

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

PROBLEMY

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

ŁĄCZNOŚCI

123

1974



PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

ROK 14

WARSZAWA 1974

NR 123

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Problemów Łączności

Redaktor Naczelny - mgr inż. Jerzy Rutkowski

Redaktorzy działów:

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

mgr inż. Józef Możejko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 5.08.1974 r.
Druk ukończono w listopadzie 1974 r.

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

Władysław Cetner

ŚWIATŁOWODY

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Światłowody z elementami optyki geometrycznej	7
3. Światłowody z soczewkami gazowymi	15
4. Rodzaje światłowodów dielektrycznych	18
5. Światłowody z włókna optycznego	20
5.1. Powstawanie i własności modów w światłowodzie z włókna optycznego	20
5.2. Rozkład energii optycznej pomiędzy rdzeniem i okładziną	26
5.3. Straty w światłowodach z włókna optycznego	28
5.4. Jedno i wielomodowy światłowód z włókna optycznego	32
6. Światłowód samoogniskujący /SELFOC/	37
7. Technologia wytwarzania włókna optycznego	41
8. Stosowane w światłowodach źródła promieniowania i fotodetektory oraz ogólny układ wielokanałowej linii światłowodowej dalekiego zasięgu	45
9. Wnioski końcowe	54
10. Wykaz literatury	58

ŚWIATŁOWODY

1. WPROWADZENIE

Jeszcze w 1897 roku, a więc zaledwie kilka lat po odkryciu przez Hertza fal radiowych, Reyleigh w swej teoretycznej rozprawie dowiódł, że istnieje możliwość transmitowania energii elektromagnetycznej przez pustą metalową rurę. Ale rozwój techniki fal radiowych poszedł w kierunku znacznie dłuższych fal, bardziej dogodnych do łączności długodystansowej w ośrodku atmosfery, ale nie nadających się do transmisji falowodowej. Również możliwość zastosowania falowodów dielektrycznych była teoretycznie uzasadniona bardzo wcześnie, bo już w 1910 roku przez Hondrosa i Debye'a. Pomimo jednak tych wczesnych prac teoretycznych, intensywniejsze i bardziej praktyczne badania dotyczące falowodów pracujących na falach milimetrowych prowadzone były dopiero w latach czterdziestych.

Wynalazek lasera /1960 r./ generującego promieniowanie optyczne o dużej spójności przestrzennej i dużej monochromatyczności oraz opracowanie stosunkowo prostych metod szerokostęgowej modulacji tego promieniowania spowodowały intensywniejsze prace dotyczące zastosowania falowodów do transmisji energii optycznej. Prace te rozpoczęto już w 1961 roku, a więc prawie jednocześnie z badaniami zastosowania laserów do łączności w środowisku otwartym, tj. w przyziemnej warstwie atmosfery. Należy tu przypomnieć, że prace doświad-

czalne dotyczące transmitowania światła przez włókna szklane prowadzone były już w 1953 roku /Van Hill, Hopkins i Kapani/, a w 1958 roku opracowano pierwsze doświadczalne włókno optyczne z rdzeniem i okładziną, ale było to jeszcze przed wynalezieniem lasera, dotyczyło więc światła naturalnego nie nadającego się do przesyłania szerokowstęgowej informacji.

Początkowo prace doświadczalne dotyczyły światłowodów stanowiących rury metalowe z rozmieszczonymi w nich elementami optyki geometrycznej, tj. z soczewkami i lustrami, później /około 1964 roku/ rozpoczęto intensywne prace dotyczące światłowodów z soczewkami gazowymi.

Światłowód z włókna szklanego znalazł dość wcześnie praktyczne zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, techniki i w medycynie, tj. tam, gdzie wchodziły w grę jedynie krótkie odcinki światłowodu, jednak zastosowanie włókna optycznego do telekomunikacji napotykało poważne trudności ze względu na zbyt dużą tłumienność włókna dla promieniowania optycznego, rzędu 1000 i więcej dB/km. Dopiero w ostatnich kilku latach, z chwilą opanowania technologii małosłabego surowca i udoskonalenia technologii wyciągania zeń włókna optycznego o tłumienności o dwa rzędy wielkości mniejszej, zastosowanie światłowodu dielektrycznego w telekomunikacji stało się bardziej realne. Prace nad udoskonaleniem włókna optycznego prowadzone były bardzo intensywnie w wielu krajach, przede wszystkim w Anglii, USA, Japonii, NRF, ZSRR.

Dylemat, który z systemów - w ośrodku otwartym czy światłowód znajdzie bardziej praktyczne i szersze zastosowanie w telekomunikacji - jest podobny do dyskusyjnego przez długi czas zagadnienia użyteczności linii radiowych w porównaniu z liniami przewodowymi.

Przyziemna warstwa atmosfery w przypadku systemu otwartego naziemnego podlega silnym zmianom, głównie ze względów meteorologicznych, wpływającym w sposób zasadniczy na przejście wiązki promieniowania laserowego. Szczególnie trudne warunki propagacji powstają przy gęstej, mokrej mgie i śniegu, chociaż i przy dobrej pogodzie powstają zjawiska turbulencyjne w atmosferze, wpływające ujemnie na prawidłowe przejście wiązki promieniowania. Tłumienie trasy atmosferycznej jest również zależne od długości fali promieniowania optycznego. Zależność ta jest bardzo selektywna, mogąca silnie zmieniać się w zależności od bardzo małych zmian długości fali. Źródłem tej zależności są w głównej mierze zjawiska pochłaniania rezonansowego przez cząsteczki gazów i pary wodnej wchodzących w skład atmosfery.

Znaczna większość dotychczasowych otwartych, doświadczalnych optycznych linii telekomunikacyjnych pracowała w zakresie promieniowania widzialnego i z bardzo małą mocą wyjściową /rzędu kilkunastu miliwatów/, co prowadziło przy dużych zwiększeniach tłumienności trasy, tj. przy złych warunkach atmosferycznych, do zupełnych zaników odbieranego promieniowania. Obecnie zwiększa się zainteresowanie zakresem podczerwieni, nieco dogodniejszym propagacyjnie. W szczególności obiecujący dla łączności jest laser pracujący na mieszaninie gazów molekularnych $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$, dający promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni $10,6 \mu\text{m}$ i pozwalający na uzyskanie mocy, przy pracy ciągłej, znacznie przekraczającej praktyczne potrzeby łączności.

Doświadczenia dotyczące zastosowania tego lasera w otwartych liniach telekomunikacyjnych są obecnie prowadzone w kil-

ku krajach. Również i Instytut Łączności uczestniczy w takich badaniach prowadzonych w Centralnym Instytucie Naukowo-Badawczym Łączności w Moskwie, przy dużym wkładzie ze strony Instytutu Elektroniki Kwantowej WAT, dotyczącym opracowania podstawowych urządzeń dla doświadczalnej linii.

Istnieją jednak w tym zakresie fal optycznych jeszcze poważne problemy do rozwiązania, jak np.: opracowanie wysoko-czułego fotodetektora, zagadnienie dogodnej modulacji o dużej szerokości wstęgi przenoszonej informacji, stabilizacja częstotliwościowa pracy lasera, zmniejszenie gabarytów urządzeń i inne.

Wzrost zainteresowania systemami modulacji impulsowej, w szczególności modulacją kodowo-impulsową, kieruje uwagę pracowników badawczych na impulsową, o dużej stabilności pracę lasera, dającą wielokrotnie większą moc w impulsie od mocy przy pracy ciągłej. Opracowanie takiego systemu może zmienić radykalnie problem przejścia promieniowania optycznego przy złych warunkach meteorologicznych.

Należy przypuszczać, że łączność na falach optycznych w środowisku otwartym na dłuższych trasach będzie wkrótce dostatecznie opanowana dla praktycznego wdrożenia, a na niewielkie odległości /do kilku km/, z niedużą pojemnością informacyjną, optyczne łącza krótkodystansowe są już obecnie produkowane. Pracują one zarówno w zakresie widzialnym, jak i w bliskiej podczerwieni. Jako źródła promieniowania znalazły tu szerokie zastosowanie nie tylko lasery półprzewodnikowe, ale nawet diody luminescencyjne, mimo że promieniowanie ich odbiega znacznie od ścisłej spójności. Źródła te są bardzo dogodne ze względu na małe wymiary i łatwość mo-

dulacji. Jak zobaczymy niżej, te półprzewodnikowe elementy są szeroko stosowane również w doświadczalnych systemach światłowodowych.

W łączności satelitarnej, w której wiązka promieniowania przechodzi przez warstwę atmosfery bardziej pionowo, występujące tłumienie jest znacznie mniejsze, a w przypadku połączenia satelita-satelita znikomo małe, łączność na falach optycznych stanowi w tej dziedzinie technikę bardzo atrakcyjną.

Decydującym czynnikiem wprowadzenia praktycznego linii otwartych, a również i światłowodowych będą sprawy opłacalności w stosunku do istniejących technik łączności.

W tym opracowaniu najobszerniej będą omówione światłowodory z włókna dielektrycznego, natomiast bardziej pobieżnie światłowodory z elementami optyki geometrycznej i soczewkami gazowymi, gdyż, jak się wydaje nie stanowią one obecnie rozwiązań perspektywicznych.

Ze względu na brak ustalonego słownictwa w języku polskim dotyczącego łączności światłowodowej uzasadniona będzie próba takiego ustalenia. Termin: *ś w i a t ł o w ó d* jest już powszechnie przyjęty, chociaż przenoszona w nim energia optyczna dotyczy w praktyce nie tylko zakresu promieniowania widzialnego, ale i bliskiej podczerwieni. Pod światłowodem rozumieć więc będziemy zamkniętą, długą, cylindryczną prowadnicę fal, prawie wyłącznie o przekroju kołowym, zarówno metalową /z soczewkami i lustrami/, jak i dielektryczną. Terminem *w ł ó k n o o p t y c z n e* oznaczać będziemy włókno, w zasadzie o przekroju kołowym, z rdzeniem ze specjalnego szkła lub płynnym oraz z zewnętrzną okładziną również

ze specjalnego szkła o nieco mniejszym współczynniku załamania. W ł ó k n o s a m o o g n i s k u j ą c e /nazwa angielska SELFOC/ - to włókno szklane ze zmieniającym się wzdłuż promienia przekroju poprzecznego, w sposób ściśle określony, współczynnikiem załamania. Proponuje się tu używanie terminu: w s p ó ł c z y n n i k z a ł a m a n i a zamiast indeksu refrakcji /zalecany przez projekt PKN/, podobnie jak są używane terminy: współczynnik odbicia, współczynnik pochłaniania itp. M o d a m i będziemy nazywali rodzaje fal o określonym rozkładzie pola energii optycznej w przekroju poprzecznym światłowodu. Pod terminem: l i n i a ś w i a t ł o w o d o w a rozumieć będziemy jeden lub wiele torów światłowodowych /zawartych w jednym kablu/ wraz z kompletem urządzeń końcowych i przelotowych. Inne terminy wprowadzone w tekście będą, w miarę możliwości, zgodne z już spotykanymi w polskiej literaturze technicznej.

Wskutek obszerności tematu niektóre zagadnienia poruszone będą raczej szkicowo, chociaż dotyczą zagadnień bardzo ważnych. Na przykład tematyka źródeł promieniowania i detektorów promieniowania optycznego wymaga osobnego, obszernego opracowania, to samo dotyczy przeglądu systemów przesyłania wielokanałowej informacji przez długodystansowe światłowody, o praktycznej realizacji których istnieje jeszcze mało danych w dostępnej literaturze technicznej. Obydwa zagadnienia przedstawione są w niniejszym opracowaniu jedynie w formie krótkiej informacji.

Opracowanie niniejsze dotyczy wyłącznie światłowodów mogących znaleźć zastosowanie w telekomunikacji /średnio i długodystansowej/ z pominięciem zastosowań w innych dziedzinach nauki i techniki.

2. ŚWIATŁOWODY Z ELEMENTAMI OPTYKI GEOMETRYCZNEJ

Światłowody stanowiące puste długie rury metalowe lub dielektryczne, mimo dość licznych prac przeprowadzanych w latach 1961-65, nie stanowią obecnie obiektu zainteresowania, chociaż takie właśnie falowody znalazły zastosowanie w przypadku propagacji fal milimetrycznych. Przyczyną tego są zasadnicze różnice fizyczne cechujące fale optyczne i fale milimetryczne. W pustym światłowodzie wiązka energii optycznej powinna rozchodzić się wzdłuż falowodu poprzez kolejne odbicia od ścianek, w sposób zygzakowaty, pod warunkiem odpowiedniego wprowadzenia wiązki do falowodu. Ale kwant energii optycznej, w porównaniu z kwantem energii fal milimetrycznych, jest pod względem energetycznym o kilka rzędów wielkości większy i jego oddziaływanie na materię jest znacznie silniejsze - propagację fali optycznej w falowodzie nie można więc rozpatrywać jako ściśle podlegającą prawom odbić i załamania optyki geometrycznej. Wymagania co do równomierności /gładkości/ powierzchni ścianek są porównawczo wyjątkowo duże, gdyż wpływ rozmiarów tych nierównomierności jest proporcjonalny do częstotliwości przenoszonego promieniowania.

Podobnie jak falowody na fale milimetryczne, puste metaliczne i dielektryczne światłowody są bardzo wrażliwe na najmniejszą krzywiznę toru. Ujemny wpływ na propagację fali optycznej zakrzywień toru, nawet o bardzo dużym promieniu krzywizny, występuje również w światłowodzie z elementami optyki geometrycznej, ale w tym przypadku można zagęścić rozstawienie elementów oraz wprowadzić zwrotną kompensację skutków zakrzywień toru.

Nie trudno wyprowadzić [7,4] przybliżoną zależność dla minimalnego dopuszczalnego promienia krzywizny światłowodu, jeszcze nie wywołującego nadmiernego wzrostu tłumienia i zniekształceń rozkładu pola fali optycznej. Zależność ta wyraża się jako:

$$R_{\min} = A \cdot \frac{a^3}{\lambda^2}$$

gdzie a - promień apertury /dla pustego falowodu przyjęć można promień wewnętrzny rurki, dla soczewkowego - promień wiązki/. Współczynnik A zależy od rodzaju konstrukcji światłowodu. λ - długość fali.

Jeżeli światłowód jest zasilany prawidłowo, tj. wprowadzany jest mod podstawowy /zagadnienie modów zostanie szerzej omówione w rozdziale o światłowodach z włókna optycznego/ i wiązka jest skierowana właściwie na czołowy przekrój falowodu, to w przypadku idealnie prostego odcinka światłowodu oraz przy odpowiednio małych /porównywalnych z λ / nierównościach ścianek tłumienność będzie dla dielektrycznego pustego falowodu stosunkowo bardzo mała - rzędu 1,8 dB/km. Podobna teoretyczna wielkość tłumienia występuje w falowodzie metalowym. Ale na przykład dla stosunkowo małej apertury $a = 1$ mm i $\lambda = 1$ μ m tłumienność podwaja się już przy $R \cong 10$ km [4]. Praktycznie krzywizny toru rzędu setek metrów są prawie niemożliwe do utrzymania przy dłuższym odcinku światłowodu.

Wzrost tłumienności wynika głównie z konwersji modu podstawowego na mody wyższych rzędów, znacznie silniej tłumione. Zmienia się również w sposób niepożądany rozkład pola promieniowania w przekroju poprzecznym.

Dopuszczalne promienie krzywizny toru dla pustych światłowodów dielektrycznych i metalowych otrzymuje się tak duże, że technologiczne trudności montażu i trudności eksploatacyjne takich światłowodów wyeliminowały je z praktyki doświadczalnej.

Światłowód z elementami optyki geometrycznej stanowi długą rurę, zwykle metalową, z ustawionymi w niej periodycznie soczewkami skupiającymi, a również ze zwierciadłami płaskimi lub wklęsłymi w przypadku potrzeby dokonania zmiany kierunku wiązki promieniowania /stosowane były do tego celu również pryzmaty/. Badane były również światłowody tylko ze zwierciadłami, które można wykonać z bardzo dużym współczynnikiem odbicia, a więc z małymi stratami. Elementy te mają za zadanie przeciwdziałanie naturalnemu dążeniu wiązki do rozszerzania się wskutek dyfrakcji fali. Soczewki i lustra zmniejszają również dyfrakcyjne zniekształcenia frontu fazowego wiązki.

Światłowód powinien być gazoszczelny, gdyż atmosfera wewnątrz rury powinna być możliwie wolna od cząsteczek gazów powodujących silne pochłanianie promieniowania optycznego, a więc nie powinna zawierać takich gazów, jak CO_2 , CH_4 oraz pary wodnej. Bardzo ważną jest również sprawa unikania zmian współczynnika załamania, w szczególności powodowanych zmianami temperatury. W przeciwnym przypadku mielibyśmy do czynienia z ośrodkiem propagacji niewiele różniącym się od otwartego, atmosferycznego ośrodka.

Rysunek 1^{x/} ilustruje poglądowo odcinki torów światłowodu soczewkowego i zwierciadlanego.

^{x/} Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

Wykazano, że optymalna, z punktu widzenia minimalnego przesunięcia środka wiązki w stosunku do osi światłowodu, odległość pomiędzy soczewkami L powinna być równa $2f$, gdzie f - - długość ogniskowej poszczególnych soczewek. System taki zwie się konfokalnym. W tym systemie, przy dostatecznie dużej aperturze soczewek, około 4 do 5 L, λ , straty dyfrakcyjne będą bardzo małe, praktycznie do pominięcia [3].

Praktykowane rozstawienie soczewek wynosi 100 m do 150 m na prostoliniowych odcinkach światłowodu. W przypadku występowania zakrzywień toru, aby wiązka nie wypadła z właściwego kierunku /w stosunku do osi światłowodu/, należy soczewki silnie zagęszczać lub też stosować regulację położenia soczewek co pewną ich liczbę za pomocą tzw. wstecznej pętli regulacyjnej /przykładowy opis poniżej/.

Wykonanie bardzo cienkich soczewek o ogniskowej rzędu 50 m z wymaganą dużą dokładnością jest bardzo trudne, niemniej jednak wykonywano je z dokładnością długości ogniskowej około $\pm 0,5\%$ i przy nierównomiernościach powierzchni nie przekraczających 0,1 długości fali. Niezależnie od bardzo ścisłych tolerancji geometrycznych, soczewki powinny być wykonane z bardzo małymi stratami na odbicia od obydwóch powierzchni, zewnętrznej i wewnętrznej, z małymi stratami na absorpcję promieniowania w materiale i na rozproszenie. W praktyce osiągnęto ogólne straty na jedną soczewkę około 0,02dB. Dokładność ustawienia soczewek i zwierciadeł oraz zachowanie ich położenia w czasie jest również poważnym problemem, gdyż na przykład niedokładności kątowe rzędu 10^{-4} - 10^{-5} dają 10-krotne zwiększenie tłumienia [6].

W doświadczalnych soczewkowo-zwierciadlanych światłowo-

dach, o długości kilkuset metrów prostoliniowego odcinka, osiągnano jednak bardzo małą tłumienność ogólną rzędu 0,5 dB/km [3].

Wpływ zmian temperaturowych wewnątrz światłowodu soczewkowo-zwielciadlanego jest bardzo istotny, gdyż zmiany te powodują zmianę współczynnika załamania atmosfery zawartej wewnątrz światłowodu, a więc wpływają silnie na odchylenie się wiązki od prawidłowego osiowego kierunku. Zagadnienie to badał D. Gloge [5]. Zostaną podane tu niektóre dane z tych doświadczeń, jako ilustrujące ogólnie systemy światłowodów z elementami optyki geometrycznej.

Doświadczalny światłowód miał ogólną długość 850 m i stanowił rurę żelazną o średnicy 3,5 cala z pięcioma soczewkami rozstawionymi co 129 - 147 m. Światłowód był zakopany w ziemi na głębokości około 1,5 m i starano się, aby tworzył możliwie dokładnie linię prostą. Wzdłuż światłowodu wykonano 7 studzienek - w punkcie nadawczym i odbiorczym oraz 5 na trasie w miejscach znajdowania się soczewek, których położenie mogło być doregulowywane ręcznie. Soczewki światłowodu o średnicy 60 mm były wykonane z bardzo dużą dokładnością ogniskowych i równomiernością powierzchni około $0,1 \lambda$. Straty promieniowania odbiciowe, absorpcyjne i rozproszeniowe takiego światłowodu, ze względu na soczewki, powinny wynosić około 0,15 dB/km.

Układ wejściowy ilustruje rys. 2. Zawiera on laser helowo-neonowy, emitujący na fali $0,63 \mu\text{m}$ mod podstawowy z rozkładem gaussowskim pola poprzecznego. Po laserze zainstalowany był układ kolimacyjny, składający się z dwóch soczewek, z których położenie drugiej było regulowane automatycznie. Sze-

rokość wiązki /obliczona w punktach $1/e$ amplitudy/ wchodzącej do światłowodu wynosiła 10,4 mm. W dość obszernej studziennie zawierającej urządzenia nadawcze występowały znaczne zmiany temperatury dające na pierwszej soczewce światłowodu, odległej o około 130 m od punktu nadawczego, zmiany położenia wiązki rzędu 2 mm. W celu wyeliminowania tego wpływu zastosowano regulację zwrotną położenia drugiej soczewki układu kolimacyjnego, umieszczonej w uchwycie piezoelektrycznym, do którego prąd regulujący dostarczał specjalny czujnik położenia wiązki, opracowany według układu z rys. 3. Czujnik ten składał się z dwóch rezystorów fotoelektrycznych /Cd S/, pracujących w układzie różnicowym. Rozstawienie płaszczyzn fotorezystorów było takie, aby przepuszczały między sobą dostateczną część promieniowania, a jednocześnie reagowały na niewielkie przesunięcia wiązki. Napięcie wyjściowe z czujnika $V = \frac{V_0}{2} \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$, gdzie I_1, I_2 - natężenia oświetlenia odpowiednich fotorezystorów. Napięcie V nie będzie w tym układzie zależało od bezwzględnej wartości natężenia promieniowania lasera. Napięcie wyjściowe z czujnika jest doprowadzane do uchwytu piezoelektrycznego, zmieniając odpowiednio położenie soczewki. Taki sam układ, ale odwrócony o 90° pozwoli korygować pionowe przesunięcia. Podobny system czujników może być zastosowany w samym światłowodzie, co pewną liczbę soczewek, w celu korekty kierunku wiązki. W wymienionym artykule podano dwa dogodne układy do automatycznej zmiany kierunku wiązki. Na rys. 4 układ /a/ składa się z dwóch zwierciadeł, płaskiego i wklęsłego o dużym współczynniku odbicia. Układ /b/ stanowią dwie części soczewek skupiających. Przestrzeń między płaskimi powierzchniami soczewek jest wypełniona warstwą oleju o takim samym współczynniku załamania,

jak i soczewki. Obrót wzajemny obydwóch części pozwala na płynną zmianę położenia wiązki, podobnie jak w zestawie soczewki ze zmiennym pryzmatem.

Jak zaznaczone było wyżej, opisana instalacja służyła głównie badaniom wpływu zmian temperaturowych wewnątrz światłowodu. Zmiany temperatury wewnątrz światłowodu zainstalowanego w ziemi na głębokości 1,5 m są znacznie mniejsze od zmian temperatury na powierzchni ziemi. Duża pojemność cieplna i stosunkowo mała przewodność ziemi powodują redukcję zmian dobowych o około 3 rzędy wielkości, tak że w światłowodzie ułożonym na takiej głębokości w ziemi zmiany dobowe temperatury można pominąć. Natomiast uśrednione zmiany miesięczne i sezonowe są znaczne. Ilustruje to rys. 5, wykazujący dość dużą zależność temperatury wewnątrz światłowodu od zmian temperatury na powierzchni ziemi. Termiczny gradient nie miał praktycznie składowej poziomej, gdyż rurociąg był zamknięty, eliminując wzdłużny przepływ powietrza. Z przestrzeni pomiędzy wejściem promieniowania do światłowodu a pierwszą soczewką światłowodu powietrze było wypompowane. Należy przypuszczać, że w przypadku próżniowego światłowodu na całej długości wahania temperatury będą mniejsze.

Wykazane wahania temperatury prowadzą do powolnych przemieszczeń wiązki. Z wykresu na rys. 5 wynika, że maksymalny gradient temperaturowy wynosił $+ 0,02^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Jest to zbyt duża wielkość zmian i w praktyce należy stosować specjalne izolacje termiczne rurociągu. Przy dobrej izolacji można osiągnąć wielkość zmian $+ 0,001^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Zmiany takie powodują falujący przebieg wiązki w światłowodzie z średnią amplitudą 0,5 mm na początku światłowodu, wzrastając do około 5 mm po

przejściu przez 100 soczewek. Przy dłuższym światłowodzie niż opisany będzie więc wymagany elektroniczny system wstecznej regulacji położenia soczewek. W danym doświadczeniu nie były badane odchylenia wiązki wskutek wibracji i tąpnięć gruntu, co na pewno spowoduje zagęszczenie w światłowodzie soczewek o regulowanym położeniu.

Należy omówić jeszcze jedną właściwość soczewkowo-zwierciadlanych światłowodów, a mianowicie możliwość przekazywania jednocześnie wielu wiązek promieniowania optycznego, rozłożonych przestrzennie w światłowodzie, przy czym każda wiązka może na tej samej częstotliwości nośnej przesyłać niezależną informację. Pozwala to na dodatkowe znaczne zwiększenie pojemności informacyjnej jednego światłowodu poprzez zwielokrotnienie przestrzenne, niezależnie od zwielokrotnienia częstotliwościowo-czasowego każdej wiązki.

Zwielokrotnienie przestrzenne jest ograniczone przez prześwit /przenik/ pomiędzy poszczególnymi wiązkami-kanalami, głównie wskutek rozproszenia od elementów skupiających i nakierowujących wiązki. Również zniekształcenia dyfrakcyjne odkształcające pola wiązek na elementach skupiających wpływają, w pewnym stopniu, na wartość prześwitu.

Sprawę przestrzennego uwielokrotnienia badano między innymi w laboratoriach Bella [8]. System przestrzennego uwielokrotnienia może być dwójaki, jak to pokazane zostało na rys. 6 [8]. Na rys. 6a/ przedstawiony został równomierny rozkład źródeł promieniowania /z lewej strony/ oraz odbiorników /z prawej/, na rys. 6b/ pokazany jest system grupowania źródeł promieniowania i odpowiednio odbiorników. Wykazano, że druga metoda jest bardziej praktyczna. W przypadku zwierciadla-

nego światłowodu, z dość skomplikowanym systemem wstecznej automatycznej korekcji położenia luster, przy dobrych ich właściwościach optycznych i średnicach 20-30 cm oraz przy rozstawieniu w rurociągu co około 100 m, według [8] można jednocześnie przestać około 100 niezależnych wiązek, przy dopuszczalnym przeniku 23 dB, w światłowodzie o długości 50 km, przy długości fali $\lambda = 1 \mu\text{m}$. Założony został przy tym idealny rozkład Gaussa pola poprzecznego wiązek.

Światłowody z elementami optyki geometrycznej, jak można wnioskować z wyżej przytoczonych przykładów, są systemami skomplikowanymi układowo i trudnymi w eksploatacji. Niemniej jednak znajdują jeszcze zainteresowanie. Na przykład w Japonii [39] przewiduje się możliwość zastosowania takich światłowodów, łączących duże miasta położone wzdłuż wybrzeża Pacyfiku. Przyczyną tego zainteresowania, wobec jednoczesnych dużych osiągnięć w zakresie światłowodów z włókna szklanego, jest możliwość osiągnięcia wyjątkowo małej wartości tłumienności około 0,5 dB/km, przy jednocześnie bardzo wysokim wielokrotnieniu liczby przesyłanych kanałów informacyjnych /do około 1000 Gbit/s/. Oczywiście należy przy tym zakładać wyjątkowo dokładne wykonanie zarówno całości światłowodów, jak i jego elementów.

3. ŚWIATŁOWODY Z SOCZEWKAMI GAZOWYMI

Przy rozważaniu światłowodu z soczewkami twardymi lub ze zwierciadłami zaznaczone było, że w przypadku idealnie prostego odcinka światłowodu możliwe jest osiągnięcie bardzo małej tłumienności rzędu 0,5 dB/km, ale z chwilą występowania

nia nawet niewielkich zakrzywień toru, jeśli nie zastosowano specjalnych systemów regulacji położenia soczewek, potrzeba było bardzo zagęszczać soczewki i wówczas tłumienie takiego światłowodu silnie wzrastało. Z tego względu w latach 1963-70 istniało duże zainteresowanie tzw. soczewkami gazowymi, tłumienność których, wskutek braku powierzchni odbijających i małych strat w materiale, była bardzo mała.

Soczewkę gazową, w postaci najprostszej, stanowi odcinek rury metalowej, wstawionej współosiowo do rurociągu światłowodu, na którym nawinięto spiralę z drutu grzejnego, np. z chromonikieliny, podgrzewającego odcinek rury przy przepuszczaniu przez spiralę prądu elektrycznego. Jeżeli przez światłowód z taką soczewką przetłaczać gaz /może to być oczyszczone z pary wodnej powietrze lub inny gaz/, to wewnątrz podgrzewanego odcinka rury utworzy się pewien rozkład współczynnika załamania dla promieniowania optycznego przechodzącego przez światłowód. Rozkład ten będzie wynikiem prędkości przepływu gazu i rozkładu temperatury wytworzonego w przekroju poprzecznym rury. Rysunek 7 ilustruje składowe rozkłady i wynikowy rozkład współczynnika załamania. Ponieważ przy ściankach podgrzewanego odcinka rury temperatura będzie największa, a prędkość przepływu gazu najmniejsza - gaz będzie silniej podgrzewany w miarę zbliżania się od osi do ścianki - powstaną różnice gęstości, a więc i różnice współczynnika załamania. W rezultacie takiego systemu można uzyskać oddziaływanie na promieniowanie optyczne podobne do soczewki skupiającej. Istnieje optymalna długość podgrzewanego odcinka, prędkości przepływu gazu i optymalne podgrzewanie rury dla uformowania prawidłowej soczewki o potrzebnej długości

ogniskowej. Odległość między soczewkami powinna również pozwalać na dostateczne oziębienie gazu przy wlocie do następnej soczewki.

Rysunek 8 ilustruje jedno z rozwiązań konstrukcyjnych soczewki gazowej [11]. Jak widać, podgrzewana rura wewnętrzna ma niewielką średnicę w stosunku do średnicy rury całego światłowodu. Przejście wejściowe i wyjściowe rury soczewki w stosunku do rury światłowodu jest odpowiednio ukształtowane, aby uniknąć turbulencji gazu w tych miejscach, wpływających na prawidłowy rozkład temperatury.

Praktyczne doświadczenia z światłowodami z soczewkami gazowymi, ukształtowanymi jak na rys. 8, wykazywały jednak niestabilność zamierzonego rozkładu współczynnika załamania. Okazało się, że osiowy, jednokierunkowy przepływ gazu oraz zjawisko grawitacji wprowadzają sferyczne aberacje wiązki promieniowania, zniekształcające początkowy gaussowski rozkład natężenia promieniowania.

Ulepszoną konstrukcję światłowodu z soczewkami gazowymi przedstawia rys. 9. Konstrukcję tę cechuje przepływ gazu w przeciwnych kierunkach w rozdwojonej soczewce.

Z rysunku 9 widać, że światłowód z soczewkami gazowymi staje się konstrukcyjnie skomplikowany, tym bardziej że wymaga również zagęszczania ustawienia soczewek w przypadku małego odstępstwa od prostoliniowości toru światłowodu lub też wprowadzania urządzeń korygujących przebieg wiązki.

Wynalezienie szklanego włókna optycznego i włókna samoogniskującego spowodowało znaczne zmniejszenie się zainteresowania światłowodami z soczewkami gazowymi, mimo poświęcenia im bardzo dużych wysiłków. Z tego względu i w tym o-

pracowaniu światłowody te potraktowane zostały jedynie szklicowo.

4. RODZAJE ŚWIATŁOWODÓW DIELEKTRYCZNYCH

Światłowody dielektryczne /głównie z włókna szklanego/ stosowane obecnie w doświadczalnych światłowodowych liniach telekomunikacyjnych można podzielić na dwie główne kategorie, różniące się dość zasadniczo mechanizmem propagacji fali optycznej, a mianowicie: a/ światłowody z włókna optycznego, tj. utworzone z cieniutkiej cylindrycznej nici - rdzenia ze specjalnego szkła i otaczającej go okładziny również ze szkła o nieco mniejszym współczynniku załamania oraz b/ światłowody stanowiące włókno szklane, w którym współczynnik załamania zmienia się wzdłuż promienia przekroju w sposób określony, czyli tzw. światłowód samoogniskujący.

Światłowody z włókna optycznego mogą być konstruowane z rdzeniem płynnym, a nawet gazowym.

Światłowody z włókna optycznego mogą pracować wielomodowo i jednomodowo. Światłowód samoogniskujący jest z zasady wielomodowy, chociaż może być wykonany również jako jednomodowy.

Do pracy jednomodowej wykonuje się światłowody z rdzeniem o bardzo małej średnicy, rzędu kilku długości fali promieniowania optycznego. Światłowód taki przy odpowiednio małej różnicy współczynników załamania rdzenia i okładziny pozwala na przejście promieniowania tylko o tzw. modzie podstawowym. Światłowody wielomodowe mają średnicę rdzenia wielokrotnie większą od długości transmitowanej fali. Wskutek dyspersji fali optycznej, tj. występującej różnicy czasu

przejścia grupowego pomiędzy najniższym i najwyższym modem, światłowód wielomodowy pozwala na mniejszą od jednomodowego szerokość wstęgi przesyłanej informacji. Jak będzie to omówione wyżej, przeprowadzone ostatnio doświadczenia wykazały, że światłowód wielomodowy jest pod tym względem korzystniejszy niż przewidywały rozważania teoretyczne, a pod względem technologii wytwarzania, eksploatacji i innych względów jest wygodniejszy od jednomodowego.

Ostatnio publikowane są opracowania świadczące o bardzo dużych zaletach światłowodów samoogniskujących, w których wiązka optycznego promieniowania przebiega wzdłuż linii śrubowej /lub falistej/ w przestrzeni cylindrycznej w pobliżu osi światłowodu. Ten rodzaj światłowodu nazywany jest w skrócie SELFOC, nazwa wprowadzona została przez Japończyków, najbardziej zaawansowanych w badaniach technologicznych i w praktycznych zastosowaniach tego rodzaju światłowodów.

Linie światłowodowe mogą być wykonane z pojedynczego włókna lub z wielu włókien w postaci pęczka włókien, tworzących jeden kabel. Oczywiście w takim kablu każdy pojedynczy światłowód przekazuje inne sygnały informacyjne.

Wszystkie wyżej wymienione rodzaje światłowodów dielektrycznych wykazują wielką zaletę w stosunku do pustego falowodu oraz w stosunku do światłowodu z elementami optyki geometrycznej i z soczewkami gazowymi, a mianowicie bardzo małą wrażliwość na zagięcia światłowodu, aż do promienia krzywizny w granicach sprężystości włókna, tj. dopuszczalne są promienie krzywizny rzędu kilku lub kilkunastu centymetrów.

Rysunek 10 przedstawia przybliżony obraz przejścia promieni wiązki promieniowania lasera lub diody luminescencyjnej

przez wielomodowe włókno optyczne oraz przez światłowód samoogniskujący. Rysunek 11 przedstawia graficznie zmianę wartości współczynnika załamania wzdłuż średnicy jednomodowego światłowodu z włókna optycznego oraz światłowodu samoogniskującego.

Zaletą małego wpływu na propagację fali zakrzywień toru światłowodu, nawet o bardzo małych promieniach krzywizny, ogromnie ułatwia instalację światłowodów oraz pozwoli w przyszłości na łatwą zmianę dotychczasowych kabli na światłowody w istniejącej już kanalizacji kablowej sieci telekomunikacyjnej. Dotyczy to również wiązek z wielu włókien zawartych w jednym kablu. Na przykład kabel złożony z 300 pojedynczych światłowodów z włókna optycznego może mieć średnicę zewnętrzną około 6-7 mm, o sumarycznej pojemności informacyjnej rzędu 2 milionów kanałów telefonicznych [23].

Próba porównania zalet i ujemnych stron światłowodów z włókien szklanych z konwencjonalnymi systemami linii telekomunikacyjnych będzie podana w części końcowej niniejszego opracowania.

5. ŚWIATŁOWODY Z WŁÓKNA OPTYCZNEGO

5.1. Powstawanie i własności modów w światłowodzie z włókna optycznego

Z punktu widzenia optyki geometrycznej rozchodzenie się wiązki /promieni/ optycznego promieniowania w włóknie z rdzeniem i okładziną tłumaczy się zjawiskiem pełnego wewnętrznego odbicia wiązki na powierzchni rozdzielającej rdzeń od okładziny.

Przypominamy tu znane prawo Snelliusa-Descartesa. Ilustruje go rysunek 12. Kątem krytycznym φ_k nazywamy kąt padającego promienia, przy którym promień odbity leży na powierzchni rozdzielającej rdzeń od okładziny. Promienie odbite z rys. 12a/ i 12b/ stanowią niewielki procent energii padającej wiązki. Z prawa Snelliusa otrzymujemy: $\sin \varphi_k = n_2/n_1$. Dla kątów padania $\varphi > \varphi_k$ następuje całkowite wewnętrzne odbicie. Musi być przy tym spełniony warunek $n_1 > n_2$.

Z rysunku 13 określimy liczbową aperturę włókna optycznego, przedstawiającą maksymalny kąt /brytowy/, pod którym padający promień jeszcze przejdzie wewnątrz rdzenia:

$$\sin \varphi_a = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_3} ; \text{ dla powietrza } n_3 = 1. \text{ Jeżeli kąt, jaki stanowi padający promień z osią włókna } \varphi > \varphi_a, \text{ to po załamaniu na powierzchni rdzeń - okładzina wyjdzie on przez boczną powierzchnię włókna na zewnątrz.}$$

Te proste wyprowadzenia odnoszą się do promieni przecinających oś światłowodu. W przypadku promieni skośnych, rozchodzących się w rdzeniu łamaną linią spiralną, zależności te nieco się komplikują, ale zasadnicza zależność apertury od wyrażenia $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ pozostaje. Zobaczmy dalej, że wyrażenie to będzie występować i w zależnościach modowych.

Rozpatrywanie jednak mechanizmu rozchodzenia się promieniowania optycznego w światłowodzie z włókna optycznego, w którym rozmiary poprzeczne rdzenia są współmierne z długością fali wprowadzanego doń promieniowania, z punktu widzenia optyki geometrycznej nie daje właściwego obrazu występujących zjawisk. Zjawiska zachodzące w takich światłowodach należy rozpatrywać z punktu widzenia teorii falowej /względ-

nie teorii falowodów dielektrycznych/. Obliczenia charakterystyk propagacji promieniowania optycznego w omawianych światłowodach są skomplikowane matematycznie i pracochłonne, gdyż należy tu uwzględnić dużą liczbę parametrów. Charakterystyki te zależą nie tylko od materiału, formy i rozmiarów światłowodu, ale i od specyficznego układu rozchodzących się fal. Okazuje się, że wzdłuż światłowodu mogą rozchodzić się tylko dyskretne, ściśle określone rodzaje fal, charakteryzujące się określonym rozkładem pola elektrycznego i magnetycznego, czyli tzw. mody. Muszą one spełniać równania Maxwella i warunki graniczne, występujące na powierzchni stykowej rdzeń-okładzina.

Teoria falowodu dielektrycznego dla światłowodu z włókna optycznego została opracowana przez E. Snitzera i innych [1, 13, 16, 17, 18, 19, 20]. Tutaj podane zostaną jedynie skrócone jej wyniki, głównie w celu ogólnego wyjaśnienia zjawiska powstawania modów.

Rozwiązanie równań Maxwella dla światłowodu z włókna optycznego o przekroju kołowym, w cylindrycznym systemie współrzędnych r, φ, z /kierunek osi z zgodny z osią światłowodu/, dają wyrażenia na wzdłużne składowe pola elektrycznego E_z i pola magnetycznego H_z w funkcjach cylindrycznych. Dla rdzenia funkcje te są funkcjami Bessela pierwszego rodzaju $J_n /u/$, dla okładziny funkcje Hankela $K_n /w/$. Argumenty tych funkcji u i w są to tzw. liczby falowe, odpowiednio dla rdzenia i okładziny, otrzymane z równania określającego, przy zachowaniu warunków granicznych, tj. z ciągłości stycznych składowych pól elektrycznego i magnetycznego na granicy rozdziału rdzenia z okładziną.

Mody oznaczają się dwoma indeksami: n i m , przy czym indeksowi n odpowiada rząd funkcji Bessela, a m - numer porządkowy pierwiastka. n oznacza liczbę zmian pola wzdłuż kątowej współrzędnej, m - wskazuje na liczbę zmian pola wzdłuż promienia przekroju światłowodu. Wartości n wynoszą $n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. Liczby dodatnie odpowiadają modowi, przy którym fala rozchodzi się spiralnie /linią łamaną/ wzdłuż rdzenia światłowodu w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, ujemna liczba wskazuje na ruch w kierunku odwrotnym. Te spiralne rodzaje fal odpowiadają rozchodzeniu się promieni skośnych w światłowodzie według optyki geometrycznej. Indeks m przybiera wartości $m = 1, 2, 3 \dots$.

Ogólnie występują dwa rodzaje modów, które mogą się rozchodzić w światłowodzie z włókna optycznego, a mianowicie:

- a. Poprzeczne mody symetryczne, występujące przy $n = 0$ i oznaczane symbolami TE_{om} i TH_{om} /lub E_{om} i H_{om} /, przy których nie występują składowe wzdłuż osi światłowodu.
- b. Mody mieszane /hybrydowe/, dla których $n \neq 0$. Rozkład pola ma w tym przypadku składowe wzdłużne zarówno elektryczne, jak i magnetyczne. Mody te oznaczają się symbolami EH_{nm} i HE_{nm} .

Warunki rozchodzenia się danego modu wzdłuż włókna optycznego określa liczba falowa u_{nm} wyrażona zależnością:

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

gdzie: a - promień przekroju rdzenia, λ_0 - długość fali w próżni, n_1 i n_2 - odpowiednio współczynniki załamania materiału rdzenia i okładziny.

u_{nm} - przedstawia, zgodnie z przyjętym określeniem indeksów, m -ty pierwiastek równania określającego warunki krytyczne wyrażone przez funkcję Bessela n -tego rzędu.

Każdemu modowi odpowiada określona wartość krytyczna u_{nmk} , która musi spełniać zależność:

$$u_{nmk} = \frac{2 \pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

aby fala o tym modzie mogła rozchodzić się wzdłuż danego światłowodu.

Pierwiastki równania określającego funkcji Bessela dla wartości $n = 0$ i $m = 0, 1, 2$ stanowią odpowiednio liczby: 2,405, 5,520, 8,654 [17]. Oznaczmy dla uproszczenia wyrażenie:

$$\frac{\lambda_0}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = N.$$

Z powyższych danych wynika, że fale o modach TH_{01} i TE_{01} będą mogły powstać w światłowodzie z włókna optycznego tylko wtedy, gdy średnica rdzenia będzie: $2a \geq 2,405 N$; fale o modach TH_{02} i TE_{02} przy $2a \geq 5,52 N$ itd.

Dla modów hybrydowych HE_{nm} i EH_{nm} sprawa przedstawia się inaczej. Fale o modzie HE_{11} nie mają krytycznej długości fali, tj. mogą powstawać przy dowolnej wartości średnicy rdzenia. Przy dostatecznie małej średnicy, tj. gdy $2a < 2,405 N$, powstawać będą w światłowodzie fale tylko o modzie HE_{11} . Mod ten dlatego nazywany jest często modem podstawowym.

Właściwość powstawania tylko modu HE_{11} przy odpowiednio małej średnicy rdzenia włókna oraz przy odpowiednio małej

różnicy $/n_1 - n_2/$ jest bardzo ważna, gdyż pozwala na wytwarzanie jednomodowego włókna optycznego.

Fala o modzie EH_{11} w światłowodzie z włókna optycznego nie istnieje /nie ma odpowiedniego pierwiastka równanie określające/ [17].

Fale o modzie HE_{21} mogą powstać przy $2a > 2,405 \lambda_0$; fale o modach HE_{12} , EH_{12} i EH_{31} przy $2a > 3,832 \lambda_0$ itd.

Wraz ze wzrostem średnicy rdzenia dla danych współczynników załamania n_1 i n_2 wzrastać więc będzie liczba modów, które mogą się rozchodzić w światłowodzie. Im mniejsza będzie różnica $/n_1 - n_2/$, tym mniej modów może powstawać w światłowodzie o danej średnicy rdzenia.

Liczbę modów M , które mogą rozchodzić się w włóknie optycznym w zależności od tzw. znormalizowanej średnicy rdzenia:

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

ilustruje wykres z rys. 14 [17]. /Zamiast terminu średnica znormalizowana lub sprowadzona czasami używa się terminu: znormalizowana częstotliwość/. Widzimy tu szybko rosnącą liczbę możliwych modów w miarę wzrastania d_n .

W wielomodowym światłowodzie, tj. z włókna optycznego o stosunkowo dużej średnicy rdzenia, liczba występujących modów może przewyższać 1000 [22], ale z warunku

$$2a < \frac{2,405 \lambda_0}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

wynika, że np. przy $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,49$ i dla $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$, jeśli średnica rdzenia będzie $2a < 4,35 \mu\text{m}$, to światłowód

będzie pracował tylko z falą o modzie HE_{11} .

Oczywiście, przy mniejszej różnicy współczynników załamania, krytyczna średnica będzie odpowiednio większa. Dlatego dąży się do możliwie małych różnic współczynników załamania rdzenia i okładziny, ale jeszcze zapewniających pełne wewnętrzne załamanie wiązki.

Praca jednomodowa światłowodu z włókna optycznego jest, z punktu widzenia możliwie dużej jego pojemności informacyjnej, najkorzystniejszą, o czym będzie mowa poniżej.

5.2. Rozkład energii optycznej pomiędzy rdzeniem i okładziną

W światłowodzie z włókna optycznego energia fal optycznych nie rozchodzi się tylko wzdłuż rdzenia, jak to przewidywał mechanizm rozchodzenia się fal w światłowodzie z punktu widzenia optyki geometrycznej. Część energii rozchodzi się wewnątrz rdzenia, a część wzdłuż okładziny, przy czym rozkład energii w przekroju poprzecznym światłowodu zależy od rodzaju modów występujących w włóknie.

Dla fal o modach TH_{om} i TE_{om} rozkład energii wykazuje zerowe natężenie promieniowania wzdłuż osi światłowodu i prowadzona przez światłowód energia optyczna rozkłada się w jego przekroju poprzecznym w postaci jednego lub więcej współosiowych pierścieni.

Dla modów hybrydowych HE_{1m} , na odwrót, maksimum natężenia promieniowania występuje w środku światłowodu, tj. wzdłuż jego osi, a dla modu podstawowego HE_{11} cała energia koncentruje się wewnątrz współosiowego koła /cylindra/. Nie oznacza

to, że cała energia propagowana koncentruje się w tym przypadku wewnątrz rdzenia, gdyż jak wynika z wykresów rys. 15 stosunek energii prowadzonej przez rdzeń do energii przechodzącej przez okładzinę zależy od średnicy rdzenia.

Wykresy z rys. 15, podane według [17], wskazują, że dla bardzo małych znormalizowanych średnic d_n , w pobliżu lub dla wartości mniejszych od krytycznej dla danego modu, większa część energii przechodzi przez okładzinę, koncentrując się coraz bardziej w rdzeniu w miarę wzrastania średnicy rdzenia. Wykresy odnoszą się do stosunku $n_1^2/n_2^2 = 1,02$, dla większej wartości tego stosunku przebiegi krzywych niewiele się różnią. Z krzywych rys. 15 widać, że krytyczna wartość d_n dla modów TH_{01} , TE_{01} oraz HE_{21} wynosi około 0,8.

Dla wyższych wartości indeksów n i m występujących w modach hybrydowych HE_{nm} natężenie promieniowania koncentruje się również w postaci współśrodkowych pierścieni, ale wokół zapełnionego środka rdzenia.

W przypadku wielomodowego światłowodu o dość znacznej średnicy rdzenia większość energii, zgodnie z wykresami z rys. 15, będzie przenoszona przez rdzeń.

Przykładowo rozkład energii promieniowania w przekroju poprzecznym światłowodu z włókna optycznego, przy różnych modach i ich kombinacjach, ilustruje w sposób uproszczony rys. 16. Został on wykonany na podstawie doświadczalnie przeprowadzonych zdjęć fotograficznych obrazu rozkładu promieniowania z wyjściowego przekroju światłowodu [19, 20, 22].

Według danych doświadczalnych [16] przenikanie energii optycznej do okładziny nie przekracza $2,5 \lambda$ do $3,4 \lambda$ /mierząc wzdłuż promienia przekroju światłowodu/.

5.3. Straty w światłowodach z włókna optycznego

Włókno optyczne z rdzeniem i okładziną, z przeznaczeniem do przenoszenia energii świetlnej, zostało opracowane już w 1958 r. i znalazło wkrótce zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i techniki, ale tłumienność takich włókien przekraczała wówczas 1000 dB/km, co przy pewnych rodzajach zastosowań nie było zasadniczą przeszkodą. Dla celów jednak teletransmisyjnych, gdzie długości torów liczą się w kilometrach, należało straty występujące w światłowodzie zmniejszyć o przeszło dwa rzędy wielkości. Tak znaczne zmniejszenie strat energii optycznej w światłowodzie z włókna optycznego wymagało olbrzymiego wysiłku pracowników naukowych i technologów, uwieńczony sukcesem dopiero w ostatnich latach.

Straty w włóknach optycznych można podzielić na występujące w samym wyjściowym, objętościowym materiale oraz na straty wynikające z niedoskonałości wykonywania /wyciągania/ z materiału objętościowego cieniutkiego włókna z rdzeniem i okładziną o różnych współczynnikach załamania, ale nie zmieniających się wzdłuż włókna.

Ponieważ, jak widzieliśmy wyżej, energia optyczna w włóknie optycznym jest przenoszona zarówno przez rdzeń jak i okładzinę /zależnie od modu fali optycznej/, ważne jest zminimalizowanie strat w materiale, z którego będą ciągnięte zarówno rdzeń, jak i pokrywająca go okładzina.

Straty w objętościowym materiale wynikają głównie z dwóch zjawisk fizycznych: absorpcji i rozproszenia, a w gotowym włóknie dodatkowo z wypromieniowywania energii optycznej, wprowadzanej do światłowodu.

Absorpcja we włóknach ze szkła wywołana jest nie podstawowym czystym składnikiem, tj. krzemionką SiO_2 , /absorpcja, w której występuje dla fal nadfioletu $\lambda < 0,18 \mu\text{m}$ /, ale przez zanieczyszczenia cząsteczkami ciężkich metali, jak żelazo, miedź, chrom, nikiel i inne. W zakresie promieniowania widzialnego absorpcję wywołują głównie zjawiska rezonansowe w elektronowych pasmach energetycznych atomu, w zakresie bliskiej podczerwieni przeważa absorpcja na wzdłużne i rotacyjne drgania molekularne. Następuje przy tym przemiana energii fotonów na energię cieplną. Dość istotny udział w absorpcji w szerokim zakresie fal $0,35 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$ mają przejścia elektronów zanieczyszczeń z jednych poziomów energetycznych na wyższe. Dużą rolę w absorpcji odgrywają jony żelaza Fe^{++} dające maksimum absorpcji przy $\lambda \cong 1 \mu\text{m}$ oraz jony Fe^{+++} wykazujące maksymalne pochłanianie w nadfiolecie $\lambda \cong 0,4 \mu\text{m}$. Oceniane jest, że jony te dają wzrost tłumienia objętościowego materiału o 10 - 20 dB/km przy zanieczyszczeniu tymi jonami żelaza rzędu 1 : 10^6 . Zanieczyszczenia wtrąconymi cząsteczkami innych metali dawać mogą wzrost tłumienności włókna o 1 dB/km przy zawartości zanieczyszczeń około 1 : 10^{10} [23, 24].

Z powyższego wynika, że czystość materiału przeznaczonego na szklane włókno optyczne, z punktu widzenia zanieczyszczeń cząsteczkami metali, powinna być rzędu 1 : 10^9 , czyli porównywalna z czystością materiału wymaganą przy wytwarzaniu elektronicznych elementów półprzewodnikowych.

Również rodniki OH, występujące zwykle w szkłe, powodują absorpcję przy długości fali $2,8 \mu\text{m}$, a trzecia i czwarta harmoniczna / $0,95 \mu\text{m}$ i $0,7 \mu\text{m}$ / wypadają w zakresie fal prak-

tycznie stosowanych w światłowodach. Chociaż pochłanianą energią przez rodniki OH jest niewielka, to przy bardzo czystym, bez domieszek metalowych szkło mogą one odegrać dużą rolę.

Drugim ważnym źródłem strat w materiale jest rozproszenie. Wywołane ono jest brakiem całkowicie uporządkowanej struktury wewnętrznej materiału, tj. cząsteczki w materiale bezpostaciowym, jakim jest szkło, są dość przypadkowo rozłożone. To rozproszenie, jako wywołane nierównomiernościami mniejszymi od długości fali, podlega prawu Rayleigha, tj. zależy od odwrotności czwartej potęgi długości fali. Straty te występują więc znacznie silniej w zakresie ultrafioletu i z tego między innymi powodu zakres tych fal nie jest stosowany w światłowodach. Straty te zmniejszają się szybko przy dłuższych falach widzialnego zakresu, a więc i dla bliskiej podczerwieni. Na przykład dla szkła z chemicznie czystej topionej krzemionki przy $1 \mu\text{m}$ długości fali straty na rozproszenie według [21] wynoszą około $0,8 \text{ dB/km.}$ Zjawisko rozproszenia wywołują również takie defekty strukturalne, jak: zlokalizowane fluktuacje gęstości materiału, powstawanie drobnych skryształizowań, pęcherzyków powietrza i wtrącone obce cząsteczki, które zasadniczo są znacznie większe od długości fali.

Straty na rozproszenie występują również w gotowym światłowodzie z włókna optycznego wskutek niedoskonałości jego wykonania. Powstają one na powierzchni rozdziału rdzeń-okładzina, głównie z powodu nierównomierności /szorstkości/ tej powierzchni, przylegających doń cząsteczek kurzu i innych zanieczyszczeń oraz z powodu odkształceń od kołowego przekroju poprzecznego włókna.

Tu należy podkreślić rolę spełnianą przez okładzinę. Teoretycznie pełne wewnętrzne odbicie jest możliwe, gdy zewnętrzny ośrodek wokół rdzenia tworzy powietrze ($n_2 = 1$), ale włókno takie narażone byłoby na ciągłe przyleganie cząsteczek kurzu do powierzchni włókna i na możliwości drobnych i większych uszkodzeń powierzchni, zwiększających bardzo znacznie straty na rozproszenie. Niezależnie od powyższego przekonaliśmy się w poprzednich rozdziałach, że wymagana jest mała różnica współczynników załamania okładziny i rdzenia, warunkująca zmniejszenie liczby modów w światłowodzie o danej średnicy rdzenia. Również straty na odbicie, a przede wszystkim na wypromieniowywanie energii, szczególnie przy zgięciach włókna, znacznie by się zwiększyły przy braku okładziny.

Straty na rozproszenie w gotowym włóknie optycznym można znacznie zmniejszyć przez zastosowanie właściwej technologii ciągnięcia oraz przez zachowanie odpowiednich warunków klimatyzacji pomieszczenia, tj. ciągnięcie włókna w atmosferze całkowicie wolnej od kurzu.

Zmiana średnicy światłowodu również silnie wpływa na straty. Na przykład według [21] odstępstwo od ustalonej średnicy rdzenia rzędu $0,002 \mu\text{m}$ wywołuje, przy korelacyjnej długości zmian rzędu długości fali, straty na rozproszenie około 10 dB/km .

Rozproszona energia może mieć składowe boczne, wychodzące poza włókno oraz składowe w przód, mogące być nadal wykorzystane. Składowe w kierunku odwrotnym do kierunku przenoszenia energii, po odbiciu od czołowej powierzchni światłowodu lub od innych centrów rozproszeniowych, będą stanowić owielkości szumu na wyjściu światłowodu.

Straty na wypromieniowywanie energii wywołane są głównie przez zagięcia włókna. Teoretyczna analiza wykazuje, że straty te są funkcją szybko rosnącą w zależności od odwrotności promienia krzywizny. Dla włókna optycznego straty te są małe, dopóki promień krzywizny nie zmniejszy się do pewnej wartości krytycznej, poniżej której straty rosną bardzo prędko. Światłowód z włókna optycznego można praktycznie zginać prawie do granicy określonej elastycznością materiału i to jest wielką zaletą tych światłowodów.

Wypromieniowywanie energii następuje również na nierównomiernościach materiału i powierzchni rdzeń-okładzina wskutek składowych rozproszenia skierowanych w kierunku bocznym, nie pozwalających na odbicie wewnętrzne, tj. wychodzących z włókna przez okładzinę.

Dla światłowodów wielokrotnych, złożonych z wielu włókien optycznych ułożonych obok siebie, zagadnienie wypromieniowywania energii musi być traktowane ostrożniej ze względu na występujące tu przeniki /prześwity/ pomiędzy sygnałami przenoszonymi przez poszczególne włókna. W celu zmniejszenia tych przeników pokrywa się zwykle poszczególne włókna trzecią warstwą silnie pochłaniającą energię optyczną.

Straty zależne od różnicy czasu przebiegu fal o różnych modach, tj. straty wywołane dyspersją falowodową, omówione będą poniżej.

5.4. Jedno i wielomodowy światłowód z włókna optycznego

Na podstawie ujęcia zjawiska propagacji wiązki optycznej w światłowodzie z punktu widzenia optyki geometrycznej powstaje, przy różnych kątach padania promieni na czołową po-

wierzchnię światłowodu, wielodrogowe rozchodzenie się wiązki optycznej. Wywołuje to różnicę czasu przejścia pomiędzy na przykład promieniem rozchodzącym się wzdłuż osi światłowodu a promieniem wchodzącym pod kątem zbliżonym do kąta krytycznego.

Z punktu widzenia teorii Maxwella można dowieść, że grupowa prędkość fali w światłowodzie nie jest wielkością stałą, ale zależy od modu fali. Zjawisko to zwie się dyspersją falowodową. W pewnym stopniu dyspersję wywołuje również sam materiał włókna. Podkreślić należy, że różnego rodzaju nieciągłości włókna i powierzchni rdzeń-okładzina, przypadkowe zmiany współczynnika załamania materiału powodują powstawanie dodatkowych modów w światłowodzie lub konwersję istniejących. Te zjawiska również zwiększają dyspersję światłowodową.

Wskutek zjawiska dyspersji występuje ograniczenie szerokości wstęgi sygnałów informacji, jaką może przenieść światłowód. Dyspersja wywołuje zniekształcenie i rozszerzanie przesyłanych impulsów informacyjnych, zachodzenie jednego impulsu na sąsiednie, a przez to ograniczenie liczby dających się rozróżnić impulsów.

Jak już wiemy, przez ograniczenie średnicy rdzenia światłowodu do wielkości kilku długości fali będzie w światłowodzie rozchodził się tylko mod podstawowy, nie mający krytycznej średnicy, tj. mod HE_{11} . Taki jednomodowy światłowód pozwala na przenoszenie bardzo dużej szerokości wstęgi informacyjnej, zależnej jedynie od dyspersji samego materiału włókna, od szerokości widma źródła promieniowania i od prądowego wprowadzenia tego promieniowania do światłowodu.

Jeśli widmo częstotliwościowe źródła jest dostatecznie wąskie, np. w przypadku lasera gazowego He-Ne lub dobrego lasera półprzewodnikowego, maksymalna pojemność informacyjna światłowodu może dochodzić do 30 Mbit/s na 1 km i jest proporcjonalna do pierwiastka z długości odcinka światłowodu /pomiędzy wzmacniaczami przelotowymi/. Przy zastosowaniu diod luminescencyjnych /LED/ lub superluminescencyjnych /SLD/ maksymalna pojemność może dochodzić do $200 \div 400$ Mbit/s przy $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ /dane te odnoszą się do szkła NG2 firmy Schott/ [36].

Światłowód jednomodowy wykazuje jednak również pewne wady w porównaniu z wielomodowym. Zasilanie światłowodu energią optyczną z małymi stratami jest możliwe wtedy, gdy źródło promieniuje mod podstawowy. Bardzo trudne, ze względu na małe rozmiary przekroju poprzecznego rdzenia, jest sprzężenie lasera z włóknem oraz dopasowanie złącza włókno-włókno. Wymagają one bardzo precyzyjnego wzajemnego ustawienia. Same włókno jest bardzo cienkie i wskutek tego mniej wytrzymałe mechanicznie. Przy ciągnięciu włókna jednomodowego tolerancje mechaniczne muszą być zachowane bardzo ściśle. Ograniczona jest moc promieniowania wprowadzana do włókna ze względu na dopuszczalną gęstość mocy występującą przy tak małym przekroju rdzenia.

Wielomodowe włókno, o średnicy rdzenia kilkudziesięciu i więcej μm , dopuszcza znacznie większe tolerancje mechaniczne. Laser zasilający światłowód lub dioda luminescencyjna mogą pracować wielomodowo i z większą mocą wyjściową. W światłowodzie takim wskutek rozchodzenia się wielu modów występują duże różnice grupowego czasu przebiegu pomiędzy najwyższymi i najniższymi modami, a więc występują zniekształce-

nia przesyłanych sygnałów tym bardziej szkodliwe, im więcej sygnałów przesyłanych jest w jednostce czasu. Ogranicza to maksymalną możliwą pojemność informacyjną takiego światłowodu.

Początkowo sądzono, na podstawie teoretycznych rozważań i pierwszych danych doświadczalnych, że ograniczenie szerokości przesyłanej wstęgi informacji w wielomodowym włóknie optycznym będzie bardzo duże, nie pozwalając na przekroczenie kilku MHz na 1 km długości falowodu. Jednak późniejsze, dokładniej przeprowadzone doświadczenia [34] dały wyniki wielokrotnie lepsze, przekraczające znacznie teoretycznie obliczaną szerokość wstęgi informacyjnej. Tłumaczone to jest, w tym przypadku korzystną, konwersją modów najniższych na wyższe i odwrotnie, co powoduje mniejsze różnice grupowego czasu przejścia pomiędzy poszczególnymi modami od teoretycznie przewidywanych, dając w rezultacie znacznie mniejsze odkształcenia zbczcy narastania i opadania impulsów, tj. rozszerzenie się impulsów.

Przy włóknie wielomodowym ułatwione jest wprowadzanie energii oraz łączenie odcinków włókna, osiągnano straty na takie złącza mniejsze niż 0,1 dB. Gęstość mocy w światłowodzie wielomodowym, wobec znacznie większej od jednomodowego średnicy rdzenia, jest znacznie mniejsza, pozwalając na przesyłanie większych mocy.

Ciekawy przykład rozwiązania złącza pomiędzy laserem półprzewodnikowym a wielomodowym włóknem optycznym, zaproponowany przez firmę Siemens [35], jest pokazany na rys. 17. Dioda laserowa /RCA/ dawała moc wyjściową 1,1 W przy pracy impulsowej z impulsami o szerokości 100 ns i częstotliwości

powtarzania 500 Hz. Aktywna powierzchnia diody wynosiła $2 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$. Włókno optyczne miało średnicę rdzenia $75 \mu\text{m}$, grubość okładziny $3 \mu\text{m}$. Współczynniki załamania odpowiednio $n_1 = 1,62$ i $n_2 = 1,52$ /produkcja firmy Schott Glaswerk/. Pomierzona tłumienność włókna wynosiła około 30 dB/km. Przy bezpośrednim zetknięciu powierzchni aktywnej diody z włóknem, przy możliwie dokładnym odpolerowaniu na płasko tych powierzchni, otrzymano straty mocy na złączu około 4 - 5 dB. Zastosowanie płynu imersyjnego /Zimtaldehyd $n = 1,62$ /, pomiędzy powierzchnie dioda-włókno, przy pewnym ich odstępie, otrzymywano straty na złącze około 0,1 dB.

Przykład ten wskazuje, że trudności złącza dioda-włókno, włókno-włókno i włókno-fotodetektor przy wielomodowych światłowodach z włókna optycznego mogą być stosunkowo łatwo przezwyciężone, podczas gdy przy włóknie jednomodowym zmniejszenie strat na złączach do wartości do tolerowania jest znacznie trudniejsze.

W jednomodowym włóknie optycznym korzystna jest mała różnica współczynników załamania rdzenia i okładziny /np. $n_1/n_2 \cong 1,001$ /, gdyż wówczas, zgodnie z wyrażeniem na krytyczną średnicę włókna jednomodowego, średnica rdzenia może być dość duża, ułatwiając problem złącz.

Do wielomodowych światłowodów należy zaliczyć światłowód z włókna optycznego z płynnym rdzeniem. Badania takich światłowodów przeprowadzono w Australii, USA /Bell-Telephone Lab./ oraz w Anglii. Jako płyn na rdzeń stosowano np. tetrachloroetylen. Płyn powinien wykazywać odpowiedni współczynnik załamania. Włókno z tetrachloroetylenem otrzymywano o tłumienności około 10 dB/km w zakresie fal $1,04 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$ oraz około 20 dB/km w zakresie $0,8 - 1,0 \mu\text{m}$, różnica uzasadniana

jest zbliżaniem się do rezonansowej częstotliwości absorpcji płynu. Te zakresy fal otrzymuje się z laserów półprzewodnikowych GaAs /z odpowiednimi przymieszkami/. Doświadczalne włókno z płynnym rdzeniem miało średnicę rdzenia /wewnętrzną średnicę rurki/ około 50 μm przy 27 μm grubości okładziny. Płyn był wprowadzany pod ciśnieniem 1400 atm. i napełnianie 200 m odcinka trwało około 4 godzin. Światłowód taki, według autorów [28], był stosunkowo łatwy do wykonania i do obciążenia się z nim. Stwierdzono, że wpływ tłumienia okładziny był mały w stosunku do ogólnej wartości tłumienności światłowodu, tak że stosowano w tym przypadku szkło tańsze o dużej stosunkowo tłumienności.

6. ŚWIATŁOWÓD SAMOOGNISKUJĄCY /SELFOC/

Włókno bez rdzenia, ale ze stopniowo zmniejszającym się wzdłuż promienia przekroju /licząc od osi/ współczynnikiem załamania, ma właściwość ogniskowania wiązki promieniowania. W włóknie samoogniskującym, wskutek zaginania się promieni w sposób ciągły w kierunku osi, a po jej przekroczeniu znów w kierunku osi, następuje koncentracja energii wewnątrz współosiowej cylindrycznej przestrzeni w środku włókna. Nie zachodzi tu więc zjawisko pełnego wewnętrznego odbicia jak w włóknie optycznym.

Ważną właściwością propagacji fal w samoogniskującym włóknie jest to, że pomiędzy oddzielnymi promieniami występują bardzo małe przesunięcia fazowe. Następuje więc jakby kompensacja różnic grupowego czasu przebiegu pomiędzy skrajnymi i osiowymi promieniami wiązki promieniowania optycznego roz-

chodzącego się wzdłuż włókna. Jest to bardzo ważne ze względu na szerokość przenoszanej wstęgi informacyjnej.

Przebieg współczynnika załamania wzdłuż promienia r przekroju włókna samoogniskującego powinien być ściśle określony i można go wyrazić zależnością [16]:

$$n / r / = n_0 \left[1 - \frac{A}{2} r^2 + B \frac{A}{2} r^4 \right]$$

gdzie n_0 - współczynnik załamania na osi włókna, A i B - stałe dla danego włókna.

Stałą A określa się z badania przejścia rozkładu Gaussa wiązki przez krótki odcinek włókna, traktowany jako soczewka. Stała B określa odstępstwo rozkładu współczynnika załamania od pożądanego.

Jeśli $B = 0$, to $n / r / = n_0 / 1 - \frac{A}{2} r^2 /$, otrzymujemy zależność paraboliczną zmiany współczynnika załamania, tj. taką jak dla idealnego ośrodka soczewko-podobnego. Przy $B = 0$ mod fali wejściowej dochodzi do czoła wyjściowego włókna bez zniekształceń. Przy $B \neq 0$ zmniejsza się możliwość zachowania wejściowego rozkładu pola i synchronizmu rozchodzenia się modów, powodując obniżenie pojemności informacyjnej światłowodu.

Te właściwości samoogniskującego włókna, tj. możliwość zachowania pierwotnego rozkładu natężenia promieniowania po przejściu przez włókno oraz występujące minimalne przesunięcia fazowe pomiędzy poszczególnymi modami, pozwalają również na przesyłanie jednocześnie wielu wiązek o niezależnej przenoszonej informacji, podobnie jak w światłowodzie z soczewkami szklanymi. Otrzymanie tego przestrzennego zwielokrotnienia wymaga należytego zogniskowania wiązek na wejściową, czo-

łową powierzchnię włókna oraz odpowiedniego rozkładu pola promieniowania laserów.

Straty w włóknie samoogniskującym mogą być teoretycznie mniejsze niż w włóknie optycznym, gdyż nie występują tu straty wskutek niepełnego wewnętrznego odbicia na powierzchni rozdziału rdzeń-okładzina oraz straty na rozproszenie na nierównościach i zanieczyszczeniach na tej powierzchni. W prawidłowo działającym światłowodzie z włókna samoogniskującego promieniowanie rozchodzi się w pobliżu osi włókna nie dochodząc do jego powierzchni, a więc zmniejsza się możliwość strat na wypromieniowywanie.

Według [16], włókno optyczne, tzn. z rdzeniem i okładziną, wykonane z określonego objętościowo szkła, dawało ogólne straty około 0,7 dB/m, z czego około 0,1 dB/m wynosiły straty na rozproszenie, a włókno samoogniskujące wykonane z tego samego szkła wykazywało ogólne straty około 0,5 dB/m, przy stratach na rozproszenie tylko 0,03 dB/m.

Krytyczny kąt aperturowy wejścia promieniowania do włókna samoogniskującego określa się zależnością:

$$\varphi_a = \sqrt{2 n_o \cdot \Delta n}$$

gdzie Δn - wartość zmiany współczynnika załamania wzdłuż promienia przekroju.

Krótkie odcinki włókna SELFOC stanowią soczewki o dużej rozdzielczości. Na przykład według [23], przy przepuszczaniu promieniowania widzialnego przez odcinek włókna o długości 3,34 mm i średnicy włókna 1 mm wykazywał on długość ogniskowej 1,9 mm i stanowił soczewkę o rozdzielczości 450 llnl na mm, przy kącie padania $\text{tg } \varphi = 0,012$. Rozdzielczość ta

zmniejszała się do 280 linii na mm przy $\text{tg } \varphi = 0,217$. Duża rozdzielczość takiej soczewki zależała od utrzymania ściśle parabolicznej zmiany współczynnika załamania, od możliwie dokładnej płaskości powierzchni czołowych oraz od małej wartości aberacji chromatycznej.

Właściwość koncentracji energii optycznej wewnątrz włókna samoogniskującego, bez osiągnięcia powierzchni włókna, jest również cenna w przypadku łączenia włókien w wielokrotne pęczki, gdyż nie występuje obawa zjawiania się większych przestęchów w takim zwielokrotnionym światłowodzie.

Stożkowy odcinek włókna samoogniskującego, w którym stała A będzie wzrastać stopniowo w miarę zmniejszania się przekroju, nie wywołuje zmiany rozkładu pola. Wskutek tej właściwości takie stożkowe odcinki mogą być bardzo użyteczne przy łączeniu włókna z laserem i fotodetekтором.

Przy przejściu promieniowania przez zakrzywione włókno zmienia się rozkład gaussowski promieniowania wprowadzonego. Minimalny dopuszczalny promień krzywizny według [29] określany jest jako:

$$R_{\min} = \frac{2}{A \cdot r_{\max}}$$

gdzie r_{\max} - promień obszaru walcowego wewnątrz włókna, w którym zachodzą zmiany paraboliczne współczynnika załamania. Na przykład dla odcinka włókna o długości 1 m i średnicy włókna $\varnothing = 0,3$ mm, dla $A = 0,5 \text{ mm}^{-2}$ i $r_{\max} = 50 \text{ } \mu\text{m}$, zależność powyższa daje $R_{\min} = 80$ mm, a więc dopuszczalny promień krzywizny włókna samoogniskującego jest bardzo mały. Rozkład modowy nie jest zdeformowany dopóki utrzymuje się zależność:

$$\frac{1}{\sqrt{A} R_{\min}} \ll 1$$

co zwykle ma miejsce dla włókien samoogniskujących.

Zależności te, według [29], potwierdzone zostały doświadczalnie przez pomiar rozkładu pola promieniowania na wejściu i wyjściu z włókna.

Jak wynika z wyżej przedstawionego materiału, włókno samoogniskujące ma wiele zalet. Opracowywaniem takich włókien i ich badaniami zajmują się bardzo intensywnie, w chwili obecnej, w Japonii /Nippon Electric Company i Nippon Sheet Glass Company/ oraz w NRF /f. Siemens i Schott Glaswerk/. Japonia już oferuje 100-metrowe odcinki takiego światłowodu wraz z końcówkami łączącymi odcinki. Tłumienność oferowanego światłowodu jest podawana na około 20-40 dB/km [37].

Obecnie trudno jeszcze ocenić praktyczną konkurencyjność światłowodu SELFOC w porównaniu ze światłowodem z włókna optycznego w zastosowaniu do telekomunikacji. Niewątpliwie ceną jest możliwość wykonywania soczewek wysokiej jakości z odcinków włókna samoogniskującego, jak również elementów stożkowych - mogą one odegrać dużą rolę w zestrojach linii telekomunikacyjnych pracujących na falach optycznych.

7. TECHNOLOGIA WYTWARZANIA WŁÓKNA OPTYCZNEGO

Technologia wytwarzania włókna optycznego z rdzeniem i okładziną dzieli się w sposób naturalny na dwie fazy: przygotowanie bardzo małostratnego wyjściowego, objętościowego materiału na rdzeń i okładzinę o odpowiednich współczynnikach załamania oraz na technologię wyciągania włókna z tego materiału.

Składnikiem podstawowym objętościowego szkła jest obecnie chemicznie czysta krzemionka - SiO_2 z odpowiednimi domieszkami różnymi dla szkła na rdzeń i na okładzinę.

Materiały plastyczne nie znalazły, jak dotychczas, zastosowania ze względu na istnienie w nich dużej liczby pasm pochłaniania, szczególnie w zakresie bliskiej podczerwieni, ważnym z punktu widzenia zakresu promieniowania stosowanych laserów półprzewodnikowych oraz ze względu na gorszą od szkła powierzchnię rozdziału rdzeń-okładzina.

Topiona, bezpostaciowa krzemionka w czystej postaci wykazuje najniższe straty ze wszystkich stałych i płynnych materiałów dotychczas badanych. W stosunku do szkła sodowo-wapniowego, otrzymanego z czystych chemicznie składników i pozbawionego szkodliwych jonów, krzemionka /z określonymi domieszkami np. borem/ wykazuje przewagę jako materiał na światłowody w stosowanym zakresie fal optycznych. Ilustruje to przykładowo rys. 18 [21]. Zwiększenie stratności w pobliżu długości fali $0,95 \mu\text{m}$ wynika z absorpcji trzeciej harmonicznej wibracji rodnika OH, zawartość którego w tym materiale została zmniejszona bardzo znacznie. Dla fal dłuższych od $1 \mu\text{m}$ straty w szkłe początkowo maleją, ale później silnie rosną.

Firma Corning Glass Works /USA/ uzyskała szkło wyjściowe o bardzo małych stratach [32], z którego wykonano wielomodowe włókno optyczne. Rysunek 19 pokazuje przebieg tłumienności takiego włókna w zależności od długości fali. Pokazane na rysunku są również /punktami i kreską/ zakresy fal osiągnane z laserów półprzewodnikowych i z lasera Nd:YAG. Widać, że w zakresie promieniowania laserów GaAlAs uzyskiwano ogólnie

ną tłumienność włókna około 4 dB/km, a sygnalizowane jest dalsze zmniejszenie tej wartości.

Technologia oczyszczania szkła ze szkodliwych domieszek oraz dokładny skład domieszek celowych do SiO_2 nie jest podawana w literaturze technicznej dostępnej autorowi.

Technologia otrzymywania włókna optycznego ze szkła objętościowego wydaje się w swej koncepcji dość prosta. Podawane są [2, 22; 38, 39] dwie metody wyciągania: "pręt w rurze" oraz metoda współosiowych tygli. W pierwszej metodzie pręt, o dużej średnicy w porównaniu do włókna, ze szkła na rdzeń jest wciskany lub też luźno wstawiany do rury ze szkła okładzinowego. Taki koncentryczny zestaw jest podgrzewany w piecu elektrycznym aż do uzyskania odpowiedniej płynności, pozwalającej na formowanie włókna, Szybkość chłodzenia i prędkość rozciągania płynnego szkła w włókno z rdzeniem i okładziną określają wymagany rozmiar jego średnicy. Redukcja średnicy zestaw-włókno jest rzędu 100:1.

W technologii koaksjalno-tyglowej szkło na rdzeń i okładzinę roztapia się w oddzielnych, termoodpornych tyglach z koncentrycznymi otworami u dołu. Rozmiary wzajemne tych otworów warunkują pożądaną stosunek średnic rdzenia i okładziny. Również i tu są ściśle kontrolowane: prędkość przepływu szkła, jego osłabianie oraz prędkość wyciągania włókna. Metoda ta daje, podobno, lepszą powierzchnię rozdziału rdzeń-okładzina, podczas gdy poprzednio omówiona - lepszą tolerancję mechaniczną.

Gładkość powierzchni rozdziału rdzeń-okładzina, brak włączeń cząstek kurzu jest tu czynnikiem decydującym o jakości włókna. Dlatego też proces ciągnięcia włókna odbywa się

w ściśle kontrolowanej i bardzo czystej atmosferze lub w próżni.

Rysunki 20 i 21 [39] ilustrują schematycznie obydwie metody. Kompletne urządzenie do wyciągania włókna z rdzeniem i okładziną, w sposób bardzo uproszczony, przedstawia rys. 22 [39]. Podstawowe części urządzenia to, wyżej opisany, zestaw pieca elektrycznego z materiałami wyjściowymi oraz bęben o dość dużej średnicy do nawijania wyciąganego, gotowego włókna. Oczywiście urządzenie takie zawiera bardzo precyzyjne mechanizmy do kontroli naclągu nici, temperatury, do pomiaru automatycznego średnicy otrzymywanego włókna itp.

Dopuszczalne tolerancje zmian średnicy rdzenia /lub kształtu przekroju włókna/ są bardzo małe ze względów omówionych w rozdz. 5.3. Tolerancje na jednorodność materiału wyjściowego i włókna pod względem spektralnym i współczynników załamania są również bardzo ostre. Na przykład dopuszczalne zmiany współczynnika załamania są podawane jako mniejsze niż 10^{-4} .

Technologia wytwarzania włókna samoogniskującego, o ciągłej zmianie współczynnika załamania wzdłuż promienia przekroju poprzecznego światłowodu nie jest, do chwili obecnej, podawana w dostępnej literaturze technicznej. Wiadomo jedynie, że polega ona na wymianie jonów pomiędzy dwoma kontaktującymi ze sobą warstwami różnego materiału, a współczynnik załamania materiału zależy od liczby jonów zawartych w materiale.

Wytrzymałość włókien światłowodowych na rozciąganie wynosi 150 - 200 kg/mm², tj. przewyższa kilkakrotnie wytrzymałość włókna lnianego o odpowiedniej średnicy i około 10-krotnie jedwabnego. Również wytrzymałość na zginanie jest bar-

dzo duża. Ta wytrzymałość pojedynczych włókien, a tym bardziej wielokrotnych wiązek tych włókien łączonych we wspólnym kablu, zwykle wzmocnianym jeszcze zewnętrzną powłoką, będzie stanowił, przy małej stosunkowo średnicy takiego kabla, dużą zaletę w przypadku przyszłej wymiany konwencjonalnych kabli telekomunikacyjnych na światłowód, wobec ograniczonej zwykle pojemności kanalizacji kablowej.

8. STOSOWANE W ŚWIATŁOWODACH ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA I FOTODETEKTORY ORAZ OGÓLNY UKŁAD WIELOKANAŁOWEJ LINII ŚWIATŁOWODOWEJ DALEKIEGO ZASIĘGU

Generatory promieniowania optycznego przeznaczone do pracy z światłowodem z włókna optycznego lub z włókna samoogniskującego powinny być niezawodne w pracy, pozwalać na sprzężenie z włóknem z możliwie małymi stratami, zapewniać pracę ciągłą lub impulsową /ze stabilizacją szerokości i odstępu pomiędzy impulsami/ w pokojowej temperaturze oraz powinny być stosunkowo niekosztowne.

Potrzebna moc promieniowania dla światłowodów mierzy się miliwatami.

Do niedawna uważano, że w celu uzyskania prawidłowej pracy światłowodu konieczne jest promieniowanie o możliwie dużej spójności, jakie mogą dać lasery. Jednak doświadczalnie stwierdzono, że w przypadku wielomodowej pracy światłowodu, o zmniejszonej w stosunku do pracy jednomodowej szerokości przekazywanej wstęgi sygnałów, mogą być przydatne również diody luminescencyjne, generujące spontanicznie wzbudzone promieniowanie wielomodowe i niespójne.

Ze względu na potrzebę dostosowania źródeł promieniowania do zakresu małych strat we włóknie optycznym powinny one pracować w zakresie fal od 0,75 do 1,1 μm . Powinny również mieć małe rozmiary przekroju poprzecznego promieniowanej wiązki ze względu na wprowadzenie energii do włókna światłowodowego z możliwie małymi stratami.

W chwili obecnej preferowane do pracy z światłowodami z włókna szklanego są cztery źródła promieniowania: półprzewodnikowe diody luminescencyjne /skrót angielski LED/, diody superluminescencyjne /SLD/, diody laserowe oraz zminiaturyzowany laser, którego stymulowana emisja jest wzbudzana w kryształce granatu itrowo-aluminiowego z domieszką neodymu /skrót Nd:YAG/, przy czym wzbudzenie optyczne odbywać się tu może poprzez promieniowanie diod luminescencyjnych.

Diody luminescencyjne, których materiałem czynnym są warstwy p - n arsenku galu /GaAs/, dają promieniowanie spontaniczne o długości fali $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$. Mogą one pracować impulsowo, ale lepiej się nadają do pracy ciągłej. Modulację promieniowania osiąga się przez bezpośrednią zmianę prądu wzbudzenia /pompowania/, tj. przez zmianę napięcia stałego przyłożonego do warstwy p - n diody.

Ostatnio wykonane diody luminescencyjne dawały gęstość mocy 20 - 35 $\text{W}/\text{sr}/\text{cm}^2$ przy 300 mA prądu wzbudzającego [40]. Przez różne ilościowo domieszkowanie aluminium /AlGaAs/ można otrzymać promieniowanie w zakresie od 0,75 do 0,9 μm . Diody o podwójnej heterostrukturze pozwalają na wypromienioną gęstość mocy do 100 $\text{W}/\text{sr}/\text{cm}^2$ przy prądzie wzbudzającym około 150 mA. Powierzchnia czynna diod luminescencyjnych jest rzędu $3 \cdot 10^{-4}$ do $7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$, a przy heterostrukturnych jesz-

cze mniejsza. Pozwala to na wprowadzenie około 2 mW mocy promieniowania do włókna.

Wielką zaletą diod luminescencyjnych jest duża trwałość około 10.000 godzin pracy. Sprzężenie z włóknem osiąga się przez bezpośrednie zetknięcie powierzchni diody z czołową powierzchnią włókna /lub w sposób opisany w rozdz. 5.4/. Charakterystyka modulacyjna jest prawie linearna i osiągnana jest szerokość pasma modulacyjnego do kilkuset MHz.

Diody superluminescencyjne wykorzystują zarówno emisję spontaniczną jak i stymulowaną przez zastosowanie pojedynczej powierzchni zwierciadlanej warstwy czynnej, dzięki czemu osiąga się bardziej spójne promieniowanie, tj. promieniowane są fale o modach niższego rzędu. Szerokość widma spektralnego promieniowania diod superluminescencyjnych jest mniejsza od występującego w diodach luminescencyjnych, a więc osiąga się mniejsze straty na dyspersję w światłowodach. Wymagają one jednak stosunkowo dużego prądu wzbudzenia. Według [40] w podwójnie heterostrukтурalnych diodach luminescencyjnych osiągnano, przy mocy zasilania 3 - 5 W, moc wyjściową promieniowania optycznego około 50 mW z szerokością widma spektralnego około 50 Å.

Półprzewodnikowy dyfuzyjny laser stanowi źródło spójnego promieniowania optycznego, nadające się do zasilania wielomodowego i jednomodowego światłowodu z włókna szklanego. Stymulowaną emisję otrzymuje się, w odróżnieniu od diody luminescencyjnej, przez stworzenie wnęki rezonansowej z dwiema ściankami zwierciadlanymi. Podobnie jak w diodach luminescencyjnych, oparte są te lasery na półprzewodnikowej warstwie GaAs / $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ / i na AlGaAs /również GaAsP/ z możliwością otrzymywania promieniowania w zakresie długości

fali od 0,75 do 0,9 μm . Modulację uzyskuje się również przez zmianę prądu wzbudzenia, tj. przepływającego przez warstwę p - n prądu stałego. Osiągnano szerokość wstęgi modulacyjnej do 1 GHz. Możliwe jest osiągnięcie znacznie większej szerokości wstęgi, ale przez zastosowanie zewnętrznego, elektrooptycznego modulatora. Uzyskiwano przy jednomodowej ciągłej pracy moc wyjściową promieniowania około 10 mW przy mocy zasilania 0,2-0,5 W i szerokości spektralnego widma około 20 Å przy temperaturze pokojowej [40].

Poważnym zagadnieniem jest niezawodność pracy laserów półprzewodnikowych - następuje stopniowa lub nagła degradacja parametrów w stosunkowo krótkim czasie. Przyczyny tego zjawiska są intensywnie badane. Ostatnio donoszą o osiągnięciu już około 2.000 godzin pracy ciągłej w temperaturze pokojowej [22, 40].

Laser z granatem itrowo-aluminiowym, domieszkowanym neodymem Nd:YAG daje długość promieniowanej /fali $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$. Większa długość fali, w stosunku do laserów AlGaAs, jest dogodniejsza z punktu widzenia strat w włóknie. Spektralną szerokość widma emisji osiągnano około 1 Å, a więc węższą od uzyskiwanej w laserach półprzewodnikowych, dając w rezultacie mniejszą dyspersję w materiale włókna. Stosunkowo łatwo można osiągnąć pojedynczomodowe i jednoczęstotliwościowe promieniowanie wyjściowe.

Poważną trudność stanowi konieczność optycznego wzbudzenia lasera Nd:YAG, tj. zewnętrznym źródłem światła, np. lampą tungstenową. Czynione są wysiłki, z dobrym rezultatem, wzbudzania lasera diodami luminescencyjnymi, co pozwala na znaczne zmniejszenie mocy zasilania, gabarytów urządzenia o-

raz nie wymaga chłodzenia wodnego. Na przykład wzbudzano laser zespołem 64 diod luminescencyjnych GaAsP z mocą zasilania 30 W i wyjściową mocą promieniowania lasera 1,4 mW [40]. W próbach jest laser zminiaturyzowany z prętym Nd:YAG o średnicy 0,45 mm i długości 5 mm, wzbudzany tylko jedną diodą luminescencyjną.

Modulacja w tych laserach może być tylko poprzez zewnętrzny modulator elektrooptyczny. Osiągano szerokość wstęgi modulacyjnej do 1 GHz.

Fotodetektory przeznaczone do pracy w liniach światłowodowych powinny spełniać trzy podstawowe wymagania:

- 1/ wysoka czułość przy długościach fal emitowanych przez wyżej opisane źródła promieniowania, a więc w zakresie od 0,75 do 1,06 μm ,
- 2/ reagowanie na sygnały przesyłanej informacji w zakresie szerokiej wstęgi częstotliwości,
- 3/ minimalne wprowadzanie szumu przez fotodetektor.

Niezależnie od ww. głównych parametrów wymagane są małe rozmiary fotoczułej powierzchni, współmierne z rozmiarami przekroju poprzecznego światłowodu z włókna szklanego w celu otrzymania wysokosprawnego sprzężenia fotodetektora z włóknem. Pożądana jest praca w temperaturze pokojowej, gdyż stosowanie urządzeń oziębiających bardzo utrudnia eksploatację.

Teoretycznie możliwe jest stosowanie zarówno bezpośredniej, jak i heterodynowej detekcji. Przy bezpośredniej detekcji wyjściowy prąd z fotodetektora jest liniową funkcją mocy promieniowania padającego na powierzchnię fotoczułą. W heterodynowej detekcji przychodzące promieniowanie optyczne jest

mieszane w fotodetektorze z promieniowaniem o zbliżonej częstotliwości lokalnego lasera, tj. znajdującego się w punkcie odbiorczym. Po stosunkowo łatwym wzmocnieniu sygnałów z fotodetektora o różnicowej częstotliwości wydziela się potrzebne sygnały informacyjne. System ten wymaga pracy jednomodowej i o stabilizowanej częstotliwości zarówno lasera nadawczego, jak i lokalnego. Jest to kłopotliwe i dlatego powszechnie stosowana w liniach doświadczalnych jest detekcja bezpośrednia.

Fotopowielacze, pracujące w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni, są urządzeniami bardzo czułymi i dającymi duże napięcie wyjściowe o dużym stosunku sygnału użytecznego do szumu. Są one jednak w zastosowaniu do włókna szklanego zbyt duże rozmiarami i wymagają wysokiego napięcia zasilającego i dlatego rzadko są stosowane jako detektory w doświadczalnych liniach światłowodowych. Przeważnie stosowane tu są fotodiody półprzewodnikowe, spełniające w zasadzie wymagania wyżej wymienione.

Końcowy wynik systemu łączności światłowodowej zależy od fluktuacji szumów w przychodzącym do fotodetektora sygnale, od szumów powstających w samym fotodetektorze, tj. towarzyszących procesowi detekcji, oraz od szumów cieplnych powodowanych przez wzmacniacze prądu zdetektowanego.

Podstawowym źródłem szumów w fotodiodach /nie lawinowych/ jest szum kwantowy, powstający z fluktuacji optycznych wzbudzeń nośników przy absorpcji fotonów w obszarze złącza p - n półprzewodnika. Przy tych fotodiodach, wskutek potrzeby dość dużego wzmocnienia prądu już zdetektowanego, istotny staje się szum cieplny, mający swe źródło we wzmacniaczach elektro-

nowych. Szum powstający w fotodiodach z powodu istnienia prądu ciemnego, tj. generowanego bez oświetlenia fotoczułej powierzchni, jest na ogół niewielki.

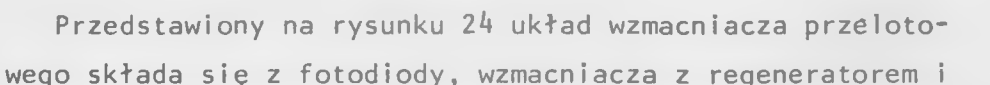
Materiały czynne na fotodiody to przeważnie znów arsenek galu GaAs, krzemionka SiO_2 oraz german Ge. Materiały te pokrywają zakres fal od 0,4 do 1,6 μm . Dla bliskiej podczerwieni do 0,9 μm najlepszym materiałem z punktu widzenia sprawności energetycznej i szerokości wstęgi częstotliwościowej reagowania uważana jest SiO_2 [40].

Lawinowe fotodiody łączą w sobie zjawisko detekcji fal optycznych ze wzmocnieniem wewnętrznym fotoprądu. Oprócz szumu kwantowego występuje tu dodatkowo szum wskutek fluktuacji, statystycznej natury, procesu wzmocnienia lawinowego. Zmniejsza się za to szum cieplny wzmocnienia po fotodetekcji. Szum na skutek prądu ciemnego jest nieco większy niż w przypadku zwykłych fotodiod. Ogólnie, w obecnym stanie osiągniętych parametrów, diody lawinowe wykazują większy poziom szumów własnych i dlatego nadają się szczególnie do systemów modulacji kodowo-impulsowej. Germanowe diody lawinowe wykazują nieco mniejszą sprawność energetyczną od krzemowych, pokrywają one zakres fal od 0,6 do 1,6 μm [40]. Diody lawinowe wymagają większego /kilkuset woltów/ napięcia zasilania w stosunku do fotodiod zwykłych. Korzyści z zastosowania diod lawinowych zamiast zwykłych, biorąc pod uwagę większy koszt lawinowych, jest w chwili obecnej dyskusyjny i zależny od konkretnego systemu pracy światłowodu.

Układ linii światłowodowej z włókna optycznego lub samogniskującego, w sposób bardzo ogólny, przedstawia rys. 23.

Linia światłowodowa składa się ze źródła promieniowania:

diody luminescencyjnej, lasera półprzewodnikowego lub Nd:YAG, modulowanych szerokostęgowymi sygnałami informacyjnymi, z elementu sprzęgającego źródło promieniowania z włóknem szklanym, z toru światłowodowego ze wzmacniaczami przelotowymi, z elementu sprzęgającego światłowód z fotodiodą, z szerokostęgowego wzmacniacza zdetektowanego prądu oraz urządzeń zwielokrotniających na początku i końcu linii. Urządzenia zasilające zostały na rys. 23 pominięte.

W przypadku telefonii, telegrafii lub wzajemnego przesyłania danych cyfrowych linia światłowodowa jest zdublowana, aby zapewnić przesyłanie sygnałów w obydwóch kierunkach. Tor światłowodowy może być pojedynczy lub składać się z wielu, do kilkuset i więcej włókien w jednym pęczku /kabl/.


Przedstawiony na rysunku 24 układ wzmacniacza przelotowego składa się z fotodiody, wzmacniacza z regeneratorem i lasera półprzewodnikowego lub diody luminescencyjnej wraz z odpowiednimi elementami sprzęgającymi. W tym przypadku przychodzące modulowane promieniowanie podlega demodulacji, wzmocnieniu i regeneracji impulsów oraz powtórnej modulacji źródła promieniowania. Czynione są wysiłki w celu opracowania urządzenia pozwalającego na bezpośrednie wzmocnienie modulowanego promieniowania optycznego.

Po zapoznaniu się z mechanizmem rozchodzenia się promieniowania optycznego w światłowodach oraz krótkim przeglądem stosowanych źródeł promieniowania i fotodetektorów możemy przyjąć, że długość odcinka trasy światłowodu pomiędzy źródłem promieniowania i pierwszym wzmacniaczem przelotowym, pomiędzy wzmacniaczami przelotowymi oraz ostatnim wzmacniaczem i fotodetektorem jest limitowana przez szereg czynni-

ków. Są to: moc źródła promieniowania, o odpowiedniej dla danego światłowodu długości fali, którą można wprowadzić do światłowodu, sprawność tego wprowadzenia do włókna, tłumienność samego światłowodu, czułość detektora i szum wprowadzany przez detektor i wzmacniacze po nim oraz wymagana częstotliwościowa szerokość wstęgi sygnałów informacyjnych przenoszonych przez światłowód. Z kolei ta szerokość wstęgi informacyjnej zależy będzie od szerokości widma spektralnego źródła promieniowania /a więc od dyspersji materiału światłowodu/, od stopnia spójności i rozkładu natężenia promieniowania źródła w przekroju poprzecznym, od ilości modów rozcho- dzących się w światłowodzie /czyli dyspersji światłowodowej/, od systemu modulacji i osiąganey szerokości wstęgi modula- cyjnej oraz od zakresu częstotliwościowego reagowania foto- detektora.

Przy dzisiejszym stanie techniki laserów, fotodiod i elek- tronowych wzmacniaczy szerokostęgowych można przyjąć, że wzmacniacze przelotowe mogą dać wzmocnienie około 40-45 dB przy wymaganym stosunku sygnału użytecznego do szumu. Przyj- mując z kolei osiąganą tłumienność włókna światłowodowego od 10 do 4 dB/km otrzymamy odległość pomiędzy odcinkami li- nii światłowodowej od 4 do 10 km, a więc większą od osiąga- nej dla współosiowego kabla o dużej pojemności informacyj- nej. Zakładana wielkość przepływu informacji dla światłowo- du jednomodowego może wynosić około 480 Mbit/s, dla wielo- modowego około 120 Mbit/s [22, 23].

Powyższe kalkulacje oparte są na częściowych wynikach doświadczalnych, gdyż jak dotychczas brak jest danych, przy- najmniej w dostępnej autorowi literaturze technicznej, o wy-

nikach próbnej eksploatacji długodystansowego światłowodu telekomunikacyjnego, pracującego w ciągu dłuższego okresu czasu.

9. WNIOSKI KOŃCOWE

Okres czasu od opracowania małostatnego optycznego włókna szklanego do chwili obecnej można określić jako ostatni, poważniejszy etap przygotowawczy do prób eksploatacyjnych światłowodowych systemów telekomunikacyjnych.

Dużą rolę w niedalekiej przyszłości mogą jeszcze odegrać scalone obwody optyczne, będące obecnie przedmiotem szerokich prac badawczych prowadzonych przez kilka krajów. Optyczne obwody scalone, obejmujące układy nadawcze, wzmacniacze przelotowe i układy odbiorcze mogą wykazać w zastosowaniu do światłowodów wiele korzystnych własności, dotyczy to szczególnie miniaturyzacji podzespołów i zwiększonej niezawodności.

Najważniejszym czynnikiem możliwości szerszego wprowadzenia światłowodów do transmisji telekomunikacyjnej, zarówno długo jak i średniodystansowej, będzie ekonomiczność systemu - jego konkurencyjność w stosunku do istniejących systemów o dużej przepustowości informacyjnej, a więc kabli współosiowych i falowodów, pracujących na falach milimetrowych.

Na dokładniejszą analizę ekonomiczną jest jeszcze za wcześnie ze względów omówionych wyżej. Niemniej jednak korzystne będzie podanie tabeli 1, opracowanej przez H. Larsena [23], a stanowiącej próbę porównań ekonomicznych światłowodu z kablem współosiowym, falowodem i linią radiową. Założo-

no tu, że światłowód składa się z 300 włókien optycznych pracujących jednomodowo, zawartych w jednym kablu. Jako system modulacji przyjęto PCM. Zarówno liczba kanałów telefonicznych na jedno włókno jednomodowe jak i odległość pomiędzy wzmacniaczami, w świetle ostatnich osiągnięć stratności światłowodów należy uważać raczej za zaniżone.

Z powyższych tabeli można wysunąć wnioski o dużych zaletach światłowodów w porównaniu z innymi systemami transmisyjnymi w zastosowaniu do długodystansowej, szerokostęgowej łączności, a należy jeszcze uwzględnić inne korzystne cechy światłowodów, jak: bardzo małe rozmiary poprzeczne, duża giętkość mechaniczna nawet wielożyłowych światłowodów, możliwości tworzenia bardzo dużych pęczków włókien przy małych zakłóceniach wzajemnych /przy przesyłaniu przez nie różnych informacji/, brak praktycznie wpływu pól elektrycznych i magnetycznych itp.

Do istotnych zalet światłowodu dojść powinna taniość materiału wyjściowego, przy założeniu, że opanowana będzie stosunkowo niedroga technologia oczyszczania szkła.

Słuszne jest zapewne przewidywanie, że światłowód będzie miał zastosowanie nie tylko w liniach długodystansowych o bardzo dużym przepływie informacji, ale może jeszcze szersze w sieciach rozdzielczych, w ośrodkach gęsto zaludnionych, np. w przyszłościowej, integralnie pojętej, telewizji przewodowej, tj. w systemie dostarczającym do abonentów dużą liczbę programów radiofonicznych i telewizyjnych, z możliwością powtarzania w dowolnym czasie wybranego odcinka programu /z zapisu magnetycznego/. Sieć taka przeznaczona byłaby również do przesyłania wielu innych informacji, jak: telefon, telefonowizja, transmisja danych i inne, wraz z możliwością dwu-

Tabela 1

Ośrodek transmisyjny	Średnica	Zakres częstotliwości	Liczba kanałów telefonicz.	Liczba elementów nośnych	Ogólna średnica zewnętrz.	Liczba obwodów rozmównoterlefon.	Odstęp między wzmacniającami przelotowymi
1	2	3	4	5	6	7	8
Kabel współosiowy	10 mm	60 MHz	10.800	20	76 mm	108.000	1,6 km
Linia radiowa	-	60000 MHz	2.700 na kanał radiowy	8 kanałów	-	10.800	50 km
Falowod	70 mm	20-100 GHz	4.000 na nośną	65 nośnych dla każdego kierunku	78 mm	260.000	30 km
Światłowod z włókna optycznego	0,1 mm	$3 \cdot 10^{14}$ MHz	14.000 na jedno włókno	300 włókien	6 mm	$2,1 \cdot 10^6$	2 km

stronnego przesyłania niektórych informacji. Światłowód może odegrać również dominującą rolę w połączeniach pomiędzy dużymi ośrodkami przetwarzania danych, w przypadku połączeń ośrodków tworzenia programów telewizyjnych w zlokalizowanym na dużym obszarze centrum telewizyjnym itp.

Nie są tu omawiane możliwości zastosowań włókna szklanego do przekazywania obrazów telewizyjnych za pośrednictwem dużego pęczka włókien optycznych lub samoogniskujących, bez potrzeby analizy obrazu stosowanej dotychczas w telewizji.

Ostateczna ocena ekonomiczności i określenie zastosowań światłowodów będą mogły być dokonane po dopracowaniu szeregu podzespołów linii światłowodowej oraz po przeprowadzeniu długotrwałych próbnych eksploatacji tych linii w różnych warunkach terenowych. Dla przykładu brak jest jeszcze bardzo istotnych danych doświadczalnych dotyczących zachowania się samego włókna szklanego w ciągu kilkuletniego okresu pracy w warunkach terenowych, tj. wpływu na szklany materiał światłowodowy wilgotności, oddziaływania chemicznego gleby oraz wpływów atmosferycznych. Nie dopracowane jest jeszcze zagadnienie długotrwałości pracy diod laserowych w pokojowej temperaturze, bez znaczniejszych zmian parametrów. Problemem do rozwiązania są wzmacniacze przelotowe o bezpośrednim wzmocnieniu zmodulowanej energii optycznej. Istnieje jeszcze zagadnienie zmniejszenia szumów mających swe źródło w fotodiodach, poszerzenie wstęgi częstotliwościowej sygnałów z diod laserowych poprzez modulację bezpośrednią prądem wzbudzenia, opracowanie małosratnych złączy włókno-włókno, w szczególności przy zwielokrotnionym światłowodzie oraz szereg innych zagadnień, znaczenie których uwydatni się podczas długotrwałych doświadczeń z liniami światłowodowymi.

Również wymaga rozwiązania dogodny system zasilania wzmacniaczy przelotowych w linii światłowodowej.

Trudność stanowi również stabilizacja impulsowej pracy diody laserowej i luminescencyjnej, umożliwiającej bezpośrednio pracę w systemie PCM.

Najważniejszy i najtrudniejszy problem wytwarzania bardzo małego włókna światłowodowego został już praktycznie rozwiązany, trudności wyliczone powyżej będą na pewno wkrótce opanowane. Wynika to z dużego potencjału badań poświęconych tym zagadnieniom przez najpoważniejsze firmy i instytucje w najbardziej rozwiniętych technicznie krajach. Nie będzie przesadą przewidywanie, że możemy w krótkim czasie oczekiwać rewolucyjnych zmian w telekomunikacji, jakich może dokonać szeroko zastosowany światłowód z włókna szklanego.

10. WYKAZ LITERATURY

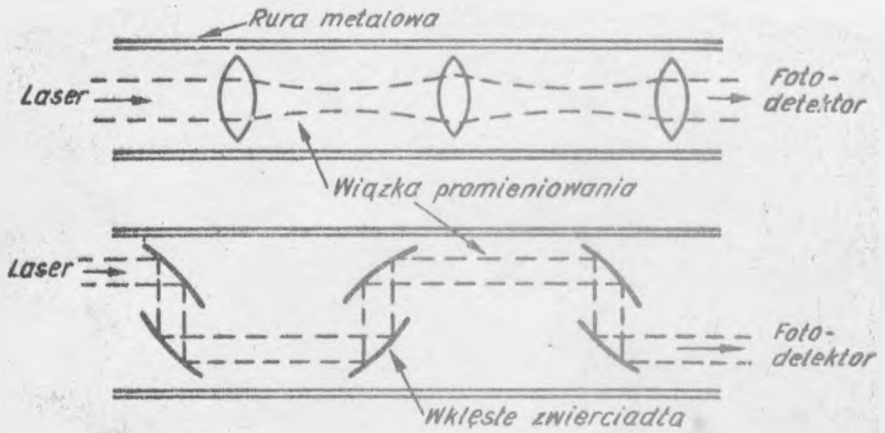
1. V. V. Voznyj: Dielektričeskie volnovody. Moskva: Sovetskoe Radio 1970.
2. Berkovskij B., Myrtynenko O., Žylkin A., Poročov O.: Tepło-gidrodinamičeskie svietovody. Mińsk: Nauka i Technika 1969.
3. Kučkin L.: Svetovody. Moskva: Energijs 1973.
4. Marcatili E., Schmelzer R.: Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. P.2, Bell System Tech. J. 1964 t. 43 nr 4, s. 1783-1809.

5. Gloge D.: Experiments with an underground lens waveguide. Bell System Tech. J. 1967 t. 43 nr 4, s. 721-735.
6. Miller S., Tillotson L.: Optical transmission research. Proc. IEEE 1966 t. 54 nr 10, s. 1300-1311.
7. Miller S.: Directional control in light wave guidance. P.2. Bell System Tech. J. 1964 t. 43 nr 4, s. 1727.
8. Gloge D.: Crosstalk in multiple-beam waveguides. Bell System Tech. J. 1970 t. 49 nr 1, s. 55-71.
9. Miller S.: Optical communications research progress. Science 1970 t. 170 nr 3979, s. 685-695. Tłumaczenie w Ekspr. Inf. - Kvant. Radiot. 1971 nr 33.
10. Marcuse D., Miller S.: Analysis of a tubular gas lens. P.2. Bell System Tech. J. 1964 t. 43 nr 4, s. 1759-1782.
11. Kaiser P.: An improved thermal gas lens for optical beam waveguides. Bell System Tech. J. 1970 t. 49 nr 1, s. 137-153.
12. Berreman D.: A lens of light guide using convectively distorted thermal gradients in gases. P.1. Bell System Tech. J. 1964 t. 43 nr 4, s. 1469-1475.
13. Kao K., Hockham G.: Dielectric - fibre surface waveguides for optical frequencies. Proc. IEEE 1966 t. 113 nr 7, s. 1151-1158.
14. Tingye Li, Marcatili E.: Research on optical-fibre transmission. Bell Lab. Rec. 1971 t. 49 nr 11, s. 331-337.
15. Pearson D., French W.: Low-loss glass fibres for optical transmission. Bell Lab. Rec. 1972 t. 50 nr 4, s. 103-109.

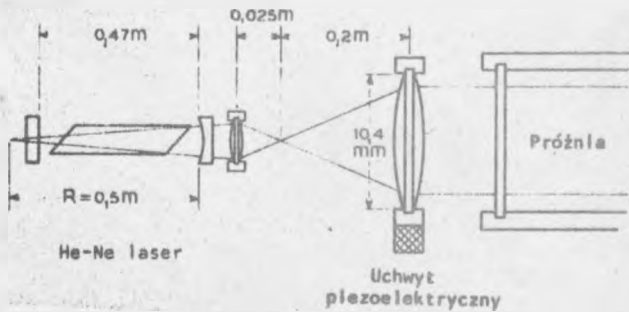
16. Błoch K., Novgorodceva L.: Optičeskie charakteristiki volokon i volokonnyh elementov. W: Optičeskie volokna i volokonnye elementy. Moskva: Chimija 1972, s. 72-114.
17. Błoch K., Biełanov A.: Volnovodnye svojstva optičeskich volokon i volokonnyh elementov. W: Optičeskie volokna i volokonnye elementy. Moskva: Chimija 1972, s. 155-178.
18. Snitzer E.: Tipy voln v cylindričeskom dielektričeskom volnovode. W: Optičeskie volokna i volokonnye elementy. Moskva: Chimija 1972, s. 178-195.
19. Snitzer E., Ostenberg K.: Tipy voln dielektričeskogo volnovoda nabljudajemye v vidimoj časti spektra. W: Optičeskie volokna i volokonnye elementy. Moskva: Chimija 1972, s. 195-209.
20. Kapani H., Burke J.: Volnovodnye javlenija. W: Optičeskie volokna i volokonnye elementy. Moskva: Chimija 1972, s. 209-224.
21. Marcuse D.: Optical fibres for communications. Radio electron. Eng. 1973 t. 43 nr 1, s. 655-664.
22. Sandbank C.: The challenge of fibre-optical communications systems. Radio electron. Eng. 1973 t. 43, nr 1, s. 665-674.
23. Larsen H.: Lichtkabel und ihre Anwendung zur Übertragung von Nachrichten. Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte 1972 t. 1 nr 1.
24. Kao K., Dyott R., Snyder A.: Design and analysis of an optical fibre waveguide for communications. W: Confe-

- rence on trunk telecommunications by guided waves. London: IEE 1970, s. 211-218.
25. Heyke H.: Optical pulse transmission in cladde fibres with imperfections. W: Conference on trunk telecommunications by guided waves. London: IEE 1970, s.73-76.
 26. Gloge D.: Optical waveguide transmission. Proc. IEEE 1970 t. 58 nr 10, s. 1513-1522.
 27. Goering D.: Fiber optic-now! Radio Electron. 1972 vol.43 nr 8, s. 33-37.
 28. Payne D., Gambling W.: New low-loss liquid - core fibre waveguide. Electron. Letters 1972 t. 8 nr 15, s.374-376.
 29. Uchida T. i in.: Optical characteristics of a light - focusing fiber guide and its applications. IEEE J. Quantum Electron. 1970 t. QE-6 nr 10, s. 606-611.
 30. Gambling W.: Glass fibres for communication show promise. Electron. - Power 1972 nr 12, s. 246-248.
 31. Glass guide loss is cut to 4 dB/km. Electronics, 1972 vol. 45 nr 19, s. 30.
 32. Nippon to offer laser optical cable. Teleclippings 1973 nr 297.
 33. Geckeler S., Schicketanz D., Zeidler G.: Nachrichtenübertragung mit Multimode - Glasfasern. NTZ 1973 t. 26 nr 1, s. 30-32.
 34. Schicketanz D., Schubert J.: Einkoppelverluste zwischen zylindrischen Multimodefasern und Laserdioden. Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte 1972 t.1 nr 4, s.329-331.

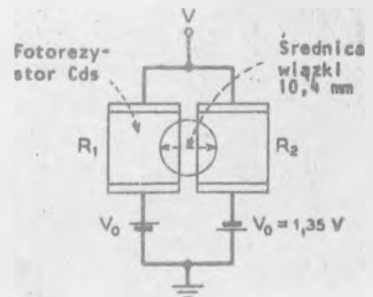
35. Timmermann C.: Material dispersion in optical glass fibres. Arch. Elektron. Übertragungstech. 1974 t. 28 nr 3, s. 144.
36. Daisuke Kato: Fused - silica - core glass fiber as a low-loss optical waveguide. Appl. Phys. Lett. 1973 t. 22 nr 1, s. 3-4.
37. Hicks J., Keritsi P.: Formowanie włókna optycznego. /Patent USA 3146082/ oraz Kapani H., Kapellaro D.: Aparatura do wyciągania włókna. W: Optyczne włókna i włókonne elementy. Moskwa: Chimija 1972, s. 38-50.
38. Saito S.: Telekomunikacja na falach optycznych w Japonii. Tłum. z j.ang. W. Cetner. Prz. Telekom. Lit. Zagr. 1973 nr 34, s. 194-207. Tyt. oryg.: Optical communications in Japan. IEEE Trans. Commun. 1972 t. COM-20 nr 4, s. 725-730.
39. Miller S., Marcatili E., Tingue Li: Research toward optical-fiber transmission systems. Proc. IEEE 1973 t. 61 nr 12, s. 1703-1751.



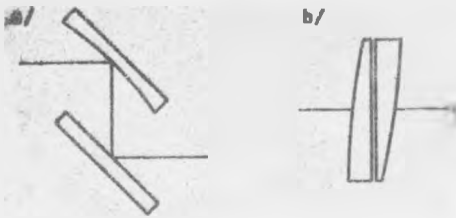
Rys. 1. Soczewkowy i zwierciadlany światłowód



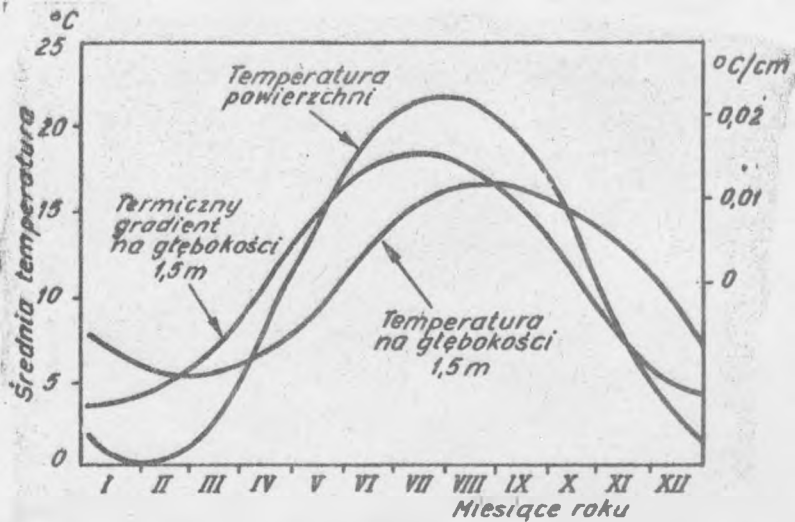
Rys. 2. Układ wprowadzenia promieniowania do światłowodu



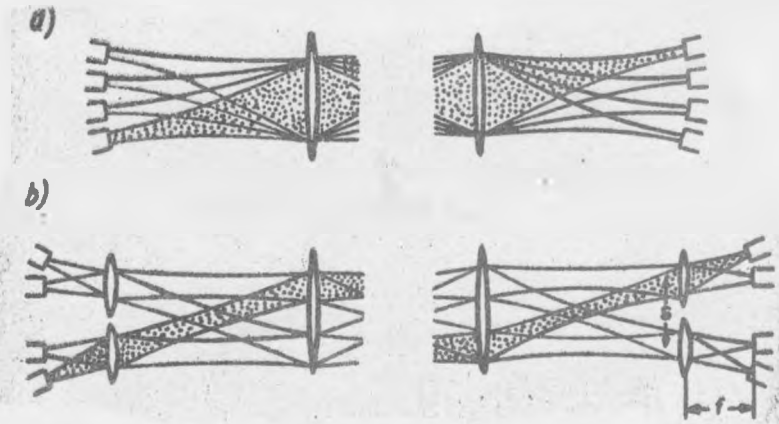
Rys. 3. Czujnik położenia wiązki



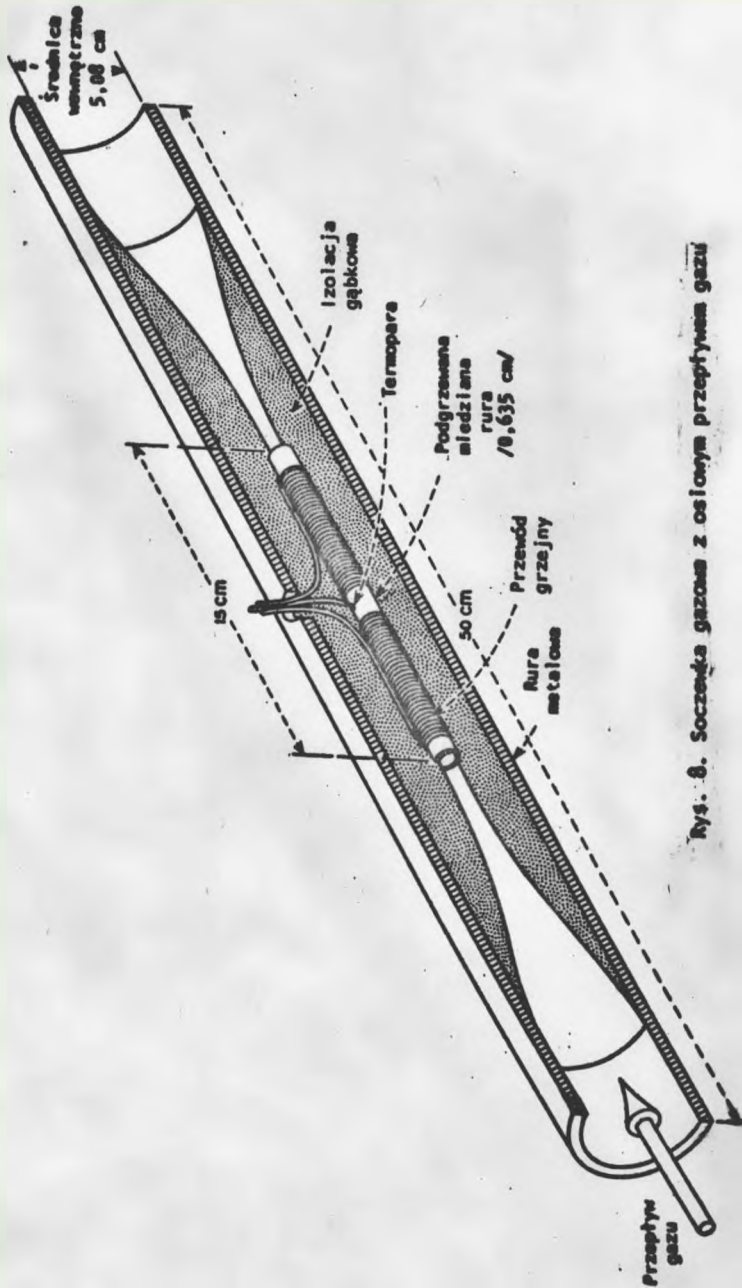
Rys. 4. Układy automatycznej regulacji położenia wiązek



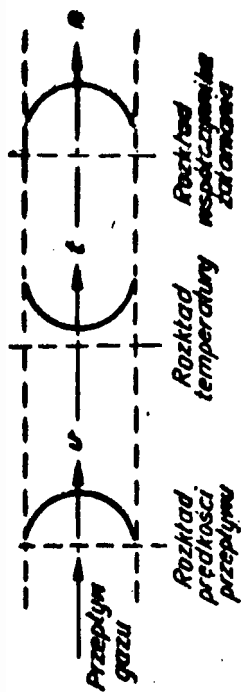
Rys. 5. Przebieg uśrednionych zmian temperaturowych na powierzchni ziemi, na głębokości 1,5 m i w światłowodzie



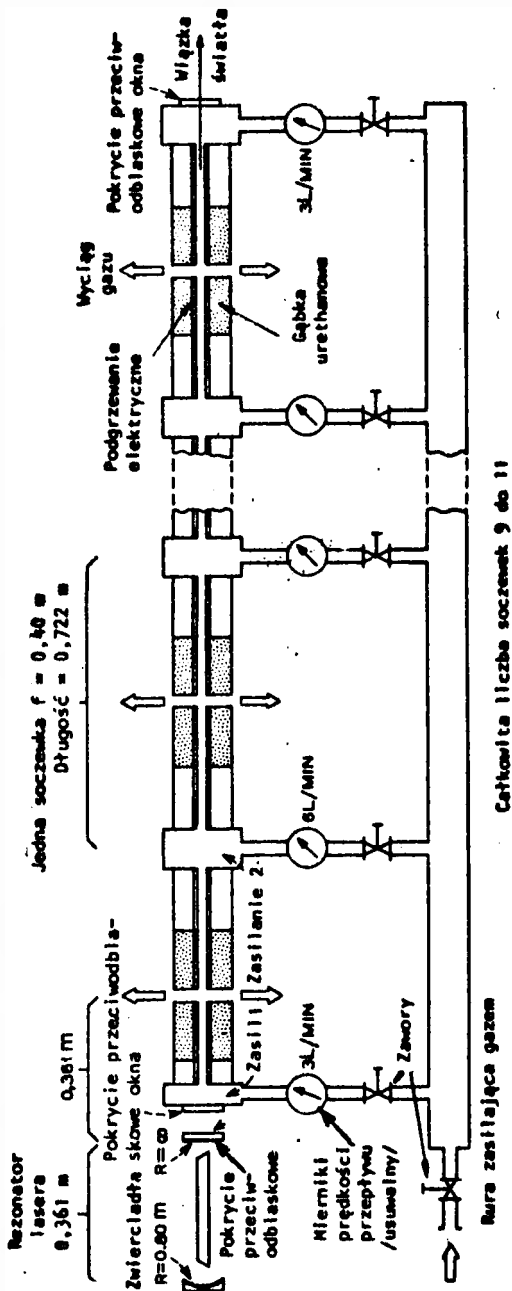
Rys. 6. Przestrzenne uwielokrotnienie wiązek promieniowania: a/ równomiernie b/ systemem grupowania źródeł promieniowania i odbiorników



Rys. 8. Soczewka gazowa z osiowym przepływem gazu

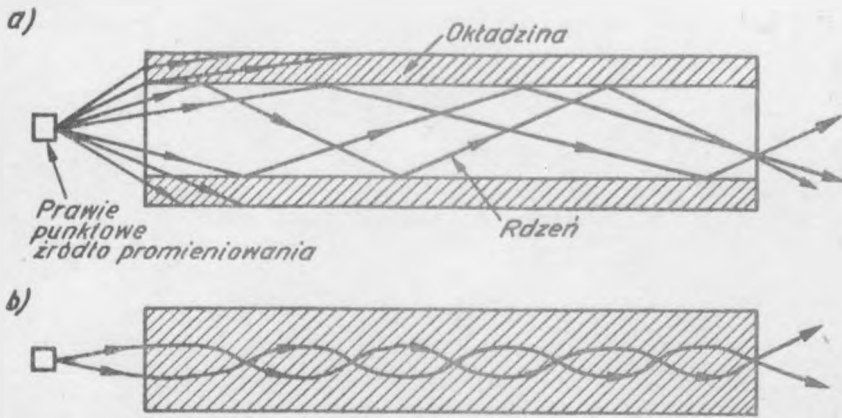


Rys. 7. Wykresy rozkładu prędkości przepływu gazu, jego temperatury i współczynnika załamania w soczewce gazowej

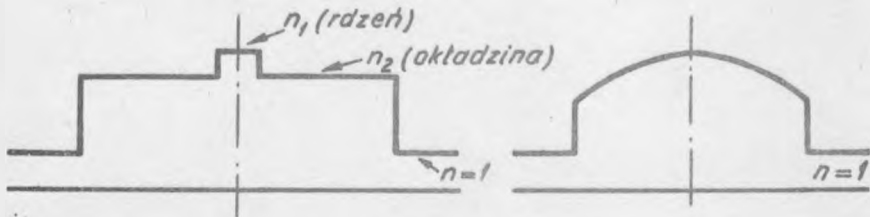


Całkowita liczba soczewek 9 do 11

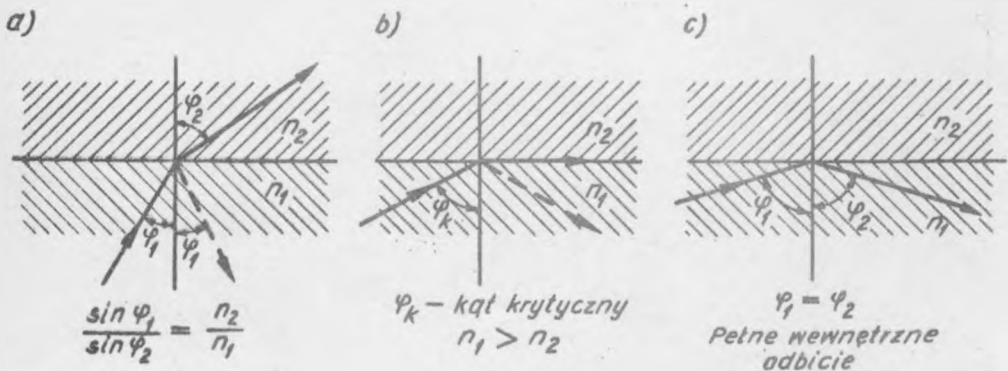
Rys. 9. Schemat z soczewkami gazowymi o przepływie gazu w soczewkach w przeciętych kierunkach



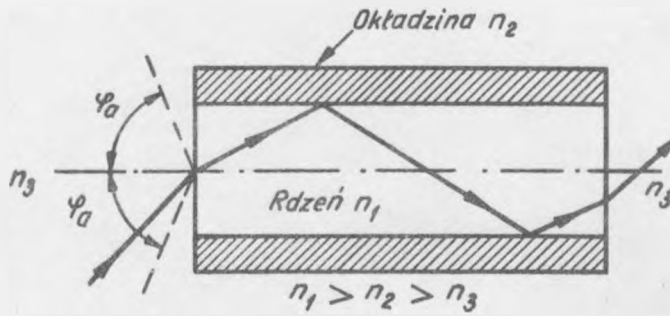
Rys. 10. Mechanizm rozchodzenia się promieniowania: a/ w wielomodowym włóknie optycznym, b/ w włóknie samoogniskującym



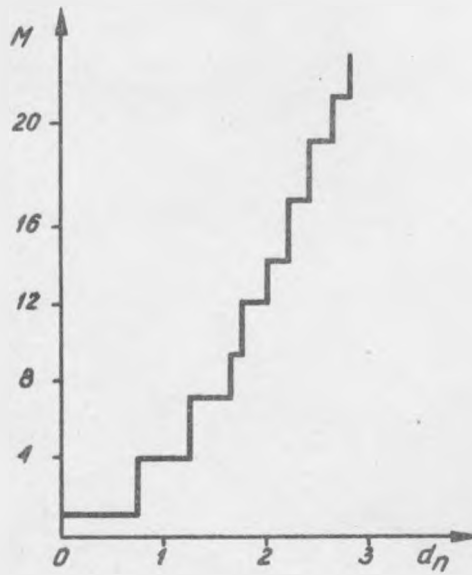
Rys. 11. Przebieg zmian współczynnika załamania wzdłuż średnicy przekroju jednomodowego włókna optycznego i włókna samoogniskującego



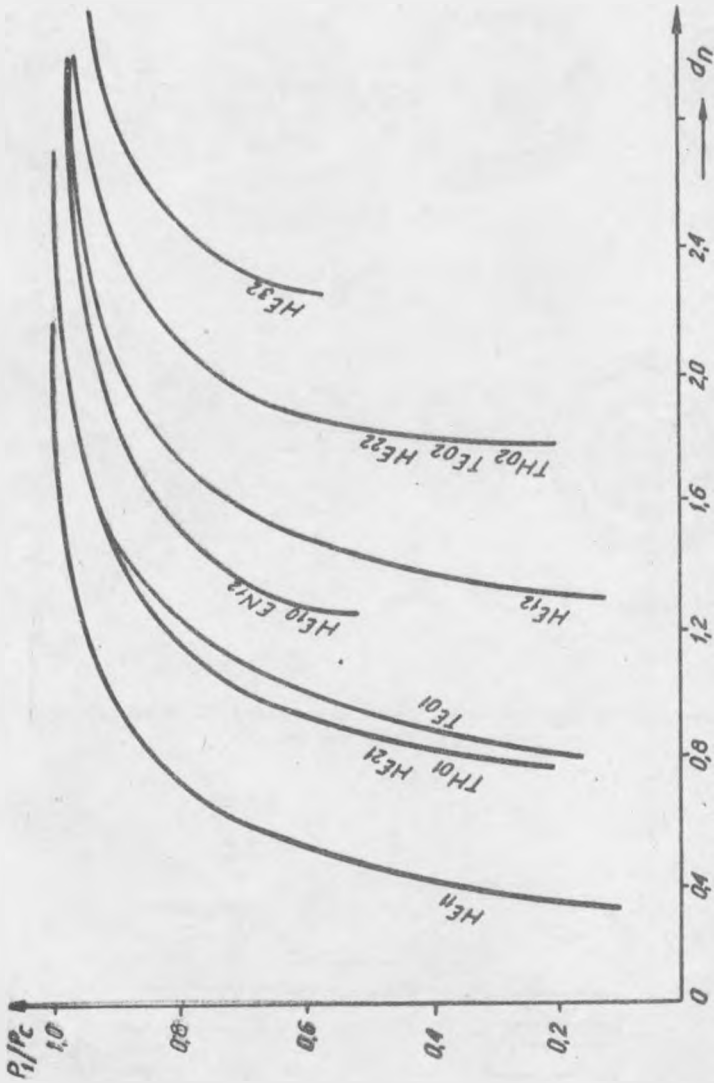
Rys. 12. Ilustracja prawa Snelliusa-Descartesa



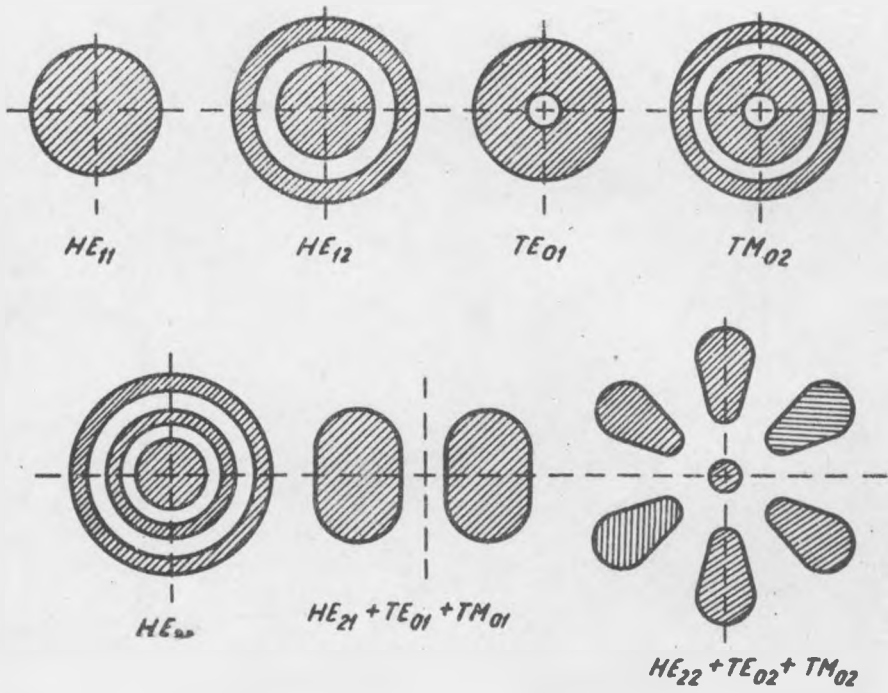
Rys. 13. Apertura liczbowa włókna optycznego



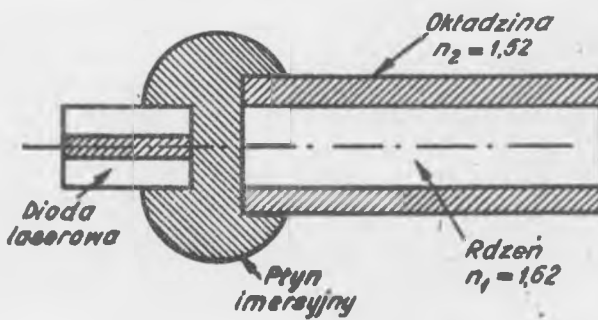
Rys. 14. Zależność liczby modów w włóknie optycznym od znormalizowanej średnicy rdzenia



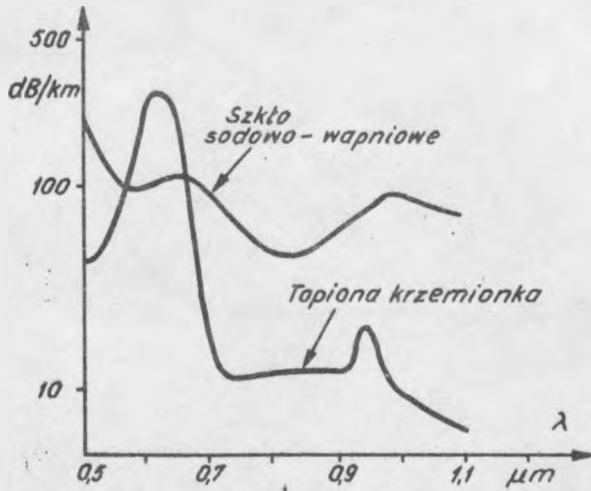
Rys. 15. Zależność stosunku mocy promieniowania przechodzącego przez rdzeń do mocy całkowitej od znormalizowanej średnicy



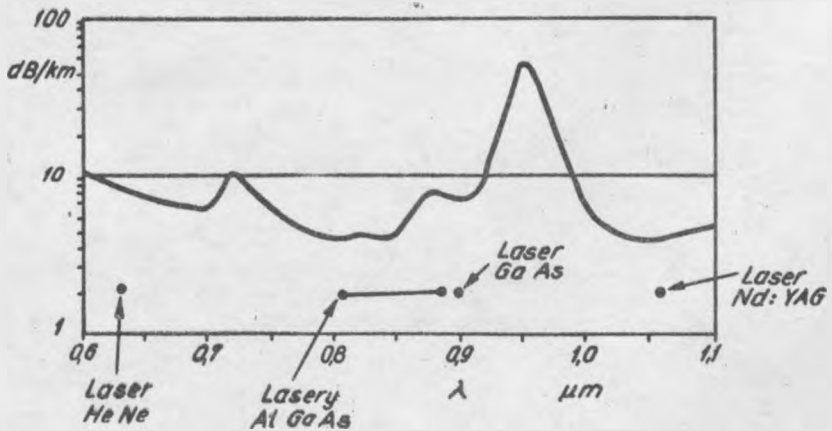
Rys. 16. Rozkład energii promieniowania w przekroju poprzecznym włókna optycznego przy różnych modach



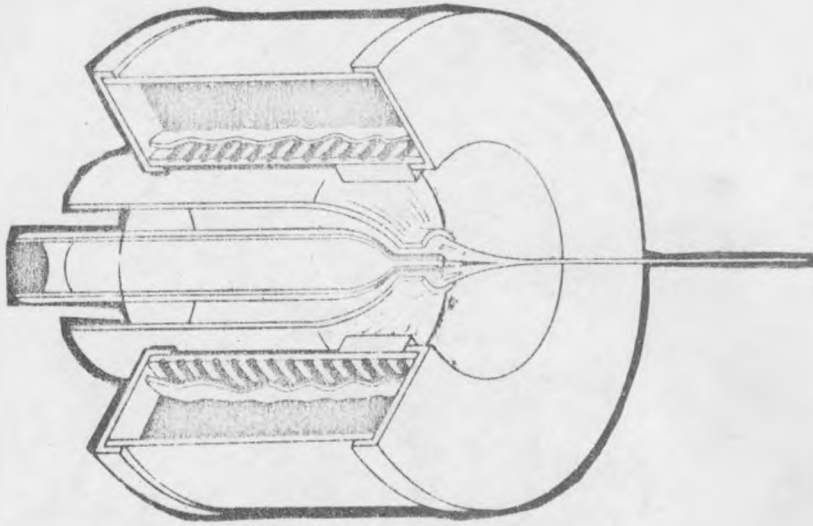
Rys. 17. Złącze: źródło promieniowania - włókno optyczne



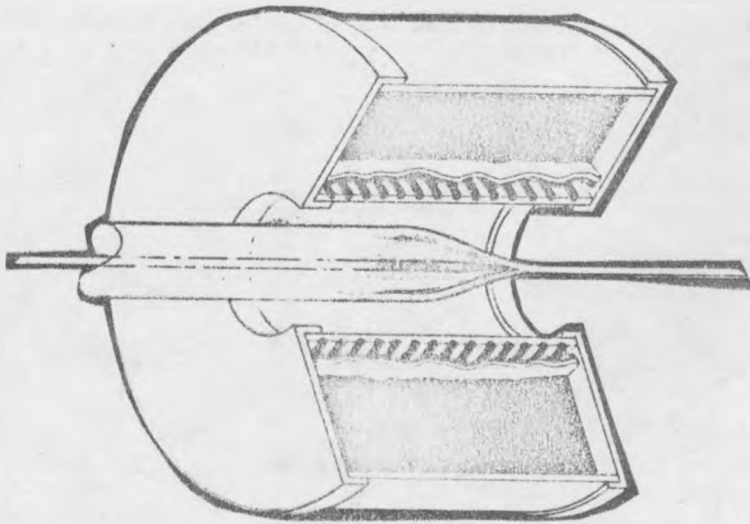
Rys. 18. Zależność tłumienności szkła sodowo-wapniowego i krzemionkowego od długości fali promieniowania



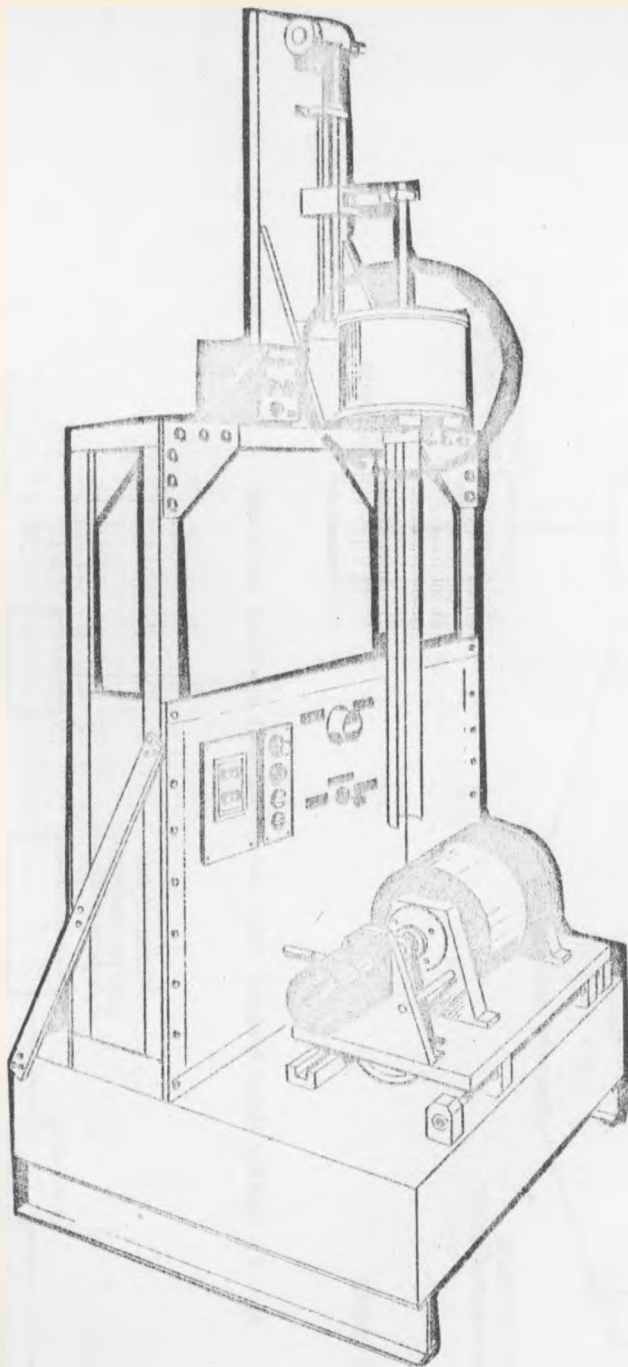
Rys. 19. Zależność tłumienności włókna szklanego Corning Glass od długości fali promieniowania



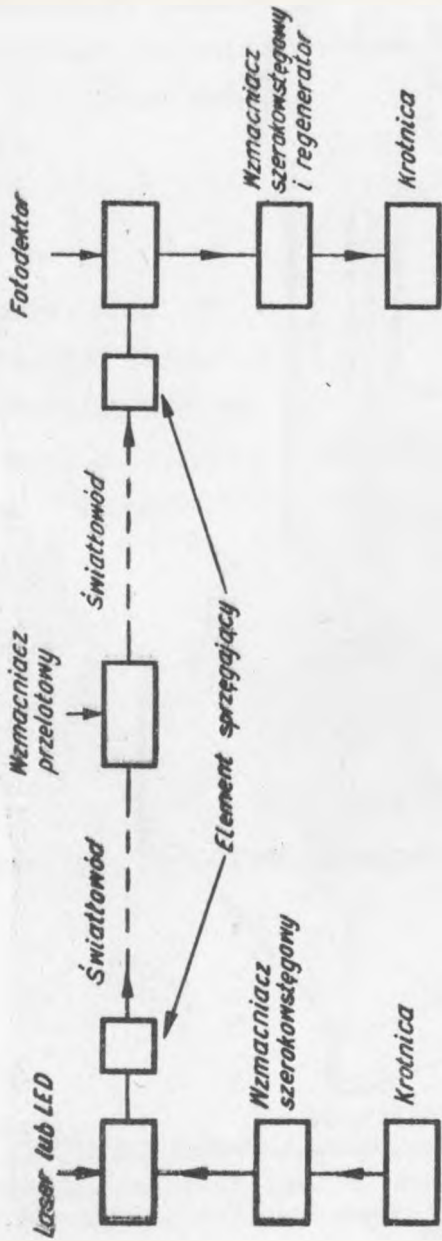
Rys. 21. Ilustracja metody koaksjalno-tyglowej wyciągnięcia włókna optycznego



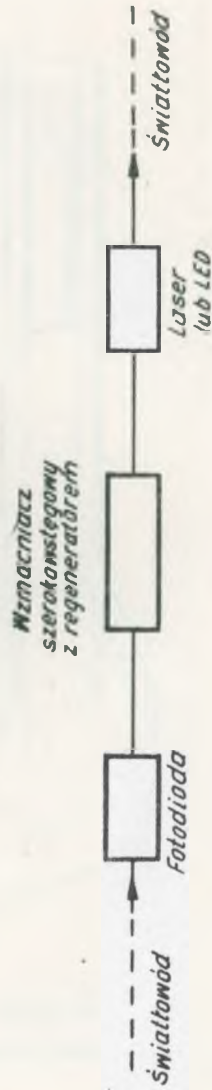
Rys. 20. Ilustracja metody wyciągnięcia włókna optycznego "pręt w rurze"



Rys. 22. Urządzenie do wyciągania włókna szklanego z rdzeniem i okładziną



Rys. 23. Ogólny układ blokowy linii światłowodowej z włókna szklanego



Rys. 24. Ogólny układ stacji przelotowej światłowodu

