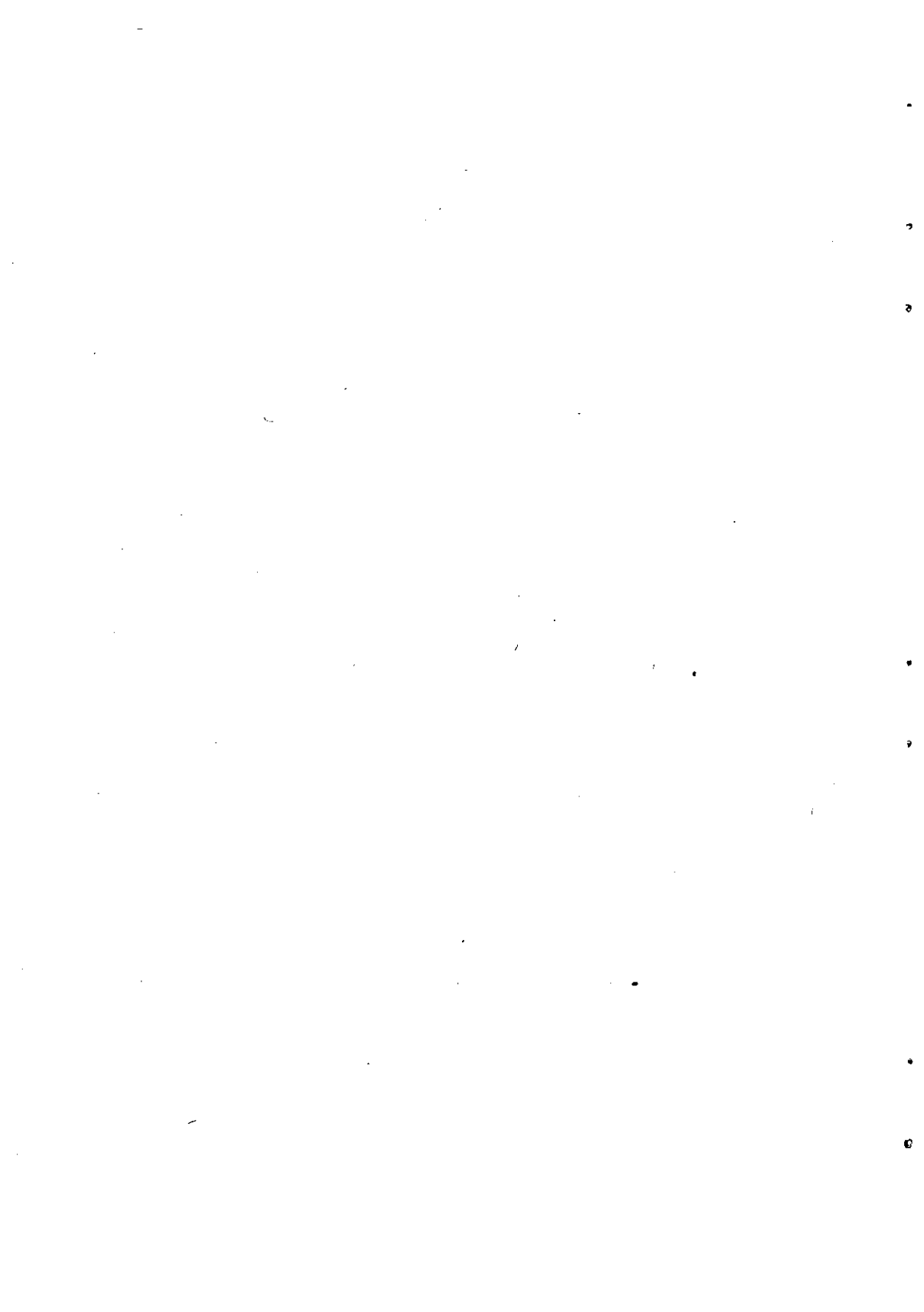
BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

Nr

DYSPERSJA ŚWIATŁOWODOWA

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Czynniki wpływające na pojemność informacyjną światłowodowego systemu łączności	3
3. Analiza modowa oraz promieniowa propagacji energii optycznej w światłowodzie	4
4. Struktury i podstawowe parametry włókien światłowodowych	8
5. Zjawiska dyspersji w światłowodach	13
5.1. Dyspersja materiałowa	14
5.2. Dyspersja falowodowa	16
5.3. Dyspersja modowa	17
6. Optymalny profil zmiany współczynnika załamania rdzenia światłowodu	20
7. Wpływ technologii włókna na dyspersję modową światłowodu	23
8. Uwagi końcowe i wnioski	25
Wykaz literatury	28



DYSPERSJA ŚWIATŁOWODOWA

1. WSTĘP

Postęp, jaki został dokonany w ostatnich kilku latach w dziedzinie światłowodowych systemów łączności /poprzez osiągnięcie bardzo wysokich jakościowych parametrów podzespołów i elementów do tych systemów/ spowodował, że obecnie nie podlega już dyskusji, zarówno w sensie technicznym jak i ekonomicznym, możliwość szerokiego zastosowania światłowodów w telekomunikacji już w najbliższych latach. Do tych szczególnie ważnych osiągnięć należy zaliczyć: długi czas pracy laserów półprzewodnikowych, osiągnięta szerokość pasma częstotliwości przy ich bezpośredniej modulacji przewyższająca 1 Gbit/s, obniżenie strat na złączach odcinków światłowodowych do ok. 0,1 dB, a przede wszystkim zmniejszenie do wartości poniżej 1 dB/km tłumienności wielomodowych włókien światłowodowych. Taką wartość tłumienności jeszcze kilka lat temu udawadniano teoretycznie jako niemożliwą do osiągnięcia.

Z tych względów technika światłowodowa jest już obecnie doświadczalnie wprowadzana do prawie wszystkich służb telekomunikacyjnych, a w szczególności takich, jak: łącza na krótkie odległości, systemy w obiektach zamkniętych, anteny zbiorowe, telewizja przewodowa, zintegrowana sieć abonencka, dostarczająca wielu informacji i stanowiąca rozszerzenie telewizji przewodowej, wreszcie linie dalekosiężne. Przewiduje się nawet instalowanie transoceanicznego światłowodowego kabla podwodnego.

Należy się jednak liczyć również z jednoczesnym występowaniem różnego rodzaju trudności przy szerokim wprowadzaniu nowej techniki, których nie można nie doceniać. Jako czynniki opóźniające można tu wymienić: zupełnie nowa i trudna technika, która wymaga przygotowania do niej służb eksploatacyjnych, konieczność amortyzacji nakładów poniesionych na produkcję kabli współosiowych /co będzie poważnym czynnikiem hamującym/, następnie duże środki finansowe potrzebne na badania i wdrażanie do produkcji elementów systemów światłowodowych. Wymagać to będzie, szczególnie w krajach mniej zaawansowanych w tej dziedzinie techniki, importu kosztownych urządzeń pomiarowych oraz trudniejszych do wyprodukowania elementów, z ewentualnością nawet

zakupu odpowiednich licencji. Należy również liczyć się z trudnościami zakupu elementów i podzespołów o wysokich parametrach, rezerwowanych w pierwszym rzędzie dla urządzeń wojskowych, gdzie technika światłowodowa znajduje najbardziej praktyczne zastosowanie.

W zakresie samej techniki światłowodowej jest jednak jeszcze dużo do zrobienia i ulepszenia. Dotyczy to, np. problemu zwiększenia niezawodności źródeł promieniowania w bardziej optymalnym niż $0,8 - 0,9 \mu\text{m}$ zakresie fal, tj. w zakresie $1,2 - 1,5 \mu\text{m}$, opracowania bardziej precyzyjnych metod pomiarowych, dalszego zmniejszania kosztów wytwarzania elementów systemów światłowodowych itp. Również matematyczne opanowanie teorii związanej ze zjawiskami propagacyjnymi fal optycznych w światłowodach wymaga jeszcze dużego nakładu pracy.

Uzyskanie wyjątkowo małego tłumienia energii optycznej w światłowodach, poprzez osiągnięcie wyjątkowo czystego materiału wyjściowego oraz udoskonalenia technologii wytwarzania włókna światłowodowego, spowodowało zwrócenie większej uwagi na inne zjawiska propagacyjne, częściowo znane i badane już uprzednio, ale wobec występowania dużych wartości tłumienności odgrywające znacznie mniejszą rolę niż obecnie. Zjawiska te, to np: wypromieniowywanie energii optycznej wskutek występowania tzw. mikrozgień, powstających przy pokrywaniu włókna światłowodowego warstwą ochronną lub przy produkcji kabli optycznych, zjawisko powstawania tzw. modów upływności powodujących dodatkowe straty w wielomodowych światłowodach oraz przede wszystkim zjawisko dyspersji światłowodowej. Dyspersja wraz z tłumiennością stanowią podstawowe parametry transmisyjne światłowodu decydujące o pojemności informacyjnej systemu oraz o odległości pomiędzy wzmacniaczami regeneracyjnymi długiej linii światłowodowej.

Zjawisku dyspersji poświęcone jest niniejsze opracowanie. Ponieważ jednak zjawisko to jest skomplikowane fizycznie i trudne do analizy teoretycznej, więc zapoznanie się z samą dyspersją poprzedzone będzie rozważaniem odnoszącym się do czynników wpływających na ograniczenie pojemności informacyjnej systemu światłowodowego, krótkim wyjaśnieniem pojęcia modów fali optycznej oraz zapoznaniem się z istniejącymi strukturami światłowodów, mającymi istotny wpływ na dyspersję.

Opracowanie jest przedstawione w formie krótkiej i upraszczającej niektóre zagadnienia, dotyczy ono raczej fizycznej, jakościowej strony zjawiska dyspersji ze skróceniem do minimum ujęcia teoretycznego, ze względu na towarzyszący mu skomplikowany aparat matematyczny. Takie ujęcie wynika z ograniczenia objętości artykułu a przede

wszystkim z jego przeznaczenia dla szerszego grona pracowników technicznych łączności.

2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA POJEMNOŚĆ INFORMACYJNĄ ŚWIATŁOWODOWEGO SYSTEMU ŁĄCZNOŚCI

Szerokość przekazywanego pasma informacyjnego w systemie światłowodowym mierzona w technice cyfrowej w bitach na sekundę i na jednostkę długości światłowodu, lub w technice analogowej w Hz, zależy od:

- a/ parametrów źródła promieniowania, a więc od ogólnej mocy promieniowania /luminancji energetycznej/, charakterystyki przestrzennej promieniowania, szerokości widma promieniowania, od liczby promieniowanych przez źródło modów oraz od rozmiarów powierzchni czynnej /promieniującej/ lasera półprzewodnikowego lub diody luminescencyjnej;
- b/ sprawności sprzężenia źródła promieniowania z włóknom światłowodowym, tj. od stosunku mocy wprowadzonej do światłowodu do ogólnej mocy wypromieniowywanej przez źródło;
- c/ rodzaju światłowodu, tj. od przebiegu zmiany /profilu/ współczynnika załamania wzdłuż średnicy przekroju poprzecznego włókna, oraz od liczby propagowanych w światłowodzie modów^{1/};
- d/ stabilizacji modów w światłowodzie, zależnej od niejednorodności fizycznej i materiałowej włókna, a związanej ze zjawiskami sprzęgania się i konwersji modów^{1/};
- e/ strat w włóknie światłowodowym wskutek pochłaniania energii optycznej przez różne zanieczyszczenia materiału włókna z wodorotlenkiem OH włącznie, strat na rozproszenie, strat w okładzinie i na wypromieniowywanie energii - w sumie składających się na zjawisko tłumienia światłowodu, mierzone w dB/km;
- f/ strat na złączach odcinków światłowodu;
- g/ długości fali promieniowanej przez źródło, od której zależy tłumienie /wraz z rozproszeniem/ oraz dyspersja światłowodu;
- h/ dyspersji, objawiającej się, w przypadku przekazywania informacji techniką impulsową, "rozpływaniem się" impulsów, tj. rozszerzaniem się impulsów przy jednoczesnym zmniejszaniu się ich amplitu-

^{1/} patrz § 3.

dy. Przy przekazywaniu informacji techniką analogową dyspersję mierzymy szerokością transmitowanego pasma modulacyjnego w Hz. Zjawisko dyspersji silnie zależy od czynników wymienionych pod p. a, c, d, g oraz pośrednio od pozostałych punktów.

Poza wymienionymi czynnikami istotną rolę odgrywa tu oczywiście szerokość pasma, z jaką daje się modulować źródło promieniowania oraz parametry fotodetektora, a więc czynniki nie związane z dyspersją.

W ostatecznym bilansie decydującymi dla pojemności informacyjnego systemu światłowodowego, jak każdego systemu transmisyjnego, będą: stosunek odbieranego sygnału użytecznego do szumu S/N , oraz dopuszczalna stopa błędów.

Długość linii światłowodowej lub odległość pomiędzy wzmacniaczami regeneracyjnymi zależy bezpośrednio zarówno od tłumienności światłowodu, jak i wartości dyspersji, przy czym od tłumienności zależy proporcjonalnie, natomiast od dyspersji nie zawsze proporcjonalnie /cc będzie omówione poniżej/.

Mechanizmy zjawisk powodujące poszczególne rodzaje strat w światłowodach, zależne od podstawowego materiału i jego celowych domieszek oraz od technologii wykonywania włókna światłowodowego, nie będą tu bliżej rozpatrywane. Zatrzymamy się tu tylko na tych aspektach, które mają bezpośredni wpływ na dyspersję.

3. ANALIZA MODOWA ORAZ PROMIENIOWA PROPAGACJI ENERGII OPTYCZNEJ W ŚWIATŁOWODZIE

Zjawiska propagacji energii optycznej w dielektrycznym światłowodzie ujmuje w sposób najbardziej fizycznie uzasadniony teoria falowa. Określenie tych zjawisk wyprowadza się z równań Maxwella, z uwzględnieniem warunków granicznych na styku rdzeń-okładzina włókna światłowodowego, tj. ciągłości na tej granicy stycznych składowych pól elektrycznego i magnetycznego. Taka analiza zjawisk propagacyjnych prowadzi do pojęcia rozchodzenia się fali optycznej w światłowodzie w postaci tzw. modów, tj. rodzajów fali różniących się charakterystyczną dla każdego modu konfiguracją pola elektromagnetycznego.

W światłowodach z rdzeniem i okładziną /o różnych współczynnikach załamania/ występują dwa rodzaje modów: poprzeczne mody symetryczne, przy których nie występują składowe pola wzdłuż osi światłowodu oraz mody zwane hybrydowymi, w których występują również i wzdłużne, skła-

dowe pola elektrycznego oraz magnetycznego. Pierwsze z nich są oznaczane symbolami TE_{Om} i TM_{Om} /lub TH_{Om} /, drugie - symbolami HE_{nm} i EH_{nm} . Indeksy n i m są liczbami całkowitymi i dodatnimi, a pierwsza litera wskazuje, które pole elektryczne czy magnetyczne przeważa.

Indeksy wynikają z funkcji Bessela, stosowanej do analizy zjawisk w rdzeniu i zmodyfikowanej funkcji Hankela dla okładziny. Indeks n / $n = 0$ dla modów poprzecznych/ oznacza rząd funkcji Bessela lub, objaśniając bardziej fizycznie, liczbę zmian pola wzdłuż współrzędnej kątowej; indeks m natomiast wskazuje na numer porządkowy pierwiastka równania charakterystycznego funkcji lub inaczej - oznacza liczbę zmian pola wzdłuż promienia przekroju światłowodu.

Należy tu podkreślić, że rozróżnianie rdzenia i okładziny odnosi się do wszystkich stosowanych obecnie światłowodów zarówno o profilu zmian współczynnika załamania w rdzeniu skokowym, jak i ciągłym. Będzie to dokładniej wyjaśnione w następnym rozdziale.

Brak miejsca, jak i przeznaczenie niniejszego opracowania nie pozwalają na obszerniejsze ujęcie podstaw teorii falowej w zastosowaniu do światłowodów. Poniżej podane więc będą tylko podstawowe pojęcia zaczerpnięte z falowej teorii propagacji.

W tabelicy 1 [1] podano propagowane w światłowodach rodzaje modów i ich liczbę, w zależności od charakterystycznego wyrażenia, wyrowadzonego z analizy falowej i oznaczonego literą V , zwanego znormalizowaną częstotliwością /lub znormalizowaną średnicą rdzenia/. Wyrażenie to określa zdolność podtrzymywania propagacji określonych modów w światłowodzie. Wartość V określa się prostą zależnością:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

gdzie: a - promień rdzenia światłowodu

λ_0 - długość fali w wolnej przestrzeni

n_1 - współczynnik załamania materiału rdzenia lub dla profilu ciągłego w pobliżu osi rdzenia

n_2 - współczynnik załamania materiału okładziny.

Aby fala optyczna była propagowana w światłowodzie, musi być $n_1 > n_2$. Ważnym pojęciem jest tu stała propagacji modowej β_{nm} , różna dla każdego modu. Stała ta jest trudna do obliczania, stosuje się więc zwykle metody przybliżone. Wartość jej jest zawarta pomiędzy:

$$k_0 n_1 > \beta_{nm} > k_0 n_2$$

gdzie $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ zwie się stałą swobodnej propagacji / λ_0 długość fali w próżni/.

T a b l i c a 1

Zakres zmian wartości V	Występujące mody /łącznie z już wykazanymi/	Liczba modów
0, - 2,4048	HE ₁₁	2.
2,4048 - 3,8317	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₂	6
3,8317 - 5,1356	HE ₁₂ , EH ₁₁ ^{x/} , HE ₃₁	12
5,1356 - 5,5201	EH ₂₁ , HE ₄₁	16
5,5201 - 6,3802	TE ₀₂ , TM ₃₂ , HE ₂₂	20
6,3802 - 7,0156	EH ₃₁ , HE ₅₁	24
7,0156 - 7,5883	HE ₁₂ , EH ₁₂ , HE ₃₂	30.

x/ Według niektórych autorów mod EH₁₁ nie występuje w światłowodzie o skokowym profilu.

Liczba modów podana w tabelicy uwzględnia występowanie modów hybrydowych w dwóch odmianach różniących się ortogonalnie polaryzacją. W praktyce jednak zjawisko polaryzacji fali w systemach łączności światłowodowej nie daje się jak dotychczas wykorzystać, gdyż nawet małe niejednorodności struktury materiałowej włókna światłowodowego stale zmieniają płaszczyznę polaryzacji fali.

Jak wynika z krótkiego przedstawienia podstaw analizy modowej propagacji energii optycznej w światłowodzie oraz z tabelicy 1, mody mają charakter dyskretny, tzn. w światłowodzie o danym promieniu rdzenia i różnicy $n_1 - n_2$ występować może tylko określona liczba modów. Inaczej mówiąc wartość V wyznacza określone mody obcięcia, które nie mogą przejść przez światłowód o charakteryzującej go liczbie V, a więc i o danej średnicy rdzenia. W przypadku gdy $V \leq 2,4$ dla profilu skokowego /lub $V \leq 3,4$ dla profilu parabolicznej zmiany współczynnika załamania/ występuje tylko jeden mod HE₁₁ zwany podstawowym. Mod ten występuje więc w światłowodach o dowolnej średnicy rdzenia. Włókno o wartości $V \leq 2,4$ /zwykle o średnicy kilku mikrometrów/ jest więc włóknem jednomodowym, ważnym z punktu widzenia dyspersji oraz zastosowań praktycznych. Włókna o podanych w tabeli 1 wartościach V zwa się małomodowymi. W włóknach o większej wartości V jest prowadzona duża liczba modów, wzrastająca w przybliżeniu według zależności $N \approx \frac{1}{2} V^2$ dla profilu skokowego. Dla włókna natomiast o profilu ciągłym $N = \frac{1}{4} V^2 + \frac{1}{3} V^2$. Są to więc światłowody wielomodowe. Przy zwykle występującej w włóknach wielomodowych średnicach rdzenia około kilkudziesięciu mikrometrów i względnej różnicy współczynników załama-

nia $\Delta n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cong 0,01$ światłowód zawierać będzie setki, a nawet tysiące propagowanych modów.

Realność występowania modów w światłowodach potwierdzają fotografie rozkładu pola promieniowania w przekroju poprzecznym włókna, wykonywane po wyjściu promieniowania z krótkiego odcinka światłowodu małomodowego /czyli obrazu rozkładu pola w tzw. bliskim polu/. Na rys. 1^x[2] jest pokazana przykładowo taka fotografia.

Przedstawiony krótki zarys podstawowych zagadnień dotyczących propagacji energii optycznej w światłowodach może sugerować, że występujące w światłowodach zjawiska propagacyjne są stosunkowo proste i jednoznaczne fizycznie oraz że dają się dość łatwo ująć matematycznie. Tak jednak nie jest - propagacja w światłowodzie, a szczególnie w światłowodzie wielomodowym, jest zjawiskiem skomplikowanym, jak również skomplikowany i trudny jest aparat matematyczny usiłujący wyjaśnić je teoretycznie.

Mody w światłowodzie, z chwilą wprowadzenia promieniowania do światłowodu, nie zachowują się stabilnie, szczególnie na początku trasy. Podlegają one konwersji i sprzężeniu, tzn. mody jednego rzędu przechodzą w mody innego rzędu, wyższego lub niższego, oraz łączą się w pewne zgrupowania. Są to zjawiska trudne z góry do przewidzenia. Występują również tzw. mody upływności /znów głównie na początkowym odcinku światłowodu/ przechodzące z rdzenia do okładziny, gdzie są wytłumiane lub też wypromieniowywane. Jak już było wzmiankowane - nakładanie przy produkcji kabli optycznych warstw ochronnych na włókno światłowodowe powoduje powstawanie mikrozgieć, znów komplikując stabilizację mechanizmu propagacji, wskutek stosunkowo dużego wypromieniowywania energii optycznej poprzez boczne powierzchnie włókna [1, 4, 5, 15].

W celu zmniejszenia zjawiska ograniczania przez dyspersję szerokości przekazywanego pasma informacyjnego, wprowadzono światłowody o ciągłej zmianie współczynnika załamania rdzenia od osi do okładziny w przekroju światłowodu. Wprowadza to dalsze skomplikowanie teoretycznego ujęcia propagacji. Trudności matematyczne wymagały opracowania metod uproszczonych, jak np. metoda WKB i inne.

Ostatnio do analizy niektórych zjawisk i zagadnień propagacyjnych jest wprowadzana metoda promieniowa [3,4]. Metoda ta opiera się nie na pojęciu modów wynikających z teorii falowej, lecz na pojęciu promieni, a więc analogicznie jak w optyce geometrycznej. Ogranicza się ona wyłącznie do rozpatrywania zjawisk występujących w wielomodowych światłowodach. Trudno byłoby wytłumaczyć fizycznie za pomocą

^xRysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

promieni niezaprzeczalną dyskretyzacją modów, tj. ściśle ograniczenie liczby promieni wchodzących i rozchodzących się w światłowodzie o małej średnicy rdzenia, a tym bardziej ograniczenie do jednego tylko promienia w światłowodzie jednomodowym. Natomiast w wielomodowych światłowodach, przy kilkuset lub więcej propagowanych modach, udaje się zastąpić mody pojęciem promieni optycznych. Metoda promieniowa daje w szeregu przypadków prostsze i mniej pracochłonne rozwiązania od analizy modowej; są to rozwiązania przybliżone, ale wystarczające dla potrzeb praktycznych.

Należy jednak podkreślić, że modowe przedstawienie zjawisk propagacyjnych w światłowodach daje obraz bardziej prawidłowy fizycznie i jest metodą bardziej uniwersalną, odnoszącą się do wszelkich zjawisk propagacyjnych oraz do wszystkich struktur światłowodowych. W praktyce wielu autorów posiłkuje się pojęciami zapożyczonymi zarówno z jednej, jak i z drugiej teorii.

Powracając do zagadnienia stabilizacji modów w światłowodzie ważnej z punktu widzenia dyspersji, należy podkreślić, że konwersja i sprzężanie się modów, występujące zwykle na początkowym odcinku kilkudziesięciu czy kilkuset i więcej metrów światłowodu /zależnie głównie od nierównomierności struktury włókna/, wywołują również zmianę rozkładu energii optycznej pomiędzy modami. Po przejściu odcinka stabilizowania się następuje korzystna dla propagacji równowaga układu modów. Po osiągnięciu stabilizacji dyspersja światłowodu staje się proporcjonalna nie do długości trasy L , a do $L^{1/2}$.

Ciekawa jest występująca tu kontrowersja: niedoskonałości strukturalne i materiałowe światłowodu /a również złącza odcinków światłowodów/ wprowadzają z jednej strony straty tłumieniowe, a z drugiej zaś powodują szybszą stabilizację modów i dość znaczne zmniejszenie dyspersji.

Zjawisko sprzężania się modów w określone grupy /o bliskich wartościach stałych propagacji modowej/ ma swój odpowiednik w metodzie promieniowej, w której również operuje się łączeniem się promieni w określone wiązki.

4. STRUKTURY I PODSTAWOWE PARAMETRY WŁÓKIEN ŚWIATŁOWODOWYCH

Włókna światłowodowe różnią się od siebie składem materiałowym oraz strukturą uzależnioną od rozkładu wartości współczynnika załamania rdzenia i okładziny, który z kolei jest związany również ze składem materiałowym. Wytwarzana celowo zmiana współczynnika załamania wzdłuż średnicy przekroju włókna /głównie rdzenia/ nazwana zo-

stała już skrótowo profilem światłowodu. Wszelkie zmiany współczynnika załamania wzdłuż światłowodu, podobnie jak i zmiany geometryczne włókna należą do wad strukturalnych, które nie powinny przekraczać dopuszczalnych tolerancji.

Szkodliwe są również, odbiegające od założonych, zmiany wartości współczynnika załamania w przekroju włókna światłowodowego.

Podstawowe parametry transmisyjne światłowodu są to tłumienność mierzona w dB/km oraz dyspersja. Zjawisko tłumienia światłowodu nie stanowi przedmiotu niniejszego opracowania, jednak w rzeczywistości obydwie te zjawiska występują w światłowodach zawsze jednocześnie i mają również często wzajemny wpływ na siebie. Z tego względu wydaje się uzasadnione krótkie przedstawienie czynników wpływających na straty energii promieniowania optycznego w światłowodzie.

Podstawowy materiał rdzenia i okładziny włókna światłowodowego to kwarc, a częściej krzemionka $/\text{SiO}_2/$. Okładzina jest czasem wytwarzana również z tworzywa sztucznego. Do kwarcu i krzemionki /w szczególności na rdzeń światłowodu/ dodaje się celowo składniki takie, jak german, bor, fosfor, fluor i inne, zmieniające w wymaganym stopniu wartości współczynnika załamania. O tych składnikach i o technologii włókna, mających wpływ na dyspersję światłowodu będzie jeszcze mowa w rozdz. 7.

Główną przeszkodą w osiągnięciu małej tłumienności światłowodów stanowiły przez długi czas zanieczyszczenia materiału podstawowego przez jony wielu metali takich jak mangan, nikiel, chrom, wanad, żelazo, miedź i kobalt oraz rodniki OH, powstające wskutek zawartości śladów wody w materiale wyjściowym. Tłumienie w włóknach światłowodowych jest powodowane pochłanianiem /rezonansowym/ energii optycznej przez cząsteczki tych zanieczyszczeń. Stopniowo sprowadzono zawartości jonów metali do bardzo nieznacznych wartości /rzędu $10^{-6} \div 10^{-9}$ /, umożliwiając przez to osiągnięcie wyjątkowo małych wartości tłumienności w dość szerokim zakresie fal optycznych. Trudniejszym zadaniem było znaczne zmniejszenie zawartości rodników OH stanowiących jeszcze do chwili obecnej problem nie całkowicie rozwiązany /rys. 4/. Częstotliwość rezonansowa OH, czyli podstawowa absorpcja, zachodzi przy długości fali $2,73 \mu\text{m}$. Duży wzrost tłumienia następuje także przy 2-giej i 3-ciej harmonicznej, a więc w bardzo ważnych dla pracy światłowodu zakresach fal /ok. $0,9$ i $1,3 \mu\text{m}$ /, przy czym częstotliwości kombinacyjne rozciągają wzrost tłumienności fal optycznych na cały zakres od $0,8$ do $1,3 \mu\text{m}$.

Drugim ważnym czynnikiem wywołującym straty w materiale włókna

światłowodowego jest zjawisko rozproszenia energii optycznej. Rozproszenie powstające na bardzo małych nieciągłościach /niejednorodnościach/ struktury włókna, t.zn. mniejszych od transmitowanej długości fali optycznej stanowi tzw. rozproszenie Rayleigha, zmniejszające się z czwartą potęgą długości fali. Rozproszenie na niejednorodnościach i cząsteczkach większych od długości fali stanowi tzw. rozproszenie Mie'a /zwykle niewielkie/. Rozproszenie prowadzi do wypromieniowywania energii optycznej na zewnątrz włókna lub do okładziny, gdzie następuje wytłumianie. Straty na wypromieniowanie powodują również ostre zgięcia / o promieniu krzywizny mniejszym niż parę cm/ oraz mikrozgięcia. Sprzężenia i konwersje modowe najczęściej powodują również straty.

Ogólnie straty powodujące tłumienie energii optycznej w światłowodzie można ująć zależnością [8]

$$S = \frac{a}{\lambda^4} + b/\lambda + c$$

gdzie: λ - fala propagowana w światłowodzie, przy czym pierwszy wyraz odnosi się do strat wskutek rozproszenia Rayleigh'a, drugi do strat absorpcyjnych będących funkcją λ , wreszcie trzeci to straty na wypromieniowanie wskutek zgięć i mikrozgięć, w zasadzie niezależnie od λ .

Zależność strat od długości fali powoduje występowanie tzw. "okien przepustowości" lub przezroczystości materiału światłowodu. Oznacza to, że występują mniejsze lub większe przedziały długości fal optycznych, dla których tłumienność światłowodu jest najmniejsza.

Powracając do struktur światłowodów uzależnionych od profilu zmiany współczynnika załamania rdzenia występujące w praktyce struktury ilustruje rys. 2.

Włókna światłowodowe można więc podzielić na dwie grupy:

- 1/ na światłowody jednomodowe, małomodowe i wielomodowe,
- 2/ na światłowody o profilu skokowym, tj. takie, w których rdzeń światłowodu ma jednakowy współczynnik załamania n_1 a okładzina n_2 /przy czym zawsze musi być spełniony warunek $n_1 > n_2$ zapewniający propagację fali wzdłuż światłowodu/ oraz na światłowody o współczynniku załamania rdzenia zmieniającym się monotonicznie. W tym przypadku maksymalna wartość współczynnika załamania n_1 występuje wzdłuż osi lub w bezpośrednim jej otoczeniu i maleje stopniowo do n_2 równego współczynnikowi okładziny.

Światłowodowy o profilu skokowym są wytwarzane jako jedno i wielomodowe, a o profilu ciągłym jako małowielomodowe lub wielomodowe, rzadziej jako jednomodowe.

Od podanych wyżej struktur odbiegają światłowodowy typu W jedno i wielomodowe oraz światłowód z optymalnym profilem współczynnika załamania. Ten ostatni, łącznie z dyskusją struktur profili ciągłych, będzie omówiony oddzielnie w rozdz. 6 jako bardzo ważny z punktu widzenia dyspersji.

Światłowodowy typu W /a również i o profilu optymalnym/ są w istocie włóknami trzywarstwowymi, o współczynnikach załamania warstw kolejno od osi: n_2 , n_1 , n_2 w włóknie jednomodowym oraz n_1 , n_3 , n_2 w włóknie wielomodowym. Wielomodowe włókno typu W /stanowiące do pewnego stopnia prototyp włókna optymalnego/ wydaje się, że obecnie jest już zarzucane, natomiast stosowanie włókna W jednomodowego ma uzasadnienie w zwiększeniu około dwukrotnym średnicy rdzenia. Jest to sprawa ważna, gdyż jak już wspomniano, włókno jednomodowe musi spełniać warunek, aby znormalizowana średnica

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2,4$$

z którego wynika, że dla praktycznie stosowanych wartości względnej różnicy współczynników załamania

$$\Delta n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

w granicach 0,005 - 0,01 otrzymujemy średnice rdzeni jednomodowych światłowodów około kilku mikrometrów. Powoduje to poważne trudności technologiczne wytwarzania tak cienkich rdzeni, trudności łączenia ze sobą, jak również uzyskiwaną małą sprawność wprowadzenia promieniowania do światłowodu. Ta ostatnia trudność zmusza do stosowania laserów półprzewodnikowych jako źródło promieniowania, a nie diod luminescencyjnych, tańszych i trwalszych, gdyż lasery mają dogodniejszą przestrzenną charakterystykę promieniowania, przy jednocześnie większej mocy promieniowania. Włókno jednomodowe ma jednak wielką zaletę, gdyż wskutek propagacji energii optycznej przez jeden tylko mod podstawowy nie występuje w nim poważna część dyspersji /modowa/ co będzie omawiane w rozdz. 5.

Reasumując można powiedzieć, że podstawowe rodzaje włókien światłowodowych to włókno jednomodowe o profilu przeważnie skokowym, włókno wielomodowe o profilu skokowym oraz włókno o profilu ciągłym /quasi-parabolicznym/.

Parametrami geometrycznymi włókna światłowodowego są: średnica rdzenia $2a$, średnica zewnętrzna okładziny, koncentryczność zespołu rdzeń-okładzina oraz kołowość /eliptyczność/ rdzenia. Z poprzednich rozważań wynika przy tym, że parametry geometryczne /jak również i inne podane niżej/ powinny być możliwie ściśle zachowane wzdłuż światłowodu.

Do parametrów fizycznych /optycznych/ światłowodów zaliczamy natomiast współczynniki załamania n_1 i n_2 /oraz n_{\min} przy profilu optymalnym/ i aperturę numeryczną, oznaczaną w skrócie jako NA.

Należy rozróżnić przy tym aperturę teoretyczną i skuteczną światłowodu. Apertura teoretyczna dla światłowodu o profilu skokowym /dla profilu ciągłego wyrażenie jest bardziej skomplikowane/ jest określana prostą zależnością

$$NA = \sin \varphi_k = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta n}$$

gdzie: φ_k - kąt graniczny /liczony od osi/, przy którym promień padający na czołową powierzchnię rdzenia światłowodu będzie jeszcze podlegał odbiciom, czyli propagacji wzdłuż światłowodu. Wyrażenie to zaczerpnięte jest z optyki geometrycznej.

W rzeczywistości jednak ważny jest nie kąt pod jakim promieniowanie jest wprowadzane do włókna, a kąt padania promieniowania na jego czołową powierzchnię, gwarantujący dalsze prowadzenie promieniowania przez światłowód. Było już omawiane, że energia optyczna wprowadzana na początku do światłowodu podlega sprzężeniom modowym i konwersji modów i że dopiero po przejściu krótszego lub dłuższego odcinka ustalają się mody i są dalej prowadzone przez światłowód. Apertura skuteczna jest więc określana /raczej mierzona/ dla ustabilizowanej części prowadzonej energii, gdyż część energii na początkowym odcinku światłowodu jest stracona. Rozważania te odnoszą się tylko do światłowodów mało i wielomodowych, w światłowodach jednomodowych apertura teoretyczna jest jednoznaczna z numeryczną aperturą skuteczną.

Parametr numerycznej apertury jest ważny z punktu widzenia wprowadzonej energii optycznej do światłowodu - zachodzi tu proporcjonalność do $(NA)^2$. Do $(NA)^2$ jest również proporcjonalna dyspersja /modowa/ światłowodu. A więc duża wartość NA to duży procent mocy wprowadzonej ze źródła promieniowania do światłowodu, ale jednocześnie zwiększa to liczbę wprowadzonych modów oraz zwiększa dyspersję, co z kolei zmniejsza pojemność informacyjną. Należy podkreślić, że ze względu na niejednoznaczność pojęcia NA /oraz trudności pomiarowe/

niektóre administracje łączności biorące udział w ustalaniu parametrów światłowodowych w ramach działalności Grupy Studiów XV Komisji CCITT, proponują zastępowanie tego parametru przez względną różnicę Δn .

5. ZJAWISKA DYSPERSJI W ŚWIATŁOWODACH

Dyspersja promieniowania optycznego /światła/ znana jest od dawna jako zależności współczynnika załamania ośrodka /mniej lub więcej przepuszczającego promieniowanie/ od długości fali tegoż promieniowania.

Dyspersja w światłowodach ma fizycznie bardziej złożony charakter i składają się na nią trzy różniące się pomiędzy sobą zjawiska; a mianowicie: dyspersja materiałowa, falowodowa i modowa.

W światłowodach wielomodowych występują wszystkie trzy rodzaje dyspersji jednocześnie, a w jednomodowych - dyspersja materiałowa i falowodowa.

Zjawisko dyspersji wynika z różnicy grupowych prędkości nawet bardzo mało różniących się długością fali modów przenoszących każdą część ogólnej energii optycznej. Z tego względu dyspersję nazywa się często zniekształceniem opóźnieniowym propagacji energii optycznej. Przy transmisji informacji techniką cyfrową, każdy rodzaj dyspersji objawia się mniejszym lub większym rozszerzeniem przekazywanych impulsów, z jednoczesnym zmniejszeniem amplitudy natężenia promieniowania impulsu.

Dyspersja w światłowodach, wobec bardzo małych strat /tłumienności/ energii optycznej w współczesnych światłowodach, staje się szczególnie niekorzystna przy dużych przepływnościach bitowych, ograniczając znacznie pojemność informacyjną systemu. Wynika to z zachodzenia na siebie poszczególnych przekazywanych, wąskich początkowo, impulsów, powodując ich nierozróżnialność przez fotodetektor.

Zjawisko dyspersji światłowodowej rozpatrywać można w zakresie częstotliwości lub czasu. W zakresie częstotliwości wielkość dyspersji określa charakterystyka częstotliwościowa modulowanego natężenia promieniowania. W zakresie czasu dyspersja mierzy się rozszerzaniem się impulsu, w połowie wysokości jego maksymalnego natężenia promieniowania, wyrażonym w nanosekundach /ns/ na 1 km trasy. Oczywiście metody pomiarowe dyspersji w obydwóch przypadkach są różne.

Brak jest do tej pory ujednoczonych ustaleń na dopuszczalne wartości dyspersji /zależne zresztą od rodzaju zastosowanego kodu/. Według [22] przybliżone warunki, które powinny tu być spełnione, aby

zniekształcenia dyspersyjne w cyfrowych systemach światłowodowych były nieznaczne, są następujące: wzrost skutecznej wartości szerokości impulsu powinien być mniejszy niż 1/4 odległości pomiędzy impulsami, lub też charakterystyka częstotliwościowa /przenoszenia/ światłowodu nie powinna spadać poniżej 0,707 wartości, dla częstotliwości odpowiadającej połowie pożądanej przepływności bitowej.

Problem teoretycznej oceny ilościowej zniekształceń opóźnieniowych w światłowodach jest matematycznie złożony i nie jest jeszcze wystarczająco jasny. Należy się tu raczej opierać na pomiarach w celu ilościowej oceny dyspersji.

Rozpatrzmy teraz nieco bardziej szczegółowo wymienione trzy rodzaje dyspersji.

5.1. Dyspersja materiałowa

Współczynnik załamania materiału światłowodu jest funkcją długości fali, czyli prędkość rozchodzenia się fali promieniowania zmienia się wraz ze zmianą długości fali. Źródła promieniowania nie są monochromatyczne, nawet biheterostrukturálne lasery wykazują skuteczną szerokość spektralną emisji promieniowania $\sigma_s = 1 \div 2$ nm, a diody luminescencyjne $\sigma_s = 30 \div 50$ nm. Parametr ten prawdopodobnie w ciągu krótkiego czasu ulegnie znacznej poprawie, gdyż już demonstrowano doświadczalne lasery półprzewodnikowe o szerokości σ_s /w połowie amplitudy natężenia promieniowania/ $0,1 \div 0,2$ nm, a tzw. diody superluminescencyjne - około 10 nm. W wyniku występującej szerokości spektralnej emisji źródeł promieniowania, każdy wysyłany impuls można rozłożyć na składowe odcinki częstotliwościowe, różniące się średnią prędkością grupową fali i niosące odpowiednią część energii optycznej impulsu. Miarą materiałowej dyspersji światłowodu jest więc rozrzut w czasie prędkości grupowej /w zależności od długości fali/ o wartość proporcjonalną do spektralnej szerokości źródła promieniowania.

Teoretycznie rozszerzanie się impulsu wskutek dyspersji materiałowej można wyrazić zależnością [22]:

$$\tau_{\text{mat}} = \frac{L}{c} \left(\frac{\sigma_s}{\lambda} \right) / \lambda^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$$

gdzie:

- L - długość światłowodu w km,
- c - prędkość światła,
- λ - długość fali propagowanej

σ_s - skuteczna /mierzona w połowie amplitudy natężenia promieniowania/ szerokość spektralna źródła promieniowania.

Szerokość spektralna σ_s zależy od fluktuacji emisji, czynników temperaturowych, modulacji impulsowej promieniowania i in. /ch zjawisk. Różne źródła promieniowania optycznego odznaczają się różnymi wartościami szerokości spektralnej. W przybliżeniu można je wymienić kolejno od najmniejszych wartości σ_s do największych: laser kryształiczny, laser gazowy, laser półprzewodnikowy /szczególnie biheterostrukтурalny/, dioda superluminescencyjna, dioda luminescencyjna. Miniaturowy laser pracujący na kryształ Nd:YAG, tj. na granacie itrowo-aluminiowym domieszkowanym neodymem, stanowi bardzo dobre źródło promieniowania dla systemów światłowodowych. Wykazuje minimalną dyspersję materiałową, gdyż jego szerokość spektralna jest mniejsza niż 0,1 nm, może być wzbudzany diodami luminescencyjnymi, emituje dogodną falę $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ oraz wykazuje dużą sprawność wprowadzenia promieniowania do światłowodu, dochodzącą do blisko 100%. Ma jednak jednocześnie poważną wadę dla systemów światłowodowych, gdyż wymaga zewnętrznego modulatora. Nie daje się on bowiem modulować bezpośrednio prądem wzbudzenia, jak lasery półprzewodnikowe i diody luminescencyjne, co znacznie komplikuje układ systemu łączności światłowodowej.

W obecnym stanie techniki światłowodowej wartość dyspersji materiałowej mieści się w granicach 70 + 140 pikosekund na 1 nm szerokości spektralnej źródła promieniowania i na 1 km długości światłowodu. Przyjmując średnią wartość 100 ps/nm.km otrzymany dla laserów półprzewodnikowych dyspersję materiałową światłowodu 0,1 + 0,2 ns, a dla diod luminescencyjnych 3 + 5 ns na 1 km.

Wyżej podane wartości dyspersji materiałowej odnoszą się do pracy światłowodów w zakresie powszechnie stosowanym fal $\lambda = 0,8 + 0,9 \mu\text{m}$, tj. pracujących ze źródłami promieniowania opartymi na materiale warstwy czynnej GaAs lub GaAlAs. Jednak dyspersja materiałowa, podobnie jak rozproszenie Rayleigh'a w odniesieniu do tłumienia, zmniejsza się szybko wraz z długością fali, osiągając teoretycznie zerową wartość w zakresie fal o długościach 1,27 - 1,4 μm . Ilustruje to rys. 3 [12] przedstawiający spadek materiałowej dyspersji wraz ze wzrostem długości fali dla czystej krzemionki oraz domieszkowanej germanem lub borem.

W tym zakresie fal osiąga się również bardzo małe wartości tłumienności światłowodów, co ilustruje przykładowo rys. 4 [8]. Nagły

wzrost tłumienności w okolicy $1,37 \mu\text{m}$ tłumaczy się istniejącymi jeszcze w materiale światłowodu śladami wodorotlenku OH, całkowite usunięcie których stanowi jeszcze problem technologiczny. Należy podkreślić, że źródła promieniowania dla tego zakresu fal, oparte na mieszanych kryształach typu In Ga/As lub Ga In/AsP/ są już opracowywane, chociaż w próbach laboratoryjnych wykazują jeszcze niewystarczający czas pracy /dla diod laserowych około 1000 godzin/.

Zagadnienie pracy światłowodowych systemów łączności w zakresie optymalnych długości fal jest bardzo ważne, w szczególności dla dalekosiężnej telekomunikacji. Pozwala to, wobec małej tłumienności i dyspersji, na osiąganie stosunkowo bardzo dużych odległości pomiędzy wzmacniaczami regeneracyjnymi, przy jednocześnie dużej przepływności bitowej.

5.2. Dyspersja falowodowa

Dyspersja falowodowa ma swoje źródło w różnicy opóźnień prędkości grupowych w dowolnym modale oraz wynika z częstotliwościowej zależności modowej stałej propagacji β_{nm} ; różnej dla każdego modu. Dyspersja falowodowa występuje w każdym propagowanym modale, występuje więc zarówno w jednomodowych, jak i w wielomodowych światłowodach.

W systemach światłowodowych o małej lub średniej przepływności bitowej, pracujących w zakresie powszechnie stosowanej długości fali około $0,85 \mu\text{m}$, dyspersja falowodowa nie odgrywa praktycznie roli, gdyż jest przynajmniej o rząd wielkości mniejsza od dyspersji materiałowej. Z tego prawdopodobnie względu jest ona przez szereg autorów nie wydzielana jako osobny rodzaj zjawiska dyspersji.

W światłowodzie jednomodowym lub w wielomodowym o w przybliżeniu optymalnym profilu oraz przy optymalnej długości fali / $1,2-1,4 \mu\text{m}$ /, przy której materiałowa dyspersja praktycznie znika, a modowa jest bardzo mała, dyspersja falowodowa może stanowić dość ważny czynnik w ograniczaniu pojemności informacyjnej systemu. Będzie to się odnosić przede wszystkim do dalekosiężnych linii telekomunikacyjnych o dużej przepływności bitowej. Rys. 5 [19] dosyć jasno przedstawia to zagadnienie; widać tu, że przy zbliżaniu się do optymalnej długości fali dyspersja falowodowa zaczyna odgrywać znaczącą rolę.

5.3. Dyspersja modowa

Zjawisko dyspersji modowej odnosi się do propagacji energii optycznej w światłowodach wielomodowych /oraz w małowodowych/. Dyspersja modowa wynika z różnej prędkości grupowej różnych propagowanych modów. Najkrótsze czasowo impulsy stosowane w telekomunikacyjnych systemach cyfrowych są znacznie dłuższe od długości fali optycznej. Każdy więc impuls zawiera wiele prowadzonych modów, przychodzących do punktu odbiorczego światłowodu z różnymi prędkościami grupowymi, przy czym każdy mod niesie cząstkę energii optycznej. Maksymalna różnica czasu przejścia przez składowe mody w impulsie stanowi miarę dyspersji modowej światłowodu.

Prościej można to wyrazić stosując analizę promieniową. Różnica czasu przejścia skrajnych promieni przez światłowód o profilu skośnym, a więc promienia wzdłuż osi i promienia padającego pod kątem granicznym, tj. maksymalna dyspersja daje się wyrazić prostą zależnością:

$$\tau_{\text{skok}} = \frac{L}{c/n_1} - \frac{L}{c/n_2} = \frac{L}{c} /n_1 - n_2/ = \frac{L}{c} n_1 \Delta n = \frac{L}{c} /NA/^2$$

gdzie:

c - prędkość fali optycznej w próżni,

$\frac{c}{n_1}$ i $\frac{c}{n_2}$ - odpowiednio prędkości fali w rdzeniu i okładzinie.

Wyprzedzając nieco dalsze rozważania o optymalnym profilu zmiany współczynnika załamania, odpowiednie wyrażenie na dyspersję wielomodowego światłowodu o parabolicznej /nie optymalnej/ zmianie współczynnika załamania będzie

$$\tau_{\text{parab}} \approx \frac{L n_1 \Delta n^2}{2c}$$

a więc teoretycznie dyspersja zmniejszy się około 200-krotnie.

Podane zależności na dyspersję, czyli maksymalną różnicę grupowych prędkości skrajnych modów /promieni/, są w dużej mierze przybliżone, gdyż zakładają równomierny pomiędzy modami rozkład ogólnej energii promieniowania wprowadzonej do światłowodu; nie uwzględniają więc istotnego czynnika propagacji w światłowodzie, tj. warunków wprowadzenia energii optycznej do światłowodu. Nie uwzględniony jest i drugi ważny czynnik dyspersji w światłowodzie, jakim jest sprzężenie się i konwersja modów w czasie propagacji przez światłowód.

Zagadnienie sprzężeń i konwersji było już poprzednio omawiane. Ze względu na fizyczne skomplikowanie zachodzących zjawisk, trudne do ujęcia teoretycznego, nie będziemy się tymi zjawiskami bliżej zajmować. Należy jednak przypomnieć, że dyspersja modowa światłowodu, po osiągnięciu stabilizacji modowej, nie wykazuje zależności proporcjonalnej do długości trasy światłowodu L , ale do \sqrt{L} . Zatem dyspersja w rzeczywistych światłowodach powinna być w zasadzie mniejsza niż wynikająca z podanych wyżej zależności.

Dla zilustrowania typowych parametrów różnych rodzajów światłowodów podana została tabela 2 [9], oparta na danych doświadczalnych, uwzględniająca również pomierzoną dyspersję modową i materiałową.

Zakładając średni współczynnik załamania $n_1 = 1,5$ i przyjmując typowe dla praktycznych światłowodów wartości $\Delta n = 0,01$ lub $\Delta n = 0,005$, otrzymamy dyspersję na 1 km światłowodu o profilu skokowym odpowiednio równą 50 ns lub 25 ns. Ciekawe jest, że pomimo omawianych zastrzeżeń wartości te w dużej mierze są zgodne z danymi z tabeli 2.

Jednak takie wartości dyspersji światłowodowej pozwalają na przesyłanie informacji o przepływności rzędu tylko 20 + 40 Mbit/s na km. Stanowiło to poważne ograniczenie możliwości stosowania światłowodów o profilu skokowym w telekomunikacji dalekosiężnej, nawet jeśli zastosowane włókna wykazywały bardzo małe tłumienności. Z podanej zależności dla τ_{skok} wynika, że w celu zmniejszenia dyspersji należałoby zmniejszyć Δn lub NA. Zbyt mała jednak wartość Δn powoduje zwiększenie się strat na wypromieniowywanie energii optycznej wskutek większej wrażliwości światłowodu na zgięcia, mikrozgięcia oraz na naciski i naprężenia mechaniczne. Zmniejszanie NA powoduje trudności z wprowadzeniem promieniowania do światłowodu, gdyż moc wprowadzana jest zależna od $1/NA^2$, szczególnie gdy charakterystyka przestrzenna źródła promieniowania jest niedogodna.

Innym sposobem zmniejszającym dyspersję modową jest sztuczne wywoływanie sprzężeń modowych przez wprowadzanie periodycznych zmian strukturalnych światłowodu, np. zmianę średnicy rdzenia lub też przez stosowanie zgięć o określonej amplitudzie i przestrzennej częstotliwości powtarzania /tzw. "mode scrambler"/. Sposoby te jednak dają wyniki często niezgodne z założeniami, powodując natomiast wzrost strat na wypromieniowywanie. "Mode scrambler" ma nadal zastosowanie w metodach pomiarowych, skracając odcinek światłowodu o niestabilnych sprzężeniach i występowaniu modów upływności. Stosowano również korektory /eguilizery/ optyczne, włączane w środku łącza światłowodowego i kompensujące do pewnego stopnia dyspersję poprzez zmianę kąтового rozkładu mocy promieniowania. Są to jednak zabiegi w praktyce kłopotliwe.

Typowe parametry światłowodów [9]

Rodzaj włókna światłowodowego	n ₁	n ₂	An %	Średnia rdzenia 2a μm	Grubość okładziny μm	NA	Liczba modów N	Dyspersja na 1 km	Materiałowa dyspersja na 1 km	
									Lasera	DEL
									σ _s = 2 nm	σ _s = 20 nm
Rdzeń SiO ₂ z domieszką GeO ₂ okładzina SiO ₂	1,471	1,457	0,95	2,5	40	0,20	1		180 ps	1,8 ns
Rdzeń SiO ₂ + GeO ₂ okładzina SiO ₂	1,471	1,457	0,95	10	40	0,20	27	46 ns	180 ps	1,8 ns
Rdzeń SiO ₂ okładzina ² krzemowa z domieszką boru	1,457	1,452	0,48	30	40	0,14	120	23 ns	180 ps	1,8 ns
Rdzeń i okładzina z krzemu z domieszką boru	1,527	1,517	0,65	30	20	0,17	200	32 ns	266 ps	2,6 ns
Rdzeń i okładzina z sodowo-wapniowego krzemu	1,520	1,503	1,1	30	30	0,22	300	60 ns	200 ps	2,0 ns
Rdzeń szkło ołowowe Okładzina ołowowo-borowy krzem	1,62	1,58	2,5	40	20	0,36	1400	135 ns	360 ps	3,6 ns
Światłowod o profilu ciągłym /optymalizowanym/	1,562 na osi	1,540 na powierzchni	1,4	zewnętrzna średnica okładziny 100 μm		0,26	2000	1 ns	280 ps	2,8 ns

Profil skokowy

Modowa dyspersja nie zależy od długości optycznej fali nośnej, nie istnieje więc optymalna długość fali, podobnie jak w przypadku dyspersji materiałowej.

Radykalne osiągnięcie zmniejszenia /i to bardzo znacznego/ dyspersji modowej umożliwił wynalazek włókna światłowodowego o ciągłym profilu zmiany współczynnika załamania. Tym zagadnieniem, bardzo istotnym dla pojemności informacyjnej systemów światłowodowych, zajmujemy się nieco szczegółowiej.

6. OPTIMALNY PROFIL ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA RDZENIA ŚWIATŁOWODU

Jeśli wykonać włókno światłowodowe przez odpowiednie domieszkowanie podstawowego materiału, tj. ultra czystej krzemionki lub kwarcu, w taki sposób, aby współczynnik załamania wzdłuż promienia przekroju rdzenia zmniejszał się monotonicznie od maksymalnej wartości w bezpośrednim otoczeniu osi /tj. dla $r = 0$ / do wartości minimalnej w miejscu styku rdzenia z okładziną /zwykle z innego materiału/, czyli dla $r = a$, to według analizy promieniowej promienie będą rozchodzić się wzdłuż światłowodu nie zygzakowato, ulegając załamaniom na styku rdzeń-okładzina, lecz sinusoidalnie lub spiralnie, okręcając się wokół osi światłowodu. Promienie przebiegające przy tym dalej od osi będą miały większą prędkość /gdyż występuje tu mniejszy współczynnik załamania/ niż promienie propagowane bliżej lub wzdłuż osi. W oparciu o analizę falową tego zjawiska można wyjaśnić, że wskutek zmniejszania się współczynnika załamania zależnie od odległości od osi oraz specyficznego rozkładu energii optycznej pomiędzy modami różnego rzędu, mody wyższego rzędu /przenoszące energię bliżej okładziny/ mają większą stałą propagacji modowej, czyli rozchodzą się z większą prędkością niż mody niższego rzędu o energii skoncentrowanej bliżej osi.

W rezultacie opisanych zjawisk następuje znaczne wyrównanie różnicy czasu przebiegu pomiędzy przyosiowymi i odleglejszymi od osi modami /promieniami/.

W 1968 r. ukazała się japońska publikacja [17]^{x/} o opracowaniu włókna światłowodowego nazwanego samoogniskującym /SELFOC/, w którym współczynnik załamania rdzenia zmieniał się według zależności parabolicznej:

$$n/r/ = n_1 \left[1 - \Delta n \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right].$$

^{x/} Autor artykułu nie jest pewny czy pierwszeństwo wynalezienia światłowodu o profilu ciągłym należy do Japonii czy też do St. Zjednoczonych A.P.

Dawało to wyrażenie na dyspersję, czyli różnicę czasu propagacji pomiędzy skrajnymi najwyższego rzędu modami a modem podstawowym

$$\tau_{\text{par}} = \frac{1}{2} \Delta n^2 \tau_{\text{skok}}$$

gdzie: τ_{skok} - jest dyspersją dla światłowodu wielomodowego o profilu skokowym.

Stanowiło to teoretyczną poprawę dyspersji o 2 rzędy wielkości. Wkrótce jednak okazało się, że paraboliczny profil nie jest optymalnym, chociaż bliski do optymalnego z punktu widzenia dyspersji. Początkowo dodawano drugi człon w 4-tym stopniu do funkcji zmiany współczynnika załamania, inni autorzy proponowali wykładnik funkcji $f/r/ = \sqrt{\frac{r}{a}}^\alpha$, o wartość $\alpha = 2 - 2\Delta n$, co dawało już $\tau_c = \frac{1}{8} \Delta n^2 \cdot \tau_{\text{skok}}$. Profil optymalny można ogólnie wyrazić zależnością

$$n/r/ = n_1 \left[1 - 2 \Delta n f/r/ \right] \quad \text{dla } 0 \leq r \leq a$$

oraz

$$n/r/ = n_1 / 1 - 2\Delta n/ = n_2 \quad \text{dla } r \geq a, \text{ tj. dla okładziny}$$

przy czym Δn - oznacza względną różnicę współczynników załamania

$$\Delta n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Dla profilu skokowego $f/r/ = 0$ dla $r < a$. Zwykle $f/r/ = \sqrt{\frac{r}{a}}^\alpha$, chociaż niekoniecznie musi być funkcją wykładniczą. Przeważnie jednak wykładnik α jest bliski /rzadziej równy/ liczbie 2. Dlatego też światłowody o profilu ciągłym są zwane często quasi-parabolicznymi, ale również gradientowymi lub stopniowanymi /graded/. Tutaj zaproponowana jest nazwa profil ciągły.

Sprawa optymalnej wartości dla α bliskiej liczbie 2 daje się wyjaśnić teoretycznie i praktycznie. Ilustrują to dwa wykresy zaczerpnięte z prac [4 i 10]. Rys. 6 pokazuje obliczoną teoretycznie ostrą zależność parametru proporcjonalnego do przepływności bitowej od wartości α oraz od współczynnika Δn , rys. 7 natomiast podaje nie tylko zależność szerokości pasma transmitowanego od wartości α , ale również zakresy zmian α jakie spotyka się w praktyce /wartości pomierzone/. Rozrzut danych doświadczalnych zależy głównie od rodzaju i proporcji domieszek do krzemionki. Jak widać, zależność pojemności informacyjnej światłowodu bardzo ostro zależy od wartości α . Obli-

czono, że odstępstwo o około 2% od optymalnej wartości α podwyższa dyspersję o 20%.

Ostatnio /rok 1977/ jako włókno światłowodowe o optymalnym profilu zostało zgłoszone do Komisji XV CCITT [7] włókno trzywarstwowe, którego profil ilustruje rys. 8. Włókno składa się z trzech warstw:

- 1/ rdzenia o promieniu $a_1 < a$ o optymalnej wartości wykładnika α ,
- 2/ cienkiej warstwy pośredniej /barierowej/ o łagodnie obniżającym się współczynniku załamania do wartości n_{\min} mniejszej niż dla okładziny 1
- 3/ właściwej okładziny o współczynniku załamania n_2 .

Zachodzi więc zależność $n_{\min} < n_2 < n_1$, przy czym n_1 , jak zwykle przy profilu ciągłym, jest największą wartością współczynnika załamania występującą w pobliżu osi. Włókno stanowi więc jakby zmodernizowany profil W. Profil optymalny został obliczony dla małomodowego światłowodu żmudną metodą prób i korekt błędów /trials and errors/ dla każdego modu, oczywiście za pomocą komputera. Metodę obliczania podano w [16].

Światłowod o wyżej opisanym profilu optymalnym obniża o 3 rzędy wielkości dyspersję modową w stosunku do dyspersji światłowodu o profilu skokowym. Według autorów opracowania uzyskuje się tylko około 10 ps/km różnicy opóźnień modowych.

Optymalny profil samego rdzenia /o promieniu $a_1 < a$ / można wyrazić w przybliżeniu [16] jako

$$n/r/ = n_1 \left[1 - 4,04 \Delta n \frac{r/a}{1,97} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{dla } 0 \leq \frac{r}{a} \leq 0,9$$

i jednakowej materiałowej dyspersji rdzenia oraz okładziny. Dla przypadku, gdy względna różnica materiałowej dyspersji rdzenia i okładziny wynosi 0,3, wykładnik α w powyższej zależności będzie wynosił $\alpha = 2,27$. A więc wykładnik α wynosi nadal około 2. Przez odpowiednie procentowo domieszkowanie GeO_2 i B_2O_3 do SiO_2 można otrzymać optymalny wykładnik $\alpha = 2$.

Warstwa barierowa o obniżonym współczynniku załamania ma ograniczać powstawanie modów upływności i przyspieszać stabilizację modową światłowodu.

Trudno ocenić, czy opisany profil jest ostatecznym jako optymalny. Faktem jest jednak, że przy długościach fali optycznej $\lambda = 0,8-0,9 \mu\text{m}$ decydującą staje się przy takim profilu dyspersja materiałowa a nawet falowodowa, a nie modowa.

Należy jeszcze dodać, że dyspersja materiałowa sumuje się z modową w/g zależności

$$\tau = \tau_{\text{mat}}^2 + \tau_{\text{mod}}^2$$

7. WPLYW TECHNOLOGII WŁÓKNA NA DYSPERSJĘ MODOWĄ ŚWIATŁOWODU

Jak wynika z rozważań dotyczących optymalnego profilu, radykalne zmniejszenie dyspersji modowej wymaga bardzo dokładnego odwzorowania w wytwarzanym światłowodzie obliczonego profilu zmiany współczynnika załamania. Wobec dość licznych wpływów ubocznych i zjawisk, które nie zawsze mogą występować i są trudne do przewidzenia, jak np. sprzężenia oraz konwersja modów, powstawanie modów upływności, występowanie różnych niedoskonałości strukturalnych włókna itp. - teoretycznie obliczony profil wymaga sprawdzenia doświadczalnego oraz, po dokonaniu ewentualnych korekt, utrzymania przy produkcji włókna ściślej jego powtarzalności.

Obecnie za najbardziej racjonalną, umożliwiającą bardziej ściśle dostosowanie się do wymaganego profilu oraz zapewniającą dobrą powtarzalność wytwarzania włókna światłowodowego, uważana jest tzw. metoda CVD. Metoda ta polega na kolejnym, warstwa po warstwie, naporowywaniu na wewnętrznej powierzchni cylindra z bardzo czystego kwarcu lub krzemionki /w odpowiednio wysokiej temperaturze i w wymaganej ściślej proporcji/ odpowiednich domieszek do krzemionki, stanowiącej materiał na rdzeń światłowodu. Dozowanie domieszek musi być bardzo ściśle kontrolowane. Składniki stosowane są w gazowej postaci: O_2 , $SiCl_4$, BBr_3 , $GeCl_4$ i inne, tworząc kolejne warstwy SiO_2 z odpowiednio zmienianym domieszkowaniem. Często stosuje się również domieszkowanie materiału na okładzinę, ale domieszki są w tym przypadku jednorodne. Wskutek zachodzących reakcji chemicznych, domieszki do podstawowego składnika krzemionki nie są identyczne z doprowadzonymi gazami, a stanowią np. najczęściej: dwutlenek germanu GeO_2 , trójtlenek boru B_2O_3 , P_2O_5 i inne, przy czym domieszka germanu obniża współczynnik załamania, zaś boru podwyższa. Odpowiednio więc dozuując przepływ gazów można otrzymać wymaganą zmianę współczynnika załamania rdzenia. Również domieszka fosforu podwyższa, a fluoru obniża współczynnik załamania krzemionki.

Metoda CVD wytwarzania wstępnego materiału, czyli tzw. preformy na włókna światłowodowe, podlega udoskonaleniom. Ostatnia modyfikacja

polega na zastąpieniu palnika tlenowo-wodorowego, przesuwanego w obie strony wzdłuż obracającego się cylindra preformy, przez wytwarzanie izotermicznej plazmy / $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ / wewnątrz cylindra za pomocą generatora wielkiej częstotliwości /3-6 MHz/ o dużej mocy, rzędu kilkunastu kW.

Spełnienie skomplikowanego wyrażenia dla dyspersyjnie optymalnego profilu rdzenia światłowodu wymaga /przy opisanej wyżej technologii/, odpowiedniego zaprogramowania i komputerowego dozoru dopływu odpowiednich gazów do wnętrza cylindra. Również stałość temperatury plazmy jest utrzymywana automatycznie za pomocą optycznego pyrometru i układu sprzężenia zwrotnego.

Wytwarzana tą metodą preforma - cylinder o długości kilkunastu cm i wewnętrznej średnicy kilkunastu mm, stanowi jakby półfabrykat dla włókna światłowodowego. Wymaga ona dalej dokonania ściągnięcia w jednolity pręt w odpowiednio wysokiej temperaturze, która zapewnia plastyczność całego materiału preformy. Z tak otrzymanego pręta jest następnie ciągnięte włókno światłowodowe w odpowiednim urządzeniu i w ściśle regulowanej temperaturze pieca elektrycznego. Stanowi ono końcowy produkt lub jest jeszcze dodatkowo powlekane zabezpieczającą mechanicznie warstwą plastyczną.

Zarówno proces nawarstwiania, a szczególnie proces wyciągania cylindrycznej preformy w jednolity pręt, stanowią źródło, nieoczekiwanych początkowo, zniekształceń optymalnego profilu światłowodu, co wywołuje niekorzystne zmiany dyspersji.

W procesie nawarstwiania groźne są wszelkie nierównomierności składu gazów, względnie prędkości ich przepływu przez cylinder preformy, które powodują na profilu nagłe wysoki wartości współczynnika załamania. Prowadzi to do poszerzenia, a nawet do rozdzielenia przekazywanych impulsów. Ilustruje to rys. 9 zaczerpnięty z pracy [22]. Również zbyt mała liczba nawarstwień wywołuje schodkowatość profilu, co powiększa dyspersję. W celu uniknięcia tego stosuje się przy formowaniu optymalnego profilu dużą liczbę naporowań, to jest przesunięć plazmy w cylindrze preformy z jednoczesnym jego obrotem, sięgającą przy wytwarzaniu dobrych światłowodów liczby kilkuset do tysiąca. Włókna jednomodowe, wielomodowe o skokowym profilu oraz domieszkowane okładziny nie wymagają tak wielkiej liczby nawarstwień.

Jeszcze silniejszy wpływ na dyspersję ma proces ściągania nawarstwianej preformy w pręt. Proces ten wykonywany w wysokiej temperaturze /zwykle wyższej niż temperatura nawarstwiania/ powoduje w okolicy osi tworzonego pręta, a więc osi przyszłego włókna światłowodowego

wego, dyfuzję domieszek i wyparowywanie ich na zewnątrz. To z kolei wywołuje nagłą depresję wartości współczynnika załamania w pobliżu osi profilu optymalnego /a również i skokowego/. Ilustruje to rys. 10 [20] wraz ze skutkiem /obliczonym analitycznie/, jaki wywołuje depresja stanowiąca 10% wartości maksymalnej natężenia promieniowania impulsu. Wpływ depresji osiowej zwiększającej dyspersję światłowodów potwierdzają również badania doświadczalne [18, 21]. Większa od 10% depresja osiowa profilu może powodować powstawanie dodatkowego impulsu, oddzielonego czasowo dość znacznie od impulsu podstawowego, zniekształcając niedopuszczalnie przesyłany ciąg impulsów.

Ścisłe więc przestrzeganie dokładności wytwarzania włókna światłowodowego metodą CVD oraz dokładne badanie otrzymywanego z preformy pręta, stanowi gwarancję małej wartości dyspersji. Należy jednak podkreślić, że małe i łagodne depresje osiowe profilu oraz małe zakłócenia jego gładkości prowadzą stosunkowo małe zniekształcenia dyspersji, które można tolerować.

8. UWAGI KONCOWE I WNIOSKI

Zagadnienie dyspersji światłowodowej zostało przedstawione przede wszystkim z uwzględnieniem fizycznej strony zjawiska, i z minimalnym ujęciem matematycznym dyspersji. Spowodowane to zostało z jednej strony ograniczeniem objętości artykułu i przeznaczeniem opracowania, a z drugiej strony również zawilnością i trudnością analizy matematycznej oraz często występującą u różnych autorów niezgodnością wyników tej analizy. Niezgodności te mają swe uzasadnienie w tym, że trudności aparatu matematycznego dotyczącego propagacji fali optycznej w światłowodach powodują konieczność dokonywania uproszczeń oraz przyjmowania wstępnych początkowych założeń, takich jak np. bezstratności światłowodów lub braku sprzężeń i konwersji modów itp., które to założenia odbiegają od fizycznej rzeczywistości. Z tego również względu przedstawiono jedynie niektóre końcowe wyniki takich teoretycznych dociekań, w mniejszym lub większym stopniu znajdujące potwierdzenie w doświadczeniach.

Zagadnienie uzyskiwania minimalnej dyspersji wymaga, jak już było wspomniane, ciągłego sprawdzania w procesie wytwarzania światłowodu wyników danych teoretycznych. Związane to jest z dobrym opanowaniem metod pomiarowych i opracowaniem odpowiednich przyrządów pomiarowych do pomiarów podstawowych parametrów geometrycznych światłowodów oraz parametrów transmisyjnych jakimi są tłumienność i dyspersja.

Dokonanie przeglądu stosowanych metod pomiarowych, nawet w zakresie dotyczącym tylko dyspersji, jest zadaniem trudnym i wymagającym osobnego opracowania. Dyspersji dotyczą również pomiary takich parametrów, jak: współczynniki załamania okładziny i rdzenia /dla profilu skokowego/, wartości Δn , profilu zmiany współczynnika załamania w rdzeniu oraz pomiaru właściwej dyspersji w zakresie czasu /tj. rozszerzania się impulsów/ oraz w zakresie częstotliwości /a więc pomiaru charakterystyki przenoszenia/. Do zakresu dyspersji należą również skomplikowane pomiary długości odcinka stabilizacji modowej światłowodu oraz pomiaru wartości skutecznej apertury numerycznej. Poza tym parametry geometryczne, jak: średnica rdzenia, koncentryczność rdzenia i okładziny itp. są również związane ze zjawiskiem dyspersji.

Jak widać z powyższego, dyspersji dotyczą pomiary większości parametrów światłowodu. Istnieją co prawda już dość liczne publikacje oraz dokumenty Grupy Studiów Komisji XV CCITT dotyczące metod pomiarowych, ale jednocześnie wspomniana Grupa Studiów uznała ich ustalenie i ewentualne przedstawienie do standaryzacji /co jest celem prac grupy/ za przedwczesne, ze względu na występujące niedoskonałości prawie każdej metody pomiarowej. Do tych trudności dochodzi jeszcze i to, że metody te dotyczą przeważnie pomiaru dość znacznych wartości zarówno tłumienności, jak i dyspersji, a w chwili obecnej istnieją już eksperymentalne linie ze światłowodami o tłumienności mniejszej niż 1 dB/km oraz dyspersji mierzonej już w piko a nie w nanosekundach. Przykładem może być zainstalowana japońska linia światłowodowa o długości 53,5 km i przepływności 34 Mbit/s bez wzmacniaczy regeneracyjnych [24]. Metody pomiarowe dyspersji o dużej dokładności zaczynają już być publikowane, np. opisana w [19] /wykres z rys. 5 zapożyczony jest z tego artykułu/, pozwalająca na pomiar dyspersji z dokładnością pikosekundową, jaka jest potrzebna przy pomiarach dyspersji materiałowej w włóknie jednomodowym pracującym w optymalnym zakresie fal lub też włókna wielomodowego z bardzo dobrym optymalnym profilem.

Autor niniejszego artykułu ograniczył się do przedstawienia dyspersji występującej w technice cyfrowej przesyłania informacji. Nie powinno to umniejszać znaczenia systemów analogowych ważnych w zastosowaniu światłowodów do takich dziedzin telekomunikacji, jak anteny zbiorowe, telewizja przewodowa /już praktycznie stosowana/ oraz w obiektach zamkniętych. W przodujących w technice światłowodowej krajach poświęca się wiele pracy technice analogowej, w szczególno-

ści linearyzacji charakterystyk modulacyjnych źródeł promieniowania i fotodetektorów.

Wnioski nasuwające się z przedstawionego wyżej materiału:

1. Tłumienność i dyspersja światłowodu są równie ważnymi parametrami transmisyjnymi. Uzyskanie światłowodu o małej tłumienności nie decyduje jeszcze o jego zdolności transmisyjnej. Upraszczając zagadnienie można powiedzieć, że tłumienność jest parametrem bardziej decydującym o odległościach między wzmacniaczami regeneracyjnymi, a dyspersja światłowodu - o szerokości przenoszonego pasma informacyjnego.

Zarówno otrzymanie bardzo czystych materiałów wyjściowych do wytwarzania włókna światłowodowego, jak i technologia samego nawarstwiania rdzenia, zgodnie z założonym profilem zmiany współczynnika załamania, są zadaniami bardzo trudnymi, wymagającymi ogromnej precyzji i opracowania dokładnych metod pomiarowych w celu stałej kontroli przebiegów technologicznych.

2. Ponieważ szerszego wdrażania praktycznego światłowodów w służbach i sieciach telekomunikacyjnych należy oczekiwać nie wcześniej niż za kilka lat, już obecnie należy rozpocząć prace badawcze w kraju, dotyczące wytwarzania elementów i podzespołów dla następnej generacji systemów światłowodowych, pracujących w optymalnym zakresie fal $1,2 \pm 1,4 \mu\text{m}$, dotyczy to:

- a/ źródła promieniowania zarówno diod laserowych, jak i luminescencyjnych o dużej luminancji energetycznej, dobrej charakterystyce przestrzennej i długim czasie pracy,
- b/ fotodiod o parametrach jakościowych równie dobrych jak dla obecnie stosowanego zakresu fal /tj. $0,8 \pm 0,9 \mu\text{m}$ /, co jest zagadnieniem niełatwym, ze względu na niższą wydajność kwantową oraz większe szумы prądu ciemnego,
- c/ włókna światłowodowego o optymalnym profilu, a więc o minimalnej dyspersji oraz o bardzo małej tłumienności,
- d/ scalonych układów optycznych i elektronicznych do nadajników, odbiorników i wzmacniaczy regeneracyjnych oraz do urządzeń sprzęgająco-rozgałęzieniowych w systemach światłowodowych.

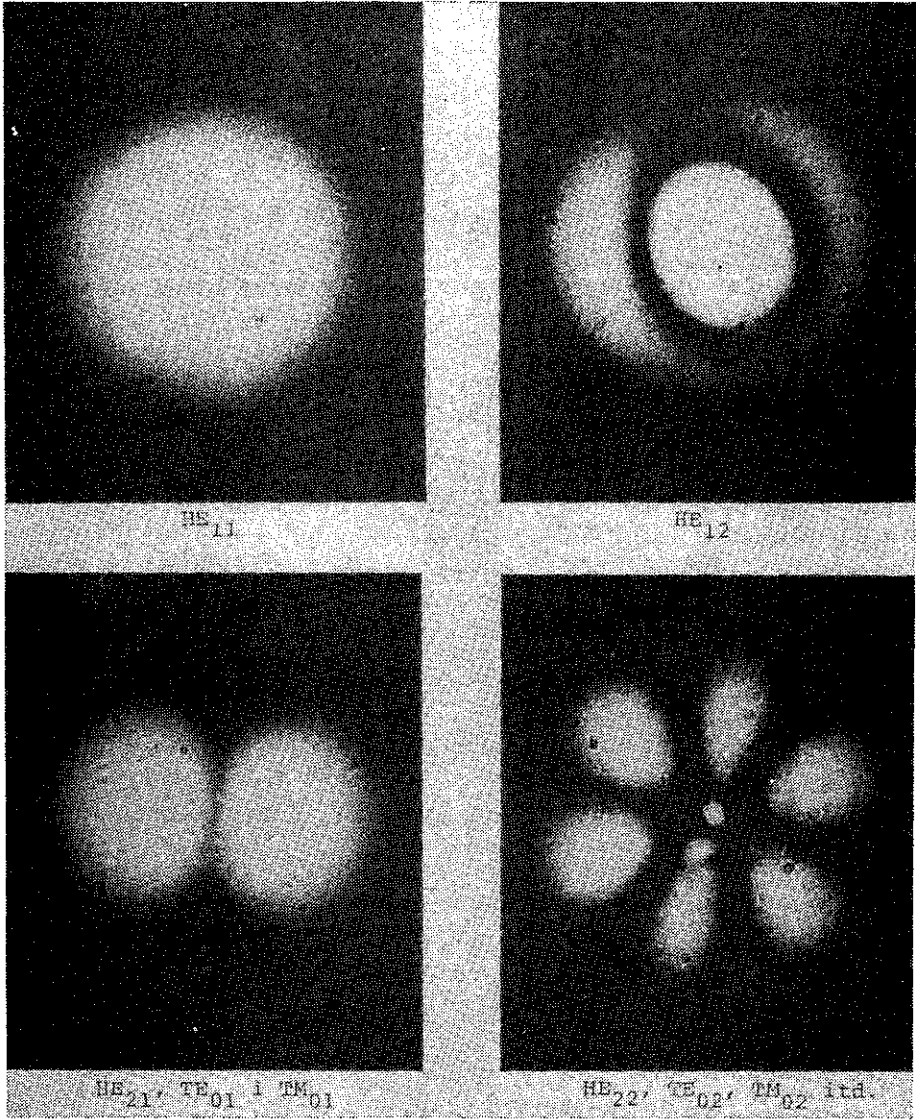
3. Należy usilnie pracować nad metodami pomiarowymi parametrów wszystkich wymienionych elementów, doskonalszymi i precyzyjniejszymi od dotychczasowych, ze względu na przewidywane znacznie mniejsze wartości i tolerancje parametrów.

4. Nie należy jednak oczekiwać na opracowanie elementów i podzespołów najbardziej udoskonalonych i pracujących w optymalnym zakresie fal. W celu zdobycia doświadczenia w nowej, dość trudnej dziedzinie techniki łączności oraz przygotowania kadry pracowników, przeznaczonych do projektowania budowy i eksploatacji systemów światłowodowych, należy prowadzić na możliwie szeroka skalę prace doświadczalne z obecnie dostępnymi komercyjnie elementami /tj. w zakresie $0,8 \pm 0,9 \mu\text{m}$ / lub też wytwarzanymi w kraju.

WYKAZ LITERATURY

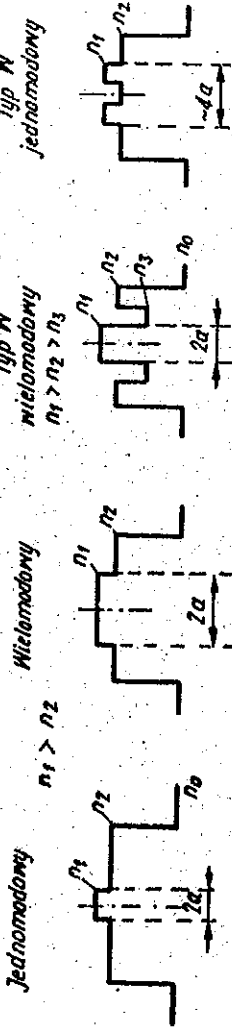
1. Miller S., Marcatili E., Tingye Li: Research toward optical-fibre transmission systems. Part 1 The transmission medium. Proc. IEEE 1973 Vol. 61 nr 12 s. 1703-1726.
 2. Sandbank C.P.: The challenge of fibre-optical communication systems. Radio and Electron. Eng. 1973 Vol. 43 nr 11 s. 665-674.
 3. Love J., Snyder A.: Ray analysis of multimode optical fibre. Ann. Télécomm. 1977 T. 32 nr 3-4 s. 109-114.
 4. Di Vita P.: Theory of propagation in optical fibres: Ray approach. Ann. Télécomm. 1977 T. 32 nr 3-4 s. 115-133.
 5. Ginsburg S.A., Muradian A.G.: Peredača sveta po dvuchslojnym dielektričeskim voloknam. Zarub. Radioelektron. 1974 nr 10 s. 48-73.
 6. Gambling W.A.: The ultimate bandwidth performance of optical transmission lines. Materiały z I Krajowego Sympozjum nt.: Światłowodowy i ich zastosowanie. Jabłonna 16-17.02.1976.
 7. CCITT: Fibers parameters. Com XV nr 61-E 1977.
 8. Shimada S., Koyoma M., Kimura T.: Progress in optical fibre transmission technology. Jap. Telecomm. Rev. 1977 Vol. 19 nr 2 s. 86-96.
 9. Typical fibre characteristic. Electron. Ind. 1977 Vol. 3 nr 6 s. 17-23.
-
10. CCITT: Fibre parameters and system design parameters. Com. XV nr 114-E 1978.
 11. Marcuse D.: Review of monomode fibres. Third European Conference on Optical Communication, Monachium, September 14-16 1977. NTG Fachberichte 1977 Bd 59 s. 60-65.
 12. Fleming J.W.: Material dispersion in lightguide glasses. Electron. Letters 1978 Vol. 14 nr 11 s. 326-328.

13. Kawakami S., Nishizama J.: An optical waveguide with the optimum distribution of refractive index with reference to waveform distortion. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 1968 Vol. 16 nr 10 s. 814.
14. Heinlein W., Witke K.: Digitale Übertragung über optische Wellenlängenbereich oberhalb 1 μm . Frequenz 1978 Bd 32 nr 3 s. 79-84.
15. Arnaud J.: Optimum profiles for dispersive multimode fibers Optical and Quantum Electronics 1977 Vol. 9 nr 2 s. 111-119. /Ekspr. Inf. - Radiolok., Telev. Radiosvjaz' 1977 nr 23 s. 26-28/.
16. Okamoto K., Okoski T.: Computer-aided synthesis of the optimum refractive-index profile for a multimode fibre. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. 1977 Vol. 25 nr 3 s. 213-221.
17. Optical fiber fabrication by isothermal plasma activated deposition. Fujiwara i in. Materiały z Third European Conference on Optical Communication. Monachium 14-16 September 1977. NTG - Fachberichte 1977 Bd 59 s. 15-23.
18. Morgan R.J.: Some trends in low-loss optical fibre and cabling technologies. Monitor-Proc. IREE Australia 1978 Vol. 39 nr 4 s. 56-72.
19. Daikoku K., Sugimara A.: Direct measurement of wavelength dispersion in optical fibres - difference method. Electron. Letters 1978 Vol. 14 nr 5 s. 149-151.
20. Behm K.: Dispersion in CVD - fabricated fibres with a refractive index dip on the fibre axis. Arch. Elektron. Übertr. 1977 Bd 31 Nr 1 s. 45-48.
21. Behm K.: Dispersion measurement of CVD - fabricated fibres with a refractive - index dip on the fibre axis. NTG-Fachberichte 1977 Bd 59 s. 28-30.
22. Barnoski M., Personick S.: Measurements in fiber optics. Proc. IEEE 1978 Vol. 66 nr 4 s. 429-441.
23. Non-repeated 50 km transmission experiment using low-loss optical fibres. Ito T. i in. Electron. Letters 1978 Vol. 14 nr 16 s. 520-521.

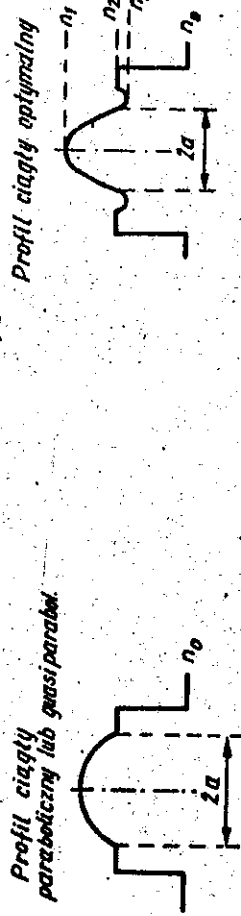


Rys. 1. Obraz rozkładu modowego pola optycznego w jednomodowym i małomodowych światłowodach

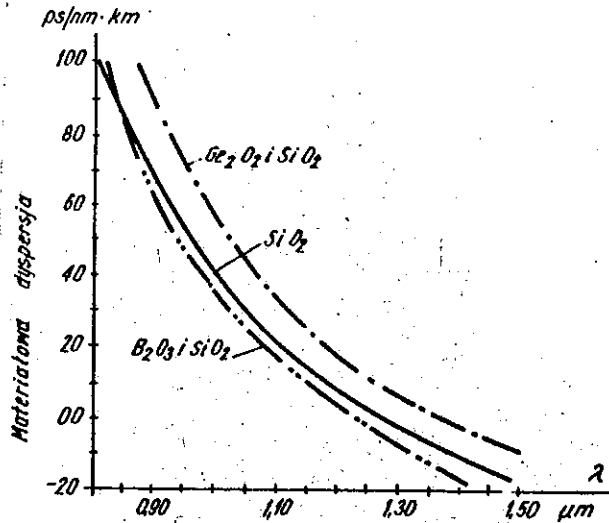
Włókna o profilu skokowym



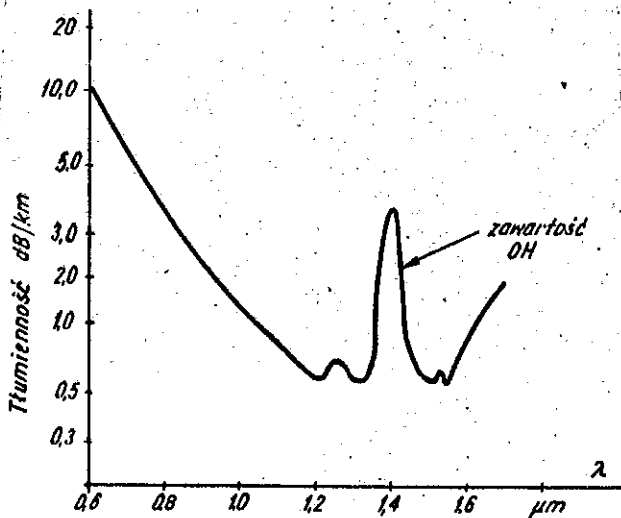
Włókna o profilu ciągłym



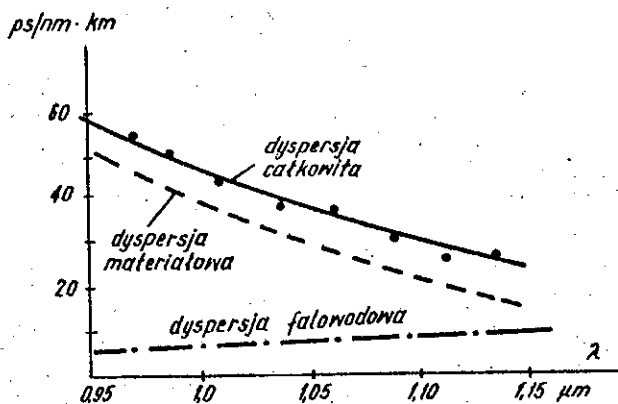
Rys. 2. Struktury światłowodowych włókien



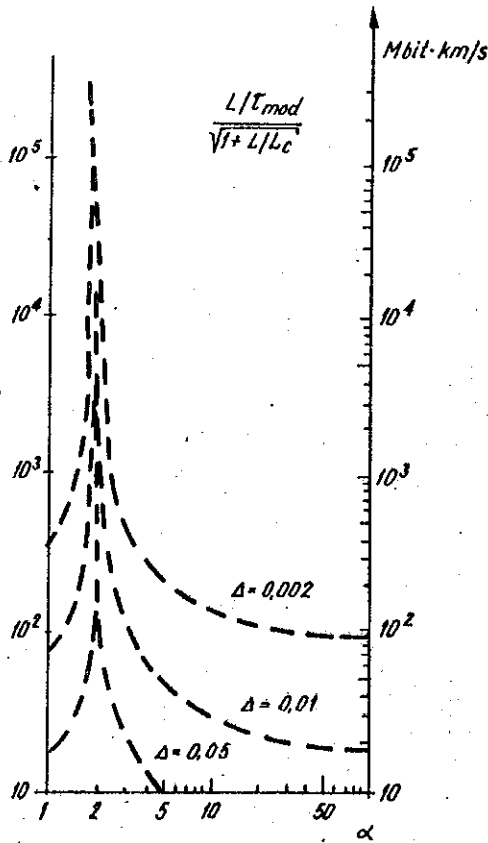
Rys. 3. Zależność materiałowej dyspersji od długości fali optycznej dla szkieł do światłowodów o różnych składach [12]



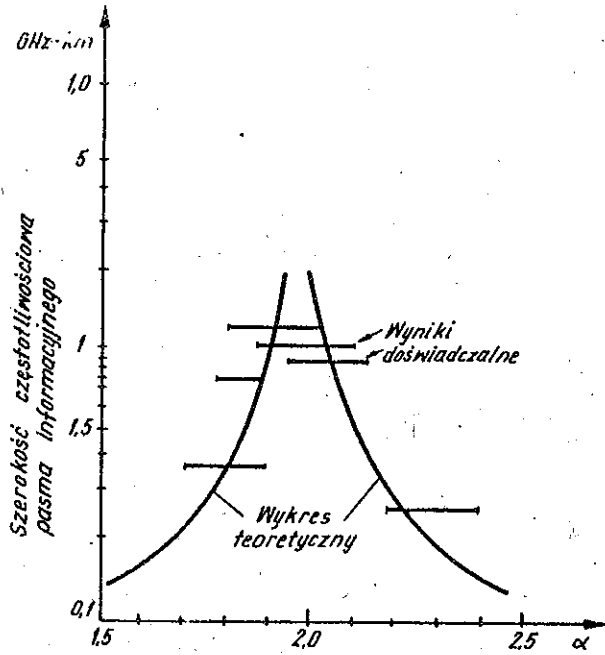
Rys. 4. Zależność tłumienności światłowodu o profilu skokowym z Ge_2O_2 - SiO_2 od długości fali optycznej [8]



Rys. 5. Dyspersja materiałowa i falowodowa w jednomodowym światłowodzie $\text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$. Charakterystyki obliczono metodą Gloge-Sellmeyer. Punkty wskazują dane doświadczalne [19]

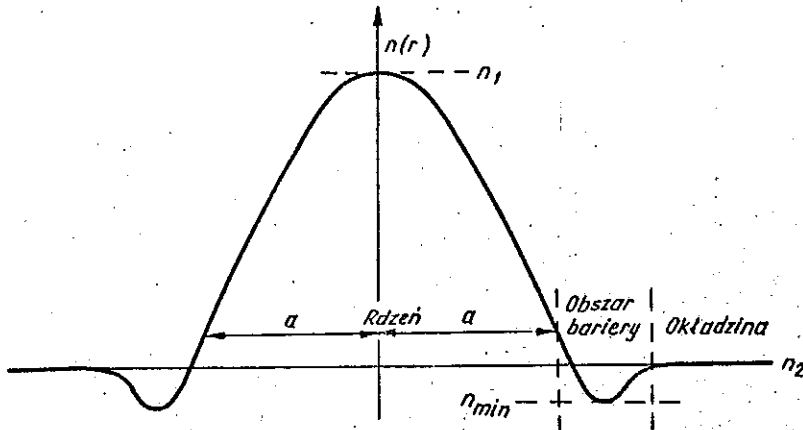


Rys. 6. Zależność wielkości proporcjonalnej do pojemności informacyjnej od wartości wykładnika profilu ciągłego α , dla różnych wartości Δ [4]

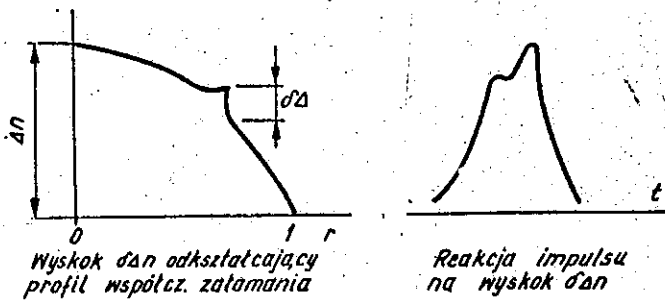


Rys. 7. Zależność częstotliwościowej szerokości pasma informacyjnego od wykładnika α światłowodu o profilu ciągłym [10]

— Rozrzut wyników doświadczalnych dla światłowodów o różnej proporcji domieszek



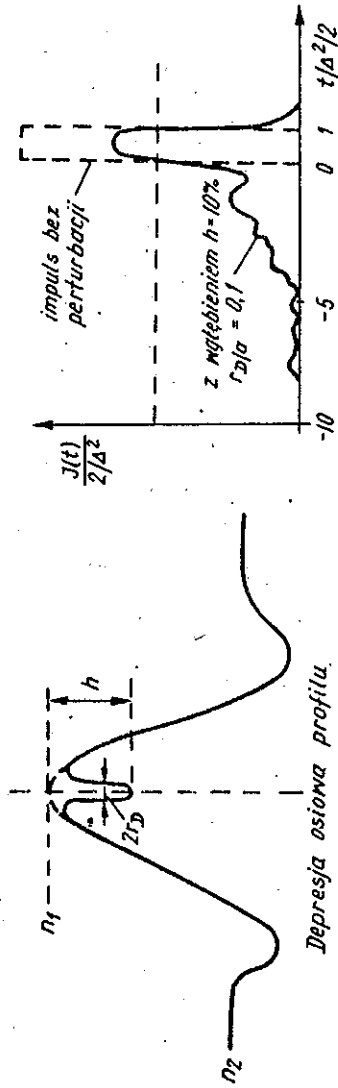
Rys. 8. Optymalny profil współczynnika załamania [7]



Wyskok $\delta\Delta n$ odkształcający
profil współcz. załamania

Reakcja impulsu
na wyskok $\delta\Delta n$

Rys. 9. Wpływ nierównomierności profilu na kształt impulsu [18]



Rys. 10. Depresja osiowa profilu oraz jej wpływ na kształt profilu przy 10% wielkości depresji [20]

