

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
WARSZAWA-MIEDZESZYN

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**2(227)**

**1985**



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

---

# BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 25

WARSZAWA 1985

NR 2/227/

---

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
Branżowy Ośrodek  
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

**Redakcja Biuletynu Informacyjnego**

---

**Redaktor Naczelny - doc. dr inż. Krystyn Plewko**  
**Z-ca Redaktora Naczelnego - dr inż. Stanisław Sońta**

**Redaktorzy działów:**

**dr inż. Alina Karwowska-Lamparska, mgr inż. Mirosław Żurawski**

**Adres Redakcji:**

**Instytut Łączności**

**Branżowy Ośrodek**

**Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej**

**Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1**

**Redaktor: mgr K. Juskiewicz**

**Montaż tekstu: B. Skwara**

---

**Dział Wydawniczy Instytutu Łączności**  
**Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do**  
**Działu Wydawniczego 1985.09.23.**  
**Druk ukończono w listopadzie 1985 r.**

TELEKOMUNIKACJA ŚWIATŁOWODOWA

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Charakterystyka stanu badań i zastosowań techniki światłowodowej w świecie	2
3. Stan zaawansowania, plany rozwojowe i możliwe zastosowania technik światłowodowych w polskiej sieci telekomunikacyjnej	4
4. Właściwości włókna optycznego	7
5. Kable światłowodowe i osprzęt	21
6. Źródła i odbiorniki światła w systemach światłowodowych	28
7. Systemy telekomunikacyjne	32
8. Zakończenie	41
Wykaz literatury	41



Andrzej Zieliński

TELEKOMUNIKACJA ŚWIATŁOWODOWA

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Charakterystyka stanu badań i zastosowań techniki światłowodowej w świecie	2
3. Stan zaawansowania, plany rozwojowe i możliwe zastosowanie technik światłowodowych w polskiej sieci telekomunikacyjnej	4
4. Właściwości włókna optycznego	7
5. Kable światłowodowe i osprzęt	21
6. Źródła i odbiorniki światła w systemach światłowodowych	28
7. Systemy telekomunikacyjne	32
8. Zakończenie	41
Wykaz literatury	41





## 1. TELEKOMUNIKACJA ŚWIATŁOWODOWA <sup>X/</sup>

### WPROWADZENIE

Intensywne badania nad zastosowaniem światła jako nośnika informacji dla potrzeb telekomunikacji rozpoczęły się wraz z wynalezieniem lasera /stanowiącego źródło światła koherentnego/, tj. od 1960 roku. Od razu stało się jasne, że wynalazek ten zrewolucjonizuje systemy przekazywania informacji, bowiem zapowiadał on opanowanie przez telekomunikację nowego zakresu częstotliwości - zakresu optycznego. Nie nastąpiło to jednak natychmiast. Na początku podjęto próby wykorzystania lasera do budowy systemów transmisyjnych w otwartej atmosferze na podobieństwo linii radiowych. Nie przyniosło to jednak spodziewanych sukcesów ze względu na ograniczenia wynikające z właściwości atmosfery ziemskiej. Perspektywy tej techniki są szerokie, w istocie tylko w obzearze pozaziemskim, co nas specjalnie tutaj nie interesuje.

Następnie podjęto badania nad skanalizowaniem promieniowania optycznego na podobieństwo znanych systemów falowodowych. Początkowe projekty przewidywały wykorzystywanie skomplikowanych systemów optycznych /soczewki, lustra itp./ z kontrolowaną atmosferą. Nie zdały one egzaminu ze względu na duży stopień komplikacji, niepewne działanie oraz wysokie koszty.

W 1966 roku została zaproponowana nowa idea "skanalizowania" promieniowania optycznego, zaproponowano bowiem [1] /i teoretycznie przewidziano słuszność tej propozycji/ budowę i wykorzystanie do tego celu włókien szklanych o małej

---

<sup>X/</sup> Referat wygłoszono na Krajowym Sympozjum "Telekomunikacja '85", Borków, 19-20 września 1985 r.

tłumienności /dziś zwanych u nas światłowodami/. Dopiero jednak w 1970 roku amerykańska firma Corning Glass Works doniosła o zbudowaniu włókna o tłumienności około 20 dB/km [2]. Od tego momentu, poprzez pierwsze opracowanie systemu teletransmisyjnego wykorzystującego światłowód, co nastąpiło w 1973 roku, również w Corning Glass Works, rozpoczął się trwający do dziś - powiedzieć można - lawinowy rozwój technik światłowodowych.

Tymczasem wynalazek lasera zrobił i robi nadal ogromną karierę w licznych obszarach nauki i techniki daleko odbiegających od telekomunikacji. Jako źródła promieniowania koherentnego /lub bliskie koherentnego/ przyszyły w sukurs laserom półprzewodnikowe diody elektroluminescencyjne, tzw. LED-y /LED-light emitting diode/. Spośród zaś wielkiej dziś różnorodności konstrukcji laserów najbardziej dogodnie dla potrzeb telekomunikacji okazały się lasery półprzewodnikowe, zwane też diodami laserowymi (DL). Jako odbiorniki światła wykorzystano fotodiody półprzewodnikowe pracujące jako detektory światła.

Światłowody, źródła światła i jego odbiorniki osiągnęły dziś wysoką doskonałość i są nadal ulepszane, przynosząc nowe osiągnięcia.

## 2. CHARAKTERYSTYKA STANU BADAŃ I ZASTOSOWAŃ TECHNIKI ŚWIATŁOWODOWEJ W ŚWIECIE

Okres rozwoju do 1980 r. włącznie, interesującej nas techniki, można nazwać okresem opanowywania pierwszej generacji sprzętu i systemów optotelekomunikacyjnych. Charakteryzuje się on opanowaniem systemów cyfrowych wykorzystujących falę nośną  $\lambda$  około 850 nm, /w tzw. "pierwszym oknie transmisji"/ z DL lub LED typu GaAlAs jako nadajnikami i diodami lawinowymi jako odbiornikami światła. Systemy te współpracują z włóknem wielomodowym z typowym tłumieniem rzędu 3 - 5 dB/km, z odległością odcinka między-regenera-

torowego do 10 km przy przepływnościach do 140 Mb/s.

Obecnie jesteśmy w stadium opanowywania drugiej generacji systemów światłowodowych. Charakteryzuje się on przede wszystkim objęciem tzw. "drugiego okna transmisji" /  $\lambda$  około 1300 nm/, z wykorzystaniem włókna jednomodowego z tłumieniem rzędu ok. 0,5 dB/km i odległością między-regeneratorową ok. 30 km przy przepływności 140 Mb/s. Bada się również zakres  $\lambda$  około 1500 nm /"trzecie okno transmisji"/ z włóknem jednomodowym o tłumieniu rzędu 0,25 dB/km. Wprowadzane są też systemy o wyższych przepływnościach - do 560 Mb/s. Jako elektroniczne elementy nadawcze w miejsce poprzednio stosowanych /przy  $\lambda \sim 850$  nm/, typu GaAlAs, wykorzystuje się dla  $\lambda$  rzędu 1300 nm i 1500 nm elementy typu GaInAs P lub GaInAs, przy czym prawdopodobnie przeważać będą lasery.

Dzisiaj systemy i sprzęt pierwszej generacji jest już dość szeroko produkowany przemysłowo i odpowiednio szeroko rozpowszechnił się w eksploatacji, zaś drugiej - wkracza w fazę wytwarzania /produkcji przemysłowej/. Obecnie nie ma w świecie liczącej się firmy, produkującej systemy i sprzęt telekomunikacyjny, która nie wykazywałaby aktywności w zakresie teletransmisyjnych systemów światłowodowych.

Ogromny rozwój interesującej nas techniki związany jest z następującymi jej zaletami w stosunku do techniki tradycyjnej wykorzystującej kable miedziane.

1. Bardzo duża szerokość przeniesionego pasma pozwalająca na transmisję wielkiej liczby kanałów telefonicznych na jednym kablu /włóknie/.
2. Niskie straty mocy w transmisji od kilku dB/km do mniej niż 0,5 dB/km.
3. Łatwość realizacji transmisji cyfrowej.
4. Małe rozmiary.
5. Mała masa jednostkowa i małe średnice kabla.

6. Łatwość instalacji.
7. Odporność na wpływ promieniowania elektromagnetycznego i radiacji.
8. Brak przesłuchów.
9. Bardzo trudny podsłuch.
10. Brak przewodności dla prądu elektrycznego i wynikający stąd brak sprzężeń przez przewodnictwo /również z gruntem/.
11. Rzadkie rozmieszczenie regeneratorów i rzadkie łączenie odcinków kablowych.
12. Odporność na wilgoć, korozję, utlenianie i wysokie temperatury.
13. Wygoda w eksploatacji i większa efektywność energetyczna.
14. Niskie koszty.

Powyższe zalety decydują, że jest to bezdyskusyjna technika przyszłości, prawdopodobnie dla wszystkich płaszczyzn sieci telekomunikacyjnej i dla wszystkich rodzajów usług telekomunikacyjnych. Szeroki rozwój tych technik daje możliwość realizacji w przyszłości cyfrowej, zintegrowanej sieci telekomunikacyjnej.

### 3. STAN ZAAWANSOWANIA, PLANY ROZWOJOWE I MOŻLIWE ZASTOSOWANIA TECHNIK ŚWIATŁOWODOWYCH W POLSKIEJ SIECI TELEKOMUNIKACYJNEJ

Podobnie jak w kilku innych krajach RWPG w Polsce, jeszcze w latach siedemdziesiątych, podjęto badania nad wytwarzaniem włókien światłowodowych dla potrzeb telekomunikacji. Do dziś praktycznie osiągnięto opanowanie technik pierwszej generacji systemów i sprzętu, tj. osiągnięto etap zastosowań pierwszego okna transmisji na światłowodach gradientowych /wielomodowych/.

Opanowanie technik pierwszej generacji nie zaowocowało jeszcze niestety powtarzalną seryjną produkcją włókien, kabli, osprzętu, elementów elektronicznych i systemów teletransmisyjnych w przemyśle krajów RWPG. Jak dotąd nie ma jeszcze w handlu wymienionego wyżej asortymentu wyrobów. Z licznych doniesień sądzić jednak można, że kilka krajów RWPG, w tym Polska, jest w przeddzień osiągnięcia tego stadium-stadium rozpowszechniania.

Pierwsze włókno o niezbyt dużej tłumienności /10 dB/km/ osiągnięto w Polsce w laboratoriach Uniwersytetu im. Marii Curie-Skłodowskiej /UMCS/ w Lublinie w 1978 roku. Włókno to zostało w UMCS laboratoryjnie skablowane i umożliwiło to wybudowanie w 1979 r. pierwszej linii światłowodowej w Polsce. Linie tę zbudowano w Lublinie. Miała ona długość ok. 3 km i realizowała transmisję sygnału cyfrowego PCM-24 o przepływności 1,5 Mb/s.

Uzyskane doświadczenia pozwoliły na podjęcie decyzji o wybudowaniu instalacji doświadczalno-produkcyjnej włókien i kabli światłowodowych, wyposażonej we własne urządzenia technologiczne. Instalacja ta w formie wyodrębnionego obiektu w Lublinie została zbudowana w latach 1981-83 i obecnie znajduje się w fazie rozruchu. Spodziewane jest opanowanie powtarzalnej produkcji włókna w 1985 roku. Instalacja ta znajduje się w posiadaniu Ośrodka Techniki Optotelekomunikacyjnej /OTO/ wchodzącego w skład Dyrekcji Okręgu Poczty i Telekomunikacji w Lublinie.

W 1982 roku powstała druga linia doświadczalna w Polsce. Linie tę zbudowano w Łodzi z wykorzystaniem kabla pochodzącego również z UMCS. Linia ma długość ok. 5 km i zainstalowano na niej systemy PCM odpowiednio TCK-30 /2 Mb/s/ i TCC-120 /8 Mb/s/. Eksperymenty te pozwoliły na podjęcie opracowań systemowych przeznaczonych do produkcji, a dotyczących sprzętu systemów o przepływności 2, 8 i 34 Mb/s. Spodziewane jest podjęcie produkcji tych systemów w werwi światłowodowej przez polski przemysł sukcesywnie w latach

1986-87. Oczywiście, jak wspomniano poprzednio, dotyczyć to będzie włókien i kabli gradientowych /wielomodowych/ współpracujących z systemami działającymi w pierwszym oknie transmisji.

Wraz z rozwojem technologii włókien i kabli oraz opracowaniami sprzętu opanowano również podstawowe techniki łączenia trwałego i rozłączonego włókien. W Instytucie łączności opracowano konstrukcję dobrej klasy spawarek /działających na zasadzie łuku elektrycznego/ oraz złączy rozłącznych pojedynczych i wielokrotnych. Opracowane zostały również podstawowe aparaty pomiarowo-kontrolne, takie jak do pomiaru tłumienia, pasma przenoszenia, profilu współczynnika załamania w rdzeniu włókna i inne.

Wszystko to pozwala przewidywać, że po 1986 r. w Polsce nastąpi prawdopodobnie szybki proces rozpowszechniania się w sieci telekomunikacyjnej optoelektronicznych systemów PCM o przepływnościach 2, 8 i 34 Mb/s. Początkowo przede wszystkim w sieciach miejskich i wewnątrzstrefowych, głównie w obszarach gdzie są i gdzie będą instalowane centrale systemu E10. Następnie przewiduje się wprowadzanie systemów światłowodowych /optoelektronicznych/ do sieci dalekością /magistralnej/, co będzie dotyczyć w pewnej mierze systemu o przepływności 34 Mb/s, a następnie /głównie/ systemu 140 Mb/s. Dla systemów tych przewiduje się wykorzystanie również włókien jedomodowych, co również znajduje się w planach działania UMCS i OTO w pięcioletniej 1986-90. Oznaczać to będzie początek opanowywania sprzętu i systemów drugiej generacji. Sądzić można, że efektywne opanowanie tego etapu nastąpi w Polsce około 1990 roku.

Uwzględnivszy powyższe w całości, osobiście uważam, że techniki światłowodowe powinny stać się w polskiej sieci telekomunikacyjnej dominujące /w nowych instalacjach/ bezpośrednio po 1990 roku.

#### 4. WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKNA OPTYCZNEGO

Głównym materiałem, z którego buduje się światłowody telekomunikacyjne jest szkło kwarcowe.

Bardzo czyste szkło kwarcowe otrzymuje się z fazy gazowej, np. przez spalanie w płazmie  $\text{SiCl}_4$  i osadzenie  $\text{SiO}_2$ . Gorsze gatunki uzyskuje się przez wytopienie z naturalnego proszku kwarcowego.

Ze względu na konstrukcję światłowodu, składającego się z koncentrycznie umieszczonych rdzenia i płaszcza o zróżnicowanych wartościach współczynnika załamania, szkło kwarcowe przeznaczone na rdzeń domieszkuje się dla uzyskania w rdzeniu większego współczynnika załamania. W ten sposób płaszczy najczęściej bywa zbudowany ze szkła czystego. Czasami dodaje się również składniki do płaszcza celem zmniejszenia jego współczynnika załamania. Niekiedy domieszki wprowadza się dla uzyskania technologicznych udogodnień produkcyjnych /np. dla zwiększenia szybkości osadzania domieszek/. Jako dodatki do szkła najczęściej stosuje się: german Ge, fosfor P, bor B oraz fluor F.

Oprócz szkła kwarcowego stosowane są również szkła wieloskładnikowe, jak np. zbudowane w odpowiednich proporcjach z  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{CaO}$  /szkło sodowo-wapniowo-krzemowe/ i inne. W ogólności różnorodność szkieł jest b.wielka i ich komponowanie nazwać można "sztuką" technologiczną. Ostatnio [3,4] sygnalizowano jest istnienie szkieł o bardzo niskich wartościach tłumienia poniżej 0,01 dB/km dla zakresu fal od 2 do 5  $\mu\text{m}$ . Takie własności mają mieć tzw. szkła halogenkowe /szkła chlorkowo-cynkowe/.

Podstawową metodą wytwarzania światłowodów telekomunikacyjnych jest metoda CVD /chemical vapor deposition/ wraz z modyfikacjami, zwana wówczas MCVD /modified CVD/. Metoda ta polega na dokładnie kontrolowanym osadzaniu warstwami domieszek na wewnętrznej części rury kwarcowej /zbudowanej z czystego szkła kwarcowego/ i następnie pod wpływem wysokiej

temperatury zatopienia /tzw. "kolapsie"/ rury w pręt. Pręt taki, zawierający już domieszki, nazywany jest preformą. Następnie preforma ta jest w odpowiednim piecu wytapiana, a ciekłe szkło wyciągane przez odpowiednie urządzenie /wyciągarkę/ w światłowód. W trakcie wyciągania, można powiedzieć natychmiast, światłowód jest pokrywany odpowiednim lakierem zabezpieczającym włókno od wpływów zewnętrznych. Później, w kolejnej fazie, włókno pokrywane jest kolejną warstwą zabezpieczającą światłowód mechanicznie. Może być to polietylen bądź ostatnio preferowana guma silikonowa.

Jak wspomniano poprzednio, światłowód zbudowany jest z koncentrycznie umieszczonych rdzenia i płaszczka o zróżnicowanym współczynniku załamania światła  $n$ . Ilustruje to rys. 1. Obszar  $r \leq a$  oznacza rdzeń, zaś  $a < r \leq b$  płaszcz światłowodu.

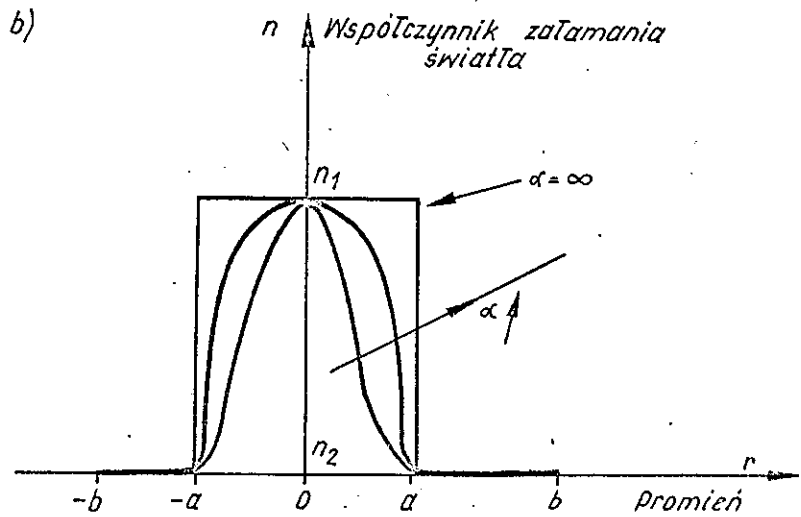
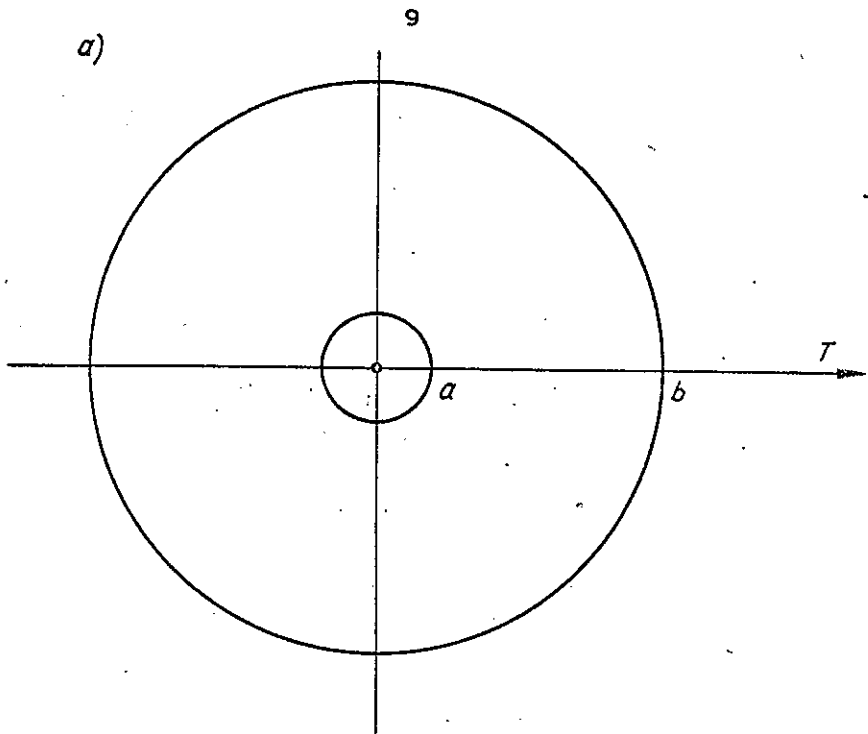
Względne zróżnicowanie wartości  $n$  nie jest duże - jest rzędu kilku procent. Rozkład współczynnika załamania szkła w światłowodzie opisuje się zależnością:

$$n = \begin{cases} n_1 \left[ 1 - \left( \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right) \left( \frac{r}{a} \right)^\gamma \right]^{\frac{1}{2}} & \text{dla } r < a \\ n_2 & \text{dla } a \leq r \leq b, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie  $\gamma$  jest parametrem określającym gradient współczynnika załamania i zależy od sposobu osadzania domieszek. Zauważmy, że dla  $\gamma \rightarrow \infty$

$$n = \begin{cases} n_1 & \text{dla } r < a \\ n_2 & \text{dla } a \leq r \leq b \end{cases} \quad (2)$$





Rys. 1. Geometria przekroju poprzecznego i rozkład współczynnika załamania światła światłowodu

Włókna opisywane wzorem (1) przy  $\gamma \neq \infty$  nazywane są gradientowymi, zaś wzorem (2) włóknami o skokowej zmianie współczynnika załamania lub w skrócie skokowymi.

Z teorii falowodów wynika, że dla  $2a \gg \lambda$  w światłowodzie rozchodzi się promieniowanie zawierające w sobie wiele modów. W takim przypadku włókno nazywane jest wielomodowym. Uwzględniając obecnie wykorzystywane zakresy fal przyjęto dla włókien wielomodowych rekomendację G 651/1980 CCITT, wg której  $2a = 50 \mu\text{m}$ ,  $2b = 125 \mu\text{m}$ .

Jeśli  $2a$  jest współmierne z  $\lambda$  w światłowodzie rozchodzić się będzie jeden mod. Inne, wyższe mody zostaną odcięte atłumione. Warunkiem odcięcia wyższych modów jest [5]:

$$2a \leq \frac{4,81}{2\pi} (n_1^2 - n_2^2)^{-\frac{1}{2}} \lambda. \quad (3)$$

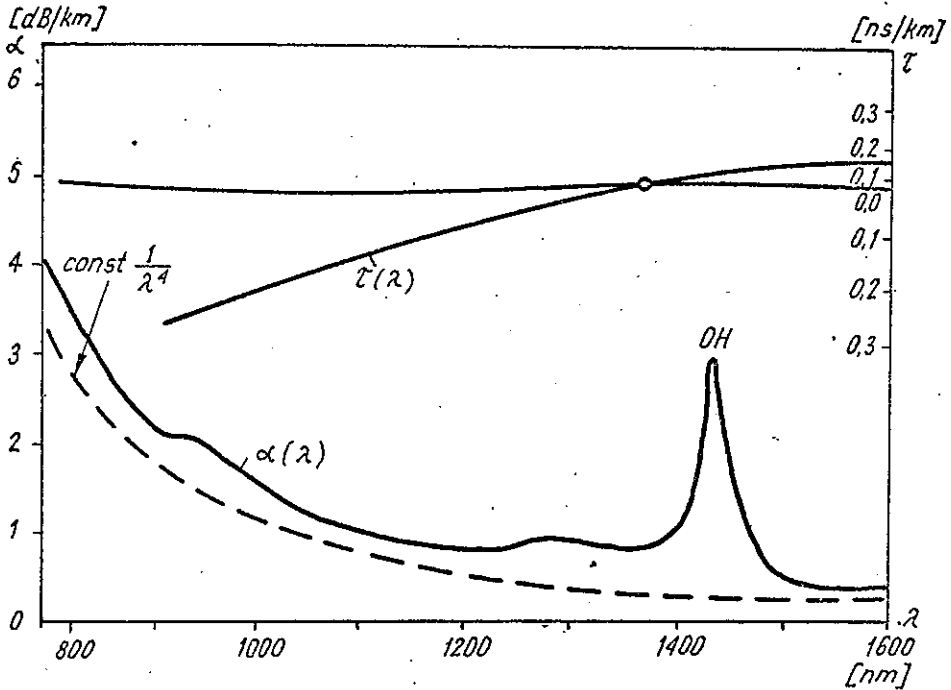
Włókna spełniające warunek (3) nazywane są jednomodowymi. Obecnie stosowane włókna jednomodowe mają średnicę  $2a \approx 10 \mu\text{m}$ .

Najczęściej stosowane włókna wielomodowe są włóknami gradientowymi ( $\gamma \neq \infty$ ), zaś jednomodowe - skokowymi.

Podstawowymi parametrami włókna są jego parametry transmisyjne, tj. tłumienie  $\alpha$  i dyspersja  $\tau$  /rozumiana jako przyrost szerokości impulsu na jednostkę długości włókna/. Ekwivalentem parametru  $\tau$  jest szerokość pasma transmisji  $\omega$  wokół fali nośnej  $\lambda$ . Parametrem tym zajmować się tu nie będziemy jakkolwiek wiadomo, że  $\tau \cdot \omega = \text{const}$  dla danego  $\lambda$ . Charakterystyki  $\alpha(\lambda)$  i  $\tau(\lambda)$  są podstawowymi charakterystykami włókna, określają bowiem jego transmitancję /funkcję przenoszenia/.

Ponadto do parametrów charakteryzujących włókno należy jego apertura numeryczna NA, parametry geometrii przekroju poprzecznego, parametry wytrzymałościowe, temperaturowe i inne.

Charakterystyki tłumienia  $\alpha(\lambda)$  i dyspersji  $\tau(\lambda)$  dobrej jakości włókna kwarcowego [6] podaje rys. 2.



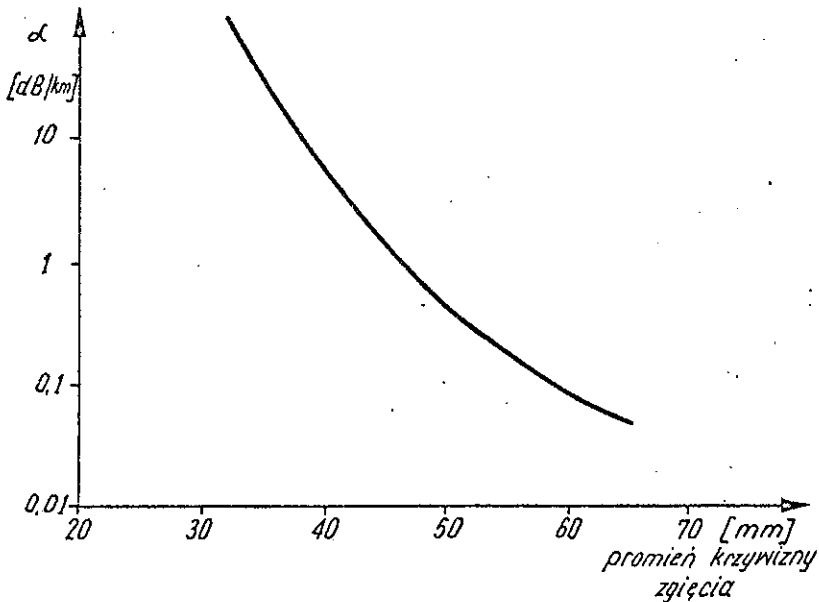
Rys. 2. Charakterystyki tłumienia i dyspersji światłowodów

Przebieg krzywej  $\alpha(\lambda)$  jest wypadkową wielu wpływów. W ich bilansie główną rolę odgrywają następujące czynniki:

- absorpcja na cząstkach szkła zarówno z obszaru ultrafioletu, jak i podczerwieni;
- nieunikniona absorpcja na jonach OH /są one b.trudne do wyeliminowania/; wyrażają się one jako "piki" w okolicach  $\lambda \sim 1400$  nm;
- absorpcja na jonach metali, która może być sprowadzona do zupełnie nieznaczących wartości;

- rozproszenie Rayleigha na fluktuacjach gęstości i składu szkła /jako pozostałości po procesie zastygania szkła/; graniczną najmniejszą wartością tej składowej jest krzywa proporcjonalna do  $\lambda^{-4}$  /patrz rys. 2/.

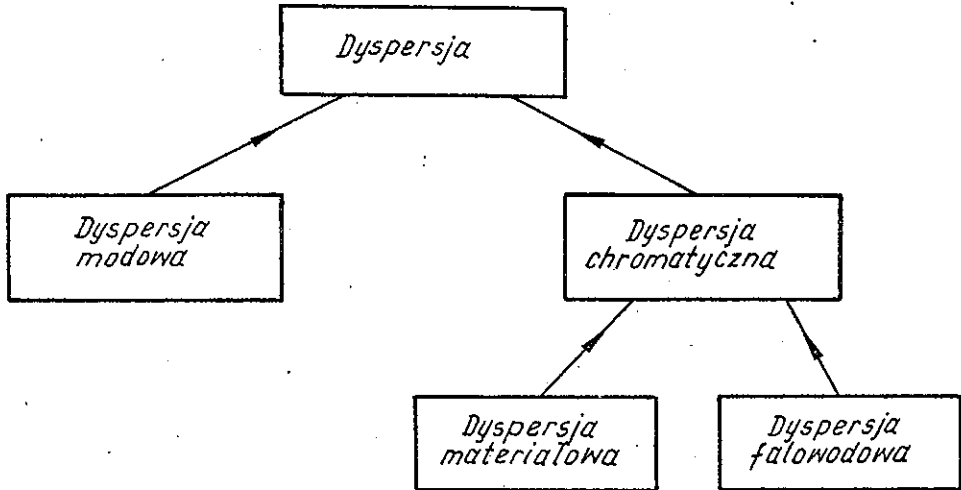
Na wartość  $\alpha$  mają wpływ zagięcia włókna. Ich obecność powiększa tłumienie [8]. Wpływ zgięć na wartość  $\alpha$  ilustruje rys. 3. Jak wynika z tego rysunku włókno winno być układane swobodnie bez niepotrzebnych zgięć.



Rys. 3. Zależność tłumienia światłowodu od promienia krzywizny jego zgięć

Wpływ temperatury na wartość  $\alpha$  dla dobrze wykonanych włókien [7], [8] winien być znikomy w szerokim zakresie zmian tego czynnika. Dla dobrych włókien zmiana w przedziale temperatur od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$  nie przekracza wartości 0,1 dB. Poza tym przedziałem  $\alpha$  szybko rośnie.

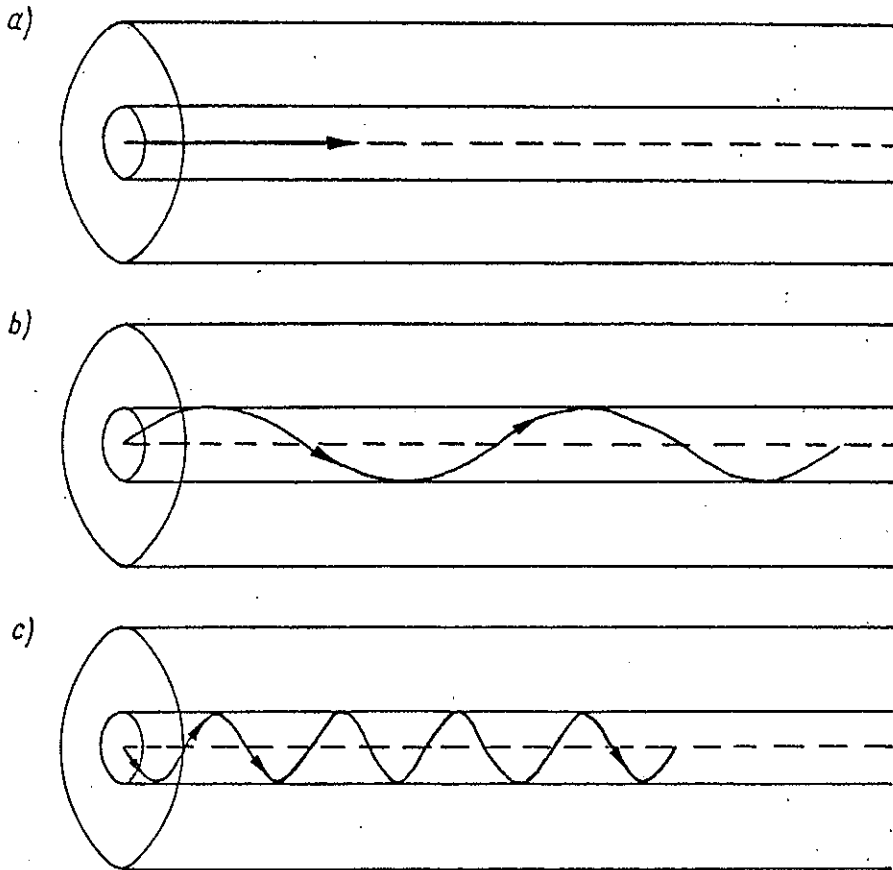
Kształt charakterystyki  $\tau(\lambda)$  określa dyspersja modowa i dyspersja chromatyczna. Ta ostatnia dzieli się na dyspersję materiałową i falowodową /rys. 4/.



Rys. 4. Klasyfikacja rodzajów dyspersji światłowodu

Dyspersja modowa jest cechą szczególną falowodów gradientowych wielomodowych i wynika z różnych dróg, jakie przebiegają mody w czasie transmisji. Promienie i drogi niektórych modów w światłowodzie gradientowym pokazano na rys. 5. Rys. 5a wyobraża mod poosiowy /o najkrótszej drodze transmisji/. Rys. 5b obrazuje drogę modu o promieniu w jednej płaszczyźnie - w płaszczyźnie rysunku. Ze względu na efekt Goosa-Haenchena [5] wchodzi on częściowo w płaszczyznę, jego droga jest dłuższa i przebiega w obszarach o zróżnicowanej wartości  $n$ . Ostatni pokazany mod /rys. 5c/ przebiega spiralnie w obszarze o zróżnicowanym  $n$ .

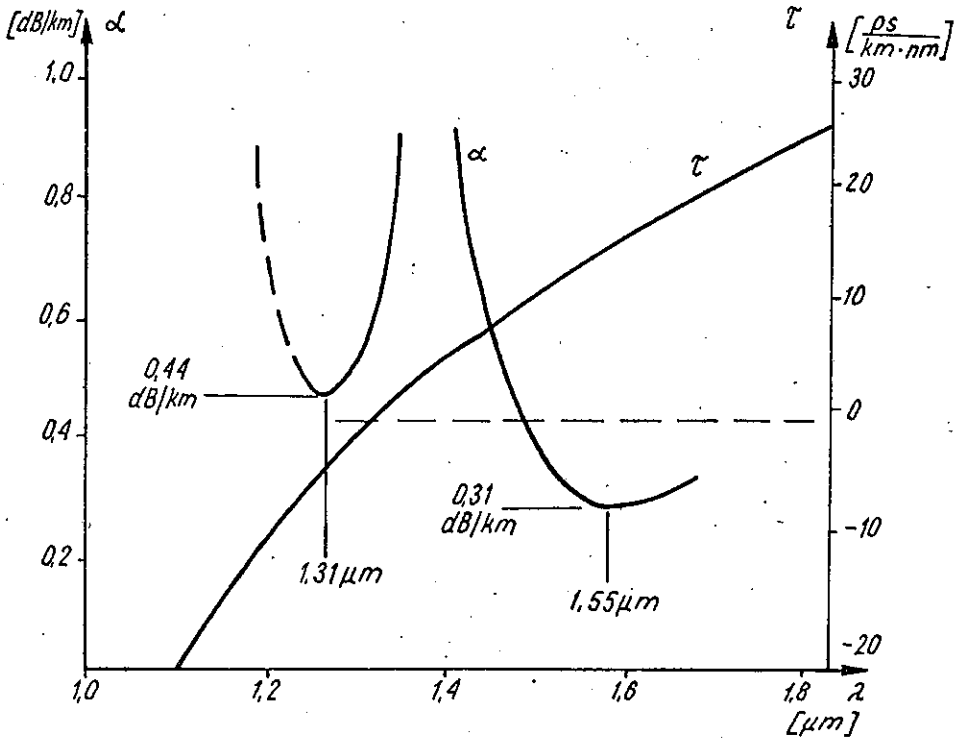
Dobór krzywej pokazanej na rys. 1b, czyli parametru określającego współczynnik załamania  $n$ , pozwala na minimalizację dyspersji całkowitej światłowodu. Jak wspomniano, jest to zależne od sposobu osadzania domieszek w rdzeniu.



Rys. 5. Promienie i drogi niektórych modów  
w światłowodzie gradientowym

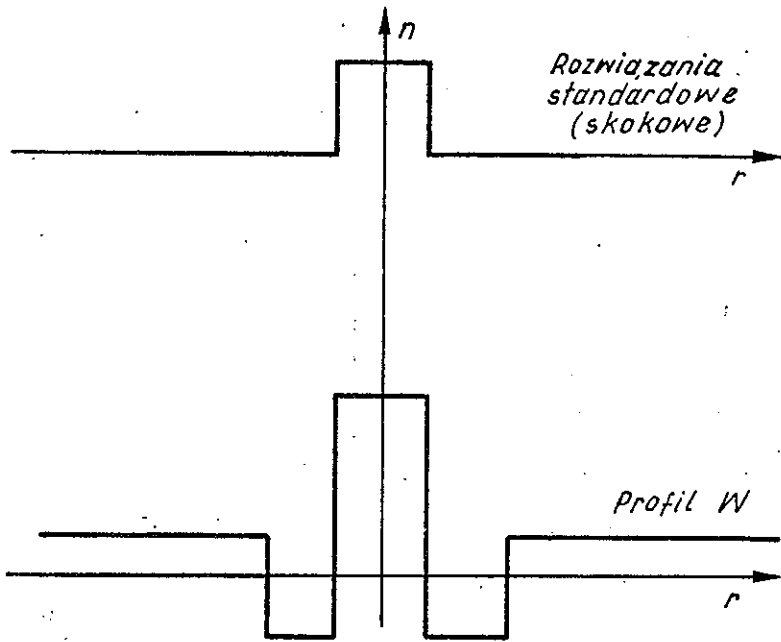
Dyspersja modowa znika we włóknach jednomodowych. We włóknach tych dominuje dyspersja materiałowa, gdyż falowoda jakkolwiek zawsze istniejąca, jest znacznie mniejsza.

Dla typowej konstrukcji /włókno w skokowej zmianie  $n$ / włókna jednomodowego o dobrych parametrach materiałowych charakterystyki  $\alpha(\lambda)$  i  $\tau(\lambda)$  mogą być podobne do pokazanych na rys. 6 [9].

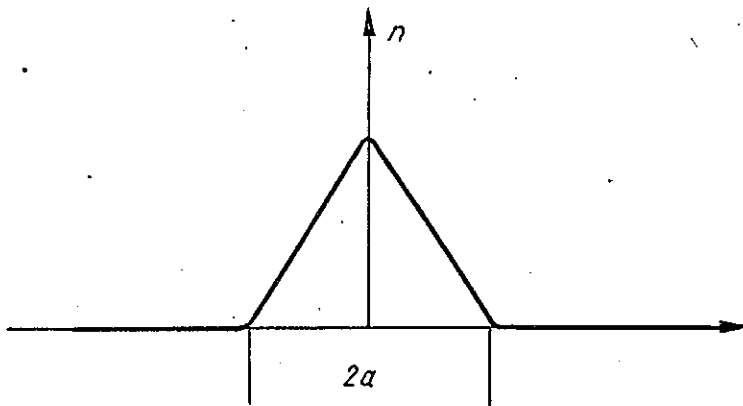


Rys. 6. Charakterystyki transmisyjne typowego światłowodu jednomodowego

Charakterystykę dyspersji można kształtować, wpływając na średnicę rdzenia, czyli na dyspersję falowodową, oraz na wartość współczynnika załamania  $n$ . Można np. zwiększyć  $n$  w rdzeniu, zaś w bezpośrednim sąsiedztwie rdzenia w płaszczu współczynnik ten zmniejszyć. Powstaje wówczas tzw. profil światłowodu typu W [9] - patrz rys. 7. Poprzez tego typu operację można np. przesunąć miejsce o zerowej wartości w obszar  $\lambda \approx 1500 \text{ nm}$ . Podobne możliwości stwarza profil trójkątny rdzenia [9] pokazany na rys. 8. Na rys. 9 pokazano [9] charakterystyki  $\alpha$  i  $\tau$  takiego włókna dla  $\lambda = 6,4 \mu m$ .

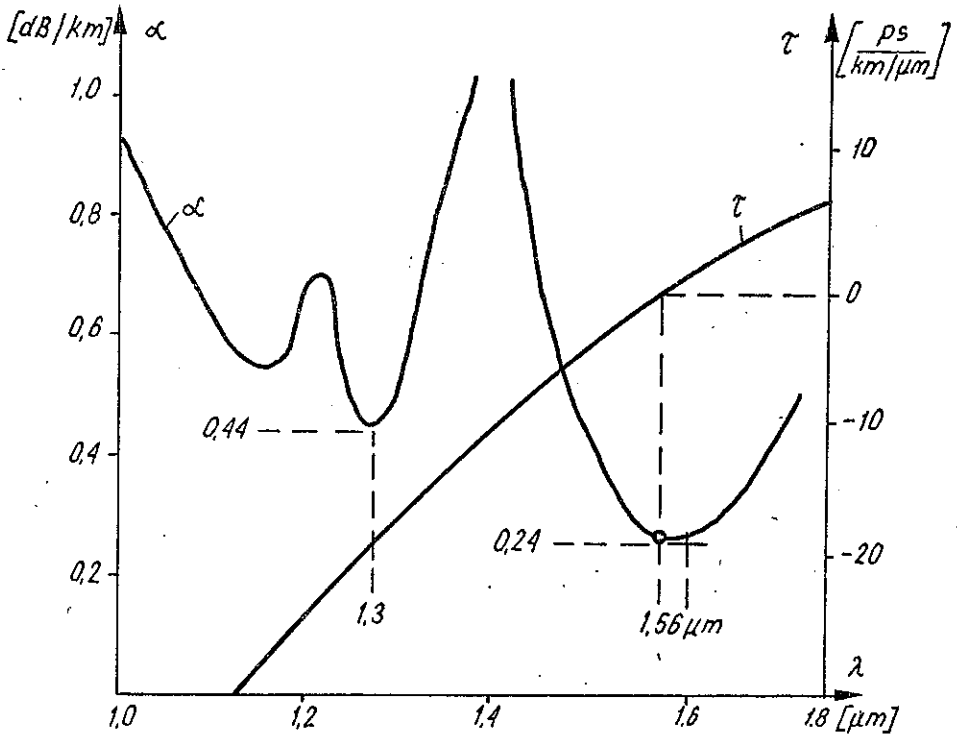


Rys. 7. Rodzaje zmian współczynnika załamania światła w światłowodach jednomodowych



Rys. 8. Trójkątny charakter zmian współczynnika załamania światła w światłowodzie jednomodowym

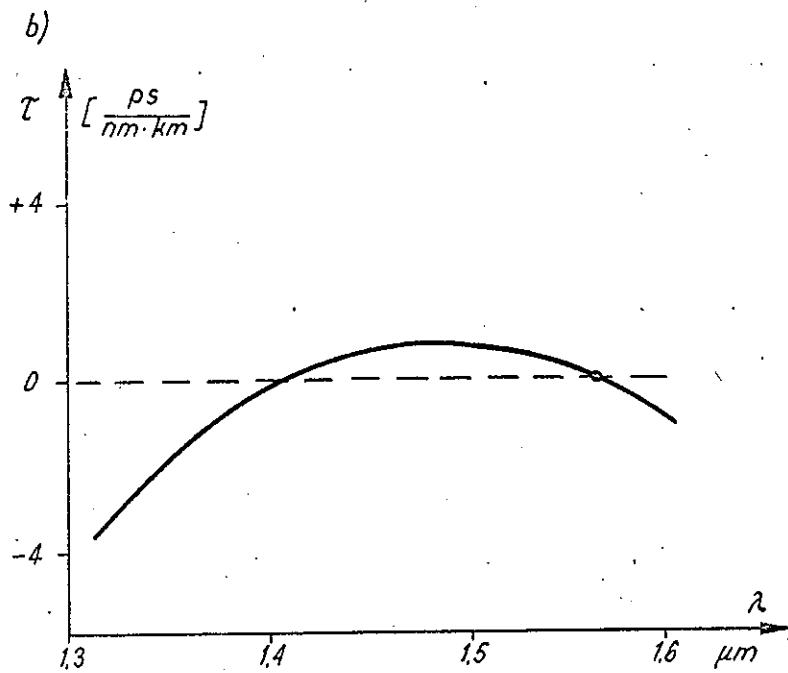
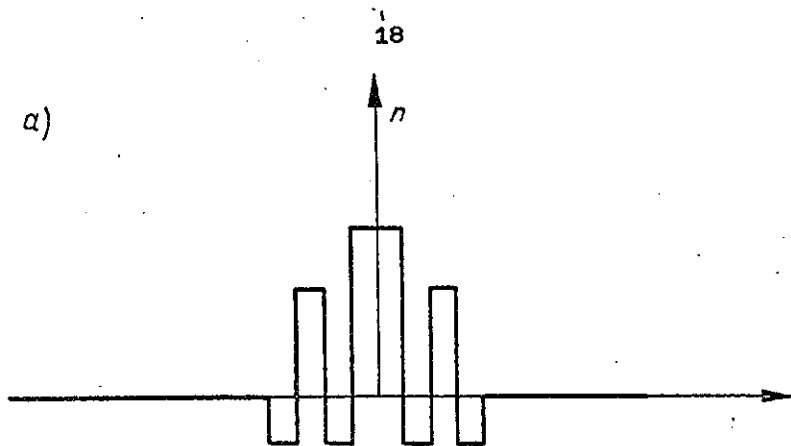




Rys. 9. Charakterystyki transmisyjne światłowodu jednomodowego z przesuniętą zerową dyspersją

Istnieje również możliwość [9] uzyskania małych wartości dyspersji w pewnym obszarze przy dwóch wartościach  $\lambda$  z zerową dyspersją. Można to uzyskać we włóknie jednomodowym z rdzeniem o profilu tzw. segmentowym /rys. 10/. Rozwiązanie "segmentowe" jest b.trudne i na razie, w praktyce jeszcze nie wykorzystywane.

Jak z przytoczonych przykładów i dyskusji wynika, charakterystyki  $\alpha(\lambda)$  i  $\tau(\lambda)$  dają się korzystnie kształtować jednak za pomocą bardzo subtelnych metod technologicznych wpływających na materiały i geometrię włókna.



Rys. 10. Segmentowe zmiany współczynnika załamania światła światłowodu jednomodowego i jego charakterystyka dyspersji

Wprowadzanie techniki włókien jednomodowych oraz coraz częstsze stosowanie laserów o większej niż w LED-ach mocy powoduje, że gęstość strumienia mocy w rdzeniu rośnie. Inaczej mówiąc, natężenia pól  $E$  i  $H$  w części czynnej światłowodu rosną. Powoduje to ujawnianie się nowych efektów przy transmisji w światłowodach, tj. efektów nieliniowych [10]. Efekty te można uwypuklić również przez zastosowanie odpowiednich składników szkła, zwiększających podatność na zjawiska nieliniowe.

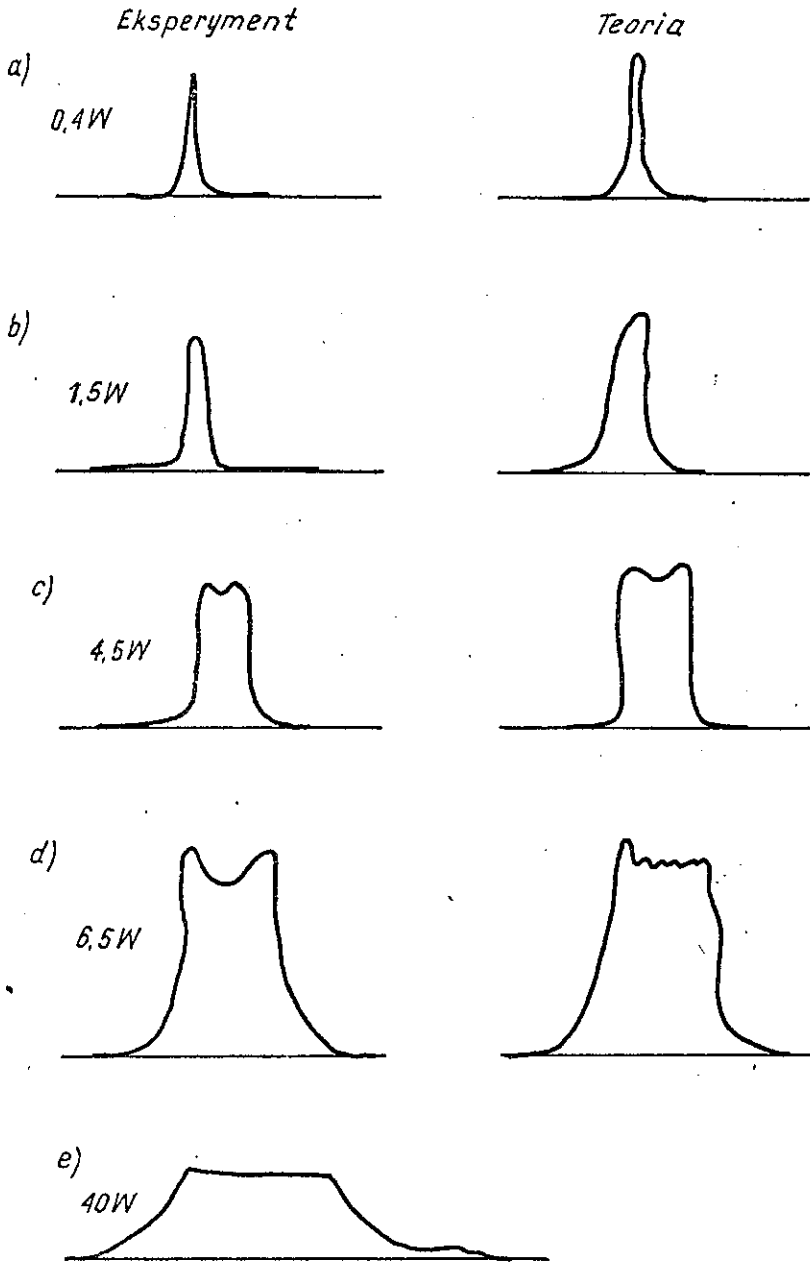
Zjawiska te można badać analitycznie lub numerycznie, zakładając w zależnościach materiałowych równań Maxwella

$$\begin{aligned} P &= \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots \\ D &= (\epsilon_0 + \alpha)E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

W zależności od założeń fizycznych powyższe szeregi ogranicza się do dwóch członów /pierwszego z drugim lub pierwszego z trzecim/. Zagadnienia formalne sprowadzają się do analizy nieliniowych równań falowych, których rozwiązania mogą być bardzo urozmaicone w zależności od przyjętych warunków brzegowych, wynikających z fizyki modelu. Podobnymi problemami zajmuje się nieliniowa teoria drgań [11], zwłaszcza optyka nieliniowa.

Przyjmując dla szkła krzemowego izotropowość ośrodka, utrzymanie w (4) tylko członu sześciennego /i zakładając, że jest on b.mały/ w pierwszym przybliżeniu otrzymuje się uzależnienie szerokości impulsu rozchodzącego się we włóknie od jego mocy wejściowej. Można to określić jako zjawisko nieliniowej dyspersji. Zjawisko to, zgodnie z [10], ilustruje rys. 11.

Na rys. 11 pokazano zmianę obwiedni sygnału w kształcie impulsu w funkcji mocy wejściowej sygnału. Szerokość impulsu rośnie wielokrotnie wraz ze wzrostem mocy sygnału, w sto-



Rys. 11. Zmiany szerokości impulsu obwiedni w funkcji mocy wejściowej w światłowodzie wykazującym zjawiska nieliniowe

sunku do szerokości umownie uznanej za jednostkową dla małego poziomu mocy /0,4 W/.

Wyniki zilustrowane na rys. 11 zgodne są z doświadczeniem przeprowadzonym na odcinku włókna ok. 20 km przy  $\lambda = 1060$  nm dla zerowej liniowej dyspersji przy tej długości fali.

W innych okolicznościach /po odstrojeniu się od  $\lambda$  z zerową liniową dyspersją/ można oczekiwać i obserwuje się tzw. propagację solitonową. Jest to zjawisko znane z innych dziedzin fizyki, opisywane m.in. równaniem Kortewega-de Vriesa, polegające na propagacji odosobnionych impulsów.

Pod wpływem dużych mocy przesyłanych w światłowodzie można także zaobserwować [10] zjawiska nieliniowego tłumienia wywołujące wymuszone rozproszenie Brillouina /rozproszenie na fali ultraakustycznej wytworzonej pod wpływem silnej fali optycznej/ oraz wymuszone rozproszenie Ramana /wytwarzanie się dodatkowych fal typu  $\omega \pm n\Omega$  gdzie  $\Omega$  - częstotliwość drgań własnych molekuł, zaś  $\omega$  częstotliwość nośna fali optycznej/.

Zjawiska nieliniowe w światłowodach są równie ważne co interesujące. Z jednej strony mogą one odgrywać rolę negatywną zmniejszając efektywność transmisji, z drugiej zaś mogą dostarczyć dodatkowych środków technicznych pomocnych w transmisji, a nieosiągalnych w układach liniowych.

## 5. KABLE ŚWIATŁOWODOWE I OSPRZĘT.

Ze względu na oczywistą potrzebę ochrony światłowodów przed wpływami zewnętrznymi /głównie siłami mechanicznymi/ światłowody są kablowane, podobnie jak przewody miedziane w tradycyjnych kablach telekomunikacyjnych. Oczywiście oprócz głównych funkcji ochronnych kable spełniają ponadto ważne funkcje "organizacyjne", grupując w sposób uporządkowany i dobrze "upakowany" wiele światłowodów w ograniczonej przestrzeni-kablu.

Z punktu widzenia sposobu ułożenia światłowodu w kablu, struktury kablowe [12] dzieli się na:

- tzw. "ściśnięte" oraz
- tzw. "luźne".

Struktura "ściśnięta" odznacza się całkowitym zespoleniem ośrodka kablowego ze światłowodem. Głównym przykładem tej struktury jest kabel paskowy mający postać płaskiej warstwy tworzywa z zatopionymi w nim światłowodami. Podobnie może być strukturą ściśniętą koncentryczna konstrukcja w postaci kabla o przekroju kołowym, zawierająca pewną liczbę światłowodów rozmieszczonych wokół elementu nośnego, zatopionych wraz z tym elementem w tworzywie plastycznym.

Struktury "luźne" odznaczają się swobodnym ułożeniem światłowodów w kablu w jego wolnych przestrzeniach specjalnie wydzielonych dla jednego lub kilku światłowodów. W ten sposób w strukturach takich światłowód nie jest, jak poprzednio, trwale zespalany z ośrodkiem ochronnym kabla. W zastosowaniach telekomunikacyjnych dziś występują wyłącznie kable o strukturach luźnych, gdyż tylko one pozwalają uzyskać korzystne parametry transmisyjne światłowodu pozbawionego zbędnych naprężeń mechanicznych i niepotrzebnych zgięć, których istnienie wpływa powiększając na tłumienie  $\alpha$  toru.

Obecnie za najbardziej reprezentatywne i rozpowszechnione struktury luźne uznać trzeba:

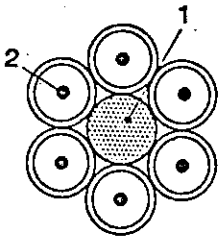
- strukturę "rurkową" i
- strukturę "rozetkową".

Obie te struktury w poprzecznych przekrojach kabla światłowodowego pokazuje rys. 12.

W każdej strukturze, czy to ściśniętej czy luźnej, światłowody nie powinny stanowić elementu nośnego, tj. przenoszącego siły wzdłużne przyłożone do kabla. Dlatego oprócz wypełnienia macą plastyczną i osłon zewnętrznych /w tym ewentualnie metalowych/, kable światłowodowe posiadają ele-

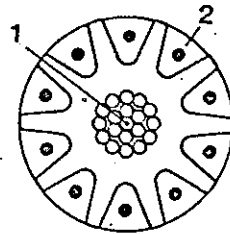
menty nośne na ogół centralnie umieszczone /rys. 12/. Elementy te mogą być metalowe /linka stalowa/ lub dielektryczne /kewlar, lub linka z włókien szklanych/. W tym ostatnim przypadku /jeśli kabel nie ma innych elementów metalowych-osłon/ cały kabel nazywany jest dielektrycznym.

a)



- 1) Centralny element  
nośny (zbrojenie)  
2) Światłowod w rurce

b)



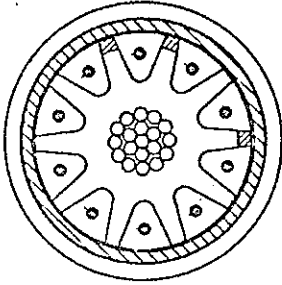
- 1) Centralny element  
nośny (zbrojenie)  
2) Światłowod w rowku

Rys. 12. Struktura rurkowa i rozetkowa światłowodowego kabla telekomunikacyjnego

Struktura luźna rozetkowa /rys. 12b/ wynaleziona w CNET we Francji, wykorzystywana w kablach produkowanych przez francuskie firmy SAT i SILEC, ma w stosunku do struktury rurkowej szereg zalet [12], w tym głównie: większą wytrzymałość na zgniatanie oraz pewne udogodnienia produkcyjne. Francuskie kable rozetkowe mają strukturę modułową, przy czym modułem podstawowym jest kabel 10-włóknowy o przekroju pokazanym na rys. 13a. Jeśli występuje on jako kabel samodzielny, to może mieć na zewnątrz dwie warstwy ochronne - jedna w postaci taśmy aluminiowej, druga w postaci warstwy plastikowej /polietylenowej/.

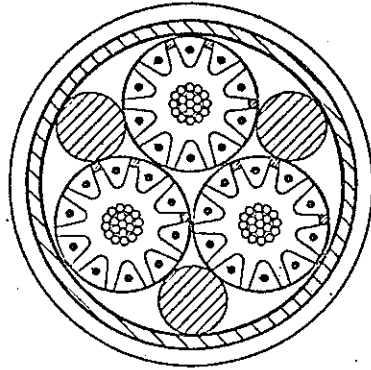
Kabel może być wielomodułowy: dwumodułowy czyli 20-włóknowy trzymodułowy, siedmiomodułowy i 21-modułowy /patrz rys. 13/. Na zewnątrz, jak w przypadku kabla jednomodułowe-

a)



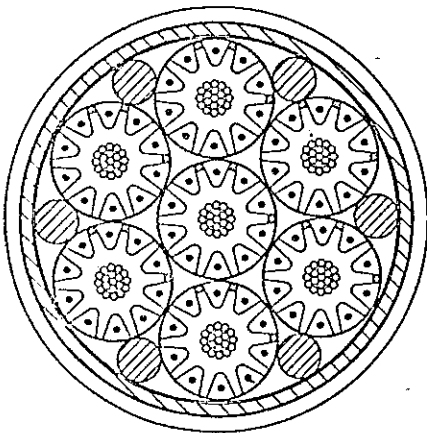
Kabel 10-włóknowy

b)



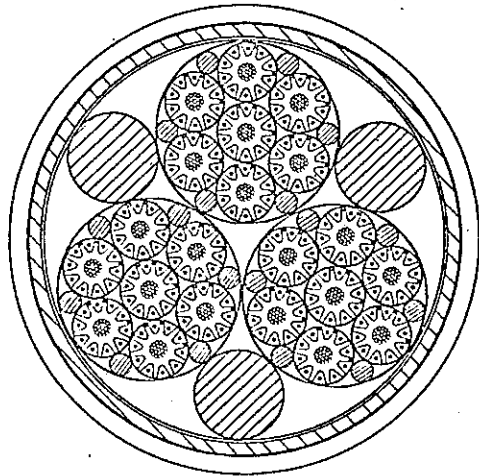
Kabel 30-włóknowy

c)



Kabel 70-włóknowy

d)



Kabel 210-włóknowy

Rys. 13. Struktury przekrojów poprzecznych  
kablów rozetkowych



go są dwie warstwy ochronne. Każdy moduł owijany jest ponadto przeciwbieżnie dwiema taśmami plastikowymi dla zabezpieczenia światłowodów przed wypadaniem z rowków rozetki. Rowki przed tym owinięciem mogą być napełniane żelam zabezpieczającym światłowody przed wilgocią. Żel musi być na tyle rzadki, by światłowód mógł w nim swobodnie pływać.

Jak wspomniano, podstawowym modułem /kablem/ jest moduł 10-włóknowy, kiedy w każdym rowku jest jeden światłowód. Z informacji uzyskanych w SAT wynika, że w jednym rowku można umieszczać nawet trzy światłowody, co oczywiście zwiększa "upakowanie" kabla.

Produkcja kabli rozetkowych we Francji jest w pełni oprowadzona, piszący zaś te słowa miał możliwość zapoznania się z nią w grudniu 1984 r. Produkcja ta przebiega w trzech fazach.

Fazą pierwszą jest wyprodukowanie rdzenia-rozetki z centralnie umieszczonym zbrojeniem wewnętrznym metalowym lub dielektrycznym. Proces ten realizuje jedna linia produkcyjna. Na wejściu linii znajduje się bęben z nawiniętym zbrojeniem /linką/. Dalej na linii znajduje się wyciągarka plastiku /poli-propylenu/ na gorąco, z którego tłoczy się rdzeń w kształcie rozetki otaczającej zbrojenie. Tłoczenie następuje przez precyzyjną głowicę, która ponadto wykonuje powolny ruch obrotowy nadający wyźłobieniom rozetki kształt spiralny wzdłuż osi rdzenia. Po wytłoczeniu rdzeń jest chłodzony w wannach w kąpielu wodnej i składowany luźno na wyjściu linii w pojemniku w kształcie beczki. W tej fazie produkcyjnej, w momencie tłoczenia, następuje dodatkowe zabarwienie trzech z dziesięciu garbów rozetki, co zaznaczono na rys. 13 przez zakreskowanie szczytów garbów zabarwionych. Owe zabarwienia stanowią kod identyfikacyjny światłowodów: światłowód nr 1 leży w rowku pomiędzy dwoma najbliższymi garbami barwionymi, trzeci zabarwiony wskazuje kierunek odliczania następnych /drugiego, trzeciego i dalszych/ światłowodów. System taki przyjęto w firmie SAT. Firma SILEC rozetki nie barwi, koloruje natomiast odpowiednio światłowody, co również pozwala na ich identyfikację.

Fazę drugą jest proces ułożenia w rozetce-rdzeniu światłowodów, co realizuje odrębna linia produkcyjna. Na jej wejściu umieszczany jest pojemnik-beczka z uprzednio wyprodukowanym rdzeniem. Rdzeń przeciągany jest w sposób kontrolowany przez całą tę linię. Linia realizuje proces układania światłowodów w rowkach rozetki, przy czym pobieranie włókien następuje z dziesięciu szpul znajdujących się we wspólnym koszu, który obraca się synchronicznie, zgodnie z kształtem spirali wyżłobień rozetki na rdzeniu. Szpule-pojemniki dla światłowodów mają swój dodatkowy napęd synchroniczny, tak by wysnuwanie z nich światłowodów odbywało się całkowicie luźno bez żadnych zbędnych naprężeń poślówowych. Układanie światłowodów w rowkach realizują specjalne prowadnice leżące czubkami w dnie rowków. Bezpośrednio po ułożeniu rdzeń owijany jest przeciwbieżnie dwiema taśmami plastikowymi co, jak już wspomniano, zabezpiecza światłowody przed wypadaniem z rowków. Czynność ta może być poprzedzona wprowadzeniem do rowków żelu przeciwwilgociowego. Bezpośrednio po tym następuje nawinięcie tak przygotowanego rdzenia ze światłowodami na bęben stojący na wyjściu linii produkcyjnej. W trakcie przesuwania rdzenia przez tę linię produkcyjną rdzeń ten, ciągnięty za element nośny /zbrojenie/, jest poddany wstępnemu naprężeniu, co w kontrolowany sposób rdzeń nieco rozciąga. Światłowody układane są więc w rdzeń rozciągnięty. Przed nawinięciem na bęben /na wyjściu/ siła rozciągająca jest zdjęta, rdzeń ze światłowodami powraca do swoich normalnych wymiarów i układa się na bębnie względnie luźno. W ten sposób zapewnia się pewien nadmiar w długości ułożonych w rdzeniu światłowodów, co gwarantuje ich swobodne układanie się w rowkach kabla. Ponadto przy późniejszym zaciąganiu kabla w kanalizację z kontrolowaną siłą naciągu, nie narusza się w ogóle struktury światłowodów w kablu.

Opisana powyżej druga faza procesu produkcyjnego kabli jest typowa dla firmy SAT. Firma SILEC fazę tę realizuje nieco odmiennie. Tu mianowicie kosz ze światłowodami unierucho-

miono, natomiast poddano dodatkowemu obrotowi /synchronicznie ze spiralą rdzenia/ bęben na wyjściu, który w ten sposób, oprócz ruchu obrotowego wokół osi bębna, wykonuje również ruch obrotowy wokół osi prostopadłej do osi bębna.

Fazą trzecią jest nałożenie na tak przygotowany /jak podano wyżej/ moduł 10-światłowodowy /lub na kilka modułów/ zewnętrznych warstw ochronnych. Są nimi: warstwa aluminiowa, wytwarzana z taśmy identycznie jak w kablach tradycyjnych, oraz na zewnątrz warstwa polietylenu. Kable w pełni dielektryczne warstwy metalowej nie posiadają.

Warto podkreślić, że przed okablowaniem światłowody w fabryce kablowej poddawane są 100-procentowej kontroli fabrycznej ich podstawowych parametrów.

Podstawowe parametry techniczne kabli jednomodułowych produkcji firmy SAT [12] w wersji z elementami metalicznymi i w wersji dielektrycznej podaje tablica 1.

Tablica 1

Rodzaj kabla	Kabel z elementami metalowymi	Kabel dielektryczny
Liczba światłowodów	10	10
Minimalny promień krzywizny [mm]	250	50
Maksymalna siła rozciągająca [da N]	70	120
Wytrzymałość na zgniatanie [ $\frac{\text{da N}}{\text{cm}}$ ]	20	20
Zakres temperatury [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-10, +40	-40, +55
Srednica nominalna [mm]	10,5	8,5
Maksymalna masa jednostkowa [ $\frac{\text{kg}}{\text{km}}$ ]	120	55

Dodatkowo zauważamy, że dobrej jakości kable po zdjęciu ich z bębna i zaciągnięciu w kanalizację wykazują nieco mniejsze tłumienie niż w stanie nawinięcia na bęben. Jest to zrozumiałe, gdyż po "wyprostowaniu" kabla, światłowody układają się w kablu swobodnie, bez niepotrzebnych zgięć, co zmniejsza  $\alpha$ .

W fabryce kable budowane są w odcinkach o skończonej długości, w tzw. odcinkach fabrykacyjnych. Np. w firmie SAT odcinki te mają nominalną długość 1,2 km. Przy budowie linii kablowej wymaga to łączenia takich odcinków w odcinki wielokrotnie dłuższe, co wynika z właściwości systemu teletransmisyjnego.

Trwałe łączenie kabli i światłowodów odbywa się za pomocą odpowiednich hermetycznych muf, wewnątrz których ukryte są trwałe połączone światłowody. Łączone są one metodą spawania lub b.precyzyjnego klejenia. Spawanie odbywa się bądź to metodą zgrzewania w płomieniu gazowym, bądź w łuku elektrycznym, bądź za pomocą laserów o odpowiednio dużej mocy. Problem trwałego łączenia światłowodów w łuku elektrycznym / z bardzo małą tłumiennością spawu - rzędu ok. 0,1 dB/ został w kraju /w Instytucie łączności/ opanowany.

W wielu okolicznościach zachodzi potrzeba posiadania połączeń rozłącznych. Również i ten problem został w kraju /w IŁ/ opanowany - dysponujemy złączami o wnoszonej tłumienności rzędu 0,3 dB.

Oprócz złączy /stałych i rozłącznych/ ważne są również rozgałęźniki, sprzęgane i inne bierne elementy światłowodowe.

W ogólności wymagany osprzęt kablowy dla tej techniki to bardzo subtelne i precyzyjne narzędzia, które wraz ze światłowodem i kablem decydują o końcowym sukcesie technicznym.

## 6. ŹRÓDŁA I ODBIORNIKI ŚWIATŁA W SYSTEMACH ŚWIATŁOWODOWYCH

W punkcie tym przedstawimy krótki opis parametrów "zewnętrznych" stosowanych dziś źródeł i odbiorników światła,

nie wnikając w procesy fizyczne warunkujące działanie tych przyrządów.

Jak już wspomniano poprzednio, w charakterze źródeł światła koherentnego /lub prawie koherentnego/ używa się obecnie diod elektroluminescencyjnych /LED/ oraz diod laserowych /DL/.

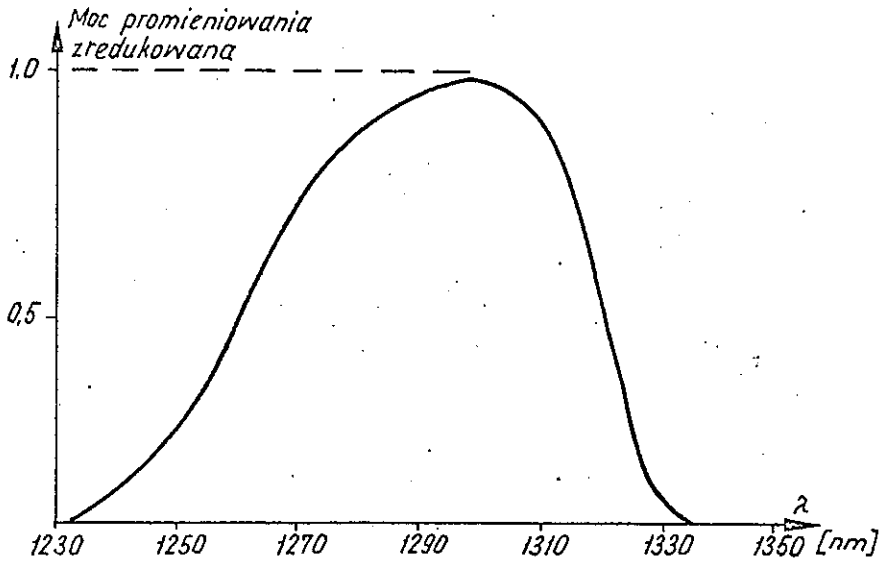
W pierwszym oknie transmisji wykorzystuje się diody elektroluminescencyjne lub lasery typu GaAlAs, w drugim zaś i trzecim oknie - typu InGaAsP. Diody LED charakteryzują się dość dużą /rzędu 50 nm/ szerokością widma emitowanego promieniowania i mocą emisji rzędu kilkudziesięciu mW.

Dla LED-ów, w pierwszym oknie transmisji uzyskuje się pasmo modulacyjne rzędu kilkudziesięciu MHz, w drugim zaś oknie - rzędu 1 GHz.

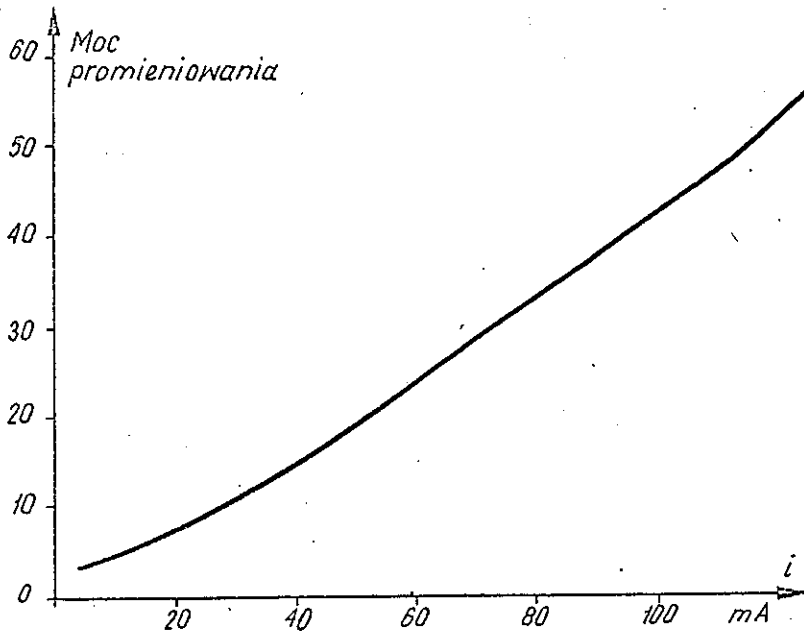
Lasery /DL/ mają znacznie węższe widmo emitowanego promieniowania /rzędu na ogół kilku nm, przy czym uzyskuje się nawet b. małe wartości - rzędu 0,01 nm/, znacznie większą moc emisji /rzędu kilkaset mW/ oraz większe pasmo modulacyjne /rzędu kilku, a nawet kilkudziesięciu GHz/.

Charakterystyki modulacyjne diod elektroluminescencyjnych /tj. zależność mocy promieniowanej od prądu wzbudzenia/ są liniowe z małym prądem ciemnym, laserów zaś są nieliniowe, z przegięciem w punkcie powstania zjawiska generacji laserowej. Dodatkowo wartość prądu w tym punkcie jest silnie zależna od temperatury. Ostatnio zjawisko to zostało opanowane przez rozbudowę układu lasera. Wszystko to powoduje jednak, że laser jest urządzeniem znacznie bardziej skomplikowanym i droższym, lecz o lepszych parametrach technicznych. Obecnie produkowane DL występują w postaci głowic laserowych, zawierających oprócz lasera właściwego pomocniczą fotodiode pomiarową mocy promieniowanej i stabilizator punktu pracy lasera.

Do niedawna lasery ustępowały diodom elektroluminescencyjnym znacznie krótszym czasem życia. Obecnie czasy życia zarówno LED jak i DL są współmierne, przy czym osiągnięto



Rys. 14. Widmowa charakterystyka promieniowania diody elektroluminescencyjnej w zakresie  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$



Rys. 15. Charakterystyka modulacyjna diody elektroluminescencyjnej

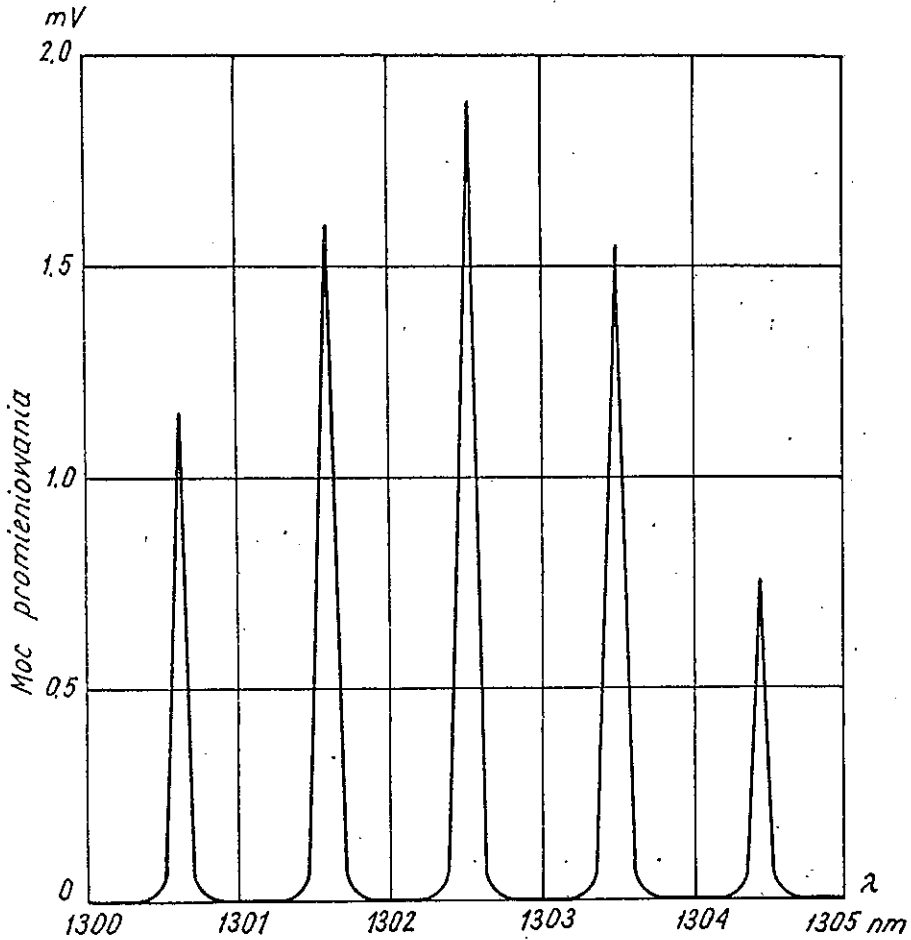
tu wartość rzędu 10 i więcej lat. Są nawet doniesienia [13] o istnieniu DL o czasie życia rzędu  $10^6$  godzin, czyli 100 lat.

W telekomunikacji, gdzie apertura numeryczna światłowodów  $NA < 0,3$ , stosuje się prawie wyłącznie diody elektroluminescencyjne emitujące bocznie, tj. poprzecznie w stosunku do złącza /istnieją również diody emitujące czołowo, czyli w kierunku działania złącza/. LED-y te nazywane są krawędziowymi i oznaczane symbolem ELED /edge LED/. Przykładowe [14] charakterystyki optoelektronicznych przyrządów nadawczych pokazują rysunki 14, 15, 16.

Na obecnym etapie rozwoju systemów światłowodowych w charakterze odbiorników światła koherentnego wykorzystywane są światłoczułe diody półprzewodnikowe pracujące jako detektory światła. W pierwszym oknie transmisji podstawowym materiałem do budowy tych diod jest krzem. Wykorzystywany jest również GaAs. Przeważnie wykorzystuje się krzemowe fotodiody lawinowe /APD/. Sprawność kwantowa tych diod, a więc czułość, jest duża. Przeciętnie czułość ma wartość rzędu 0,5 A/W na poziomie mocy odbieranej rzędu 50 nW. Szerokość pasma przenoszenia jest duża i sięga rzędu kilku GHz.

W drugim i trzecim oknie transmisji wykorzystywany jest german, lecz lepsze właściwości mają inne znane już materiały /głównie ze względu na mniejszy prąd ciemny, który decyduje o poziomie szumów/. Wykorzystuje się tu głównie InGaAs oraz specjalnie dla  $\lambda \approx 1,3 \mu\text{m}$  związki HgCdTe, które dają możliwość zbudowania diody lawinowej.

Na ogół dla zakresów długofalowych stosuje się konstrukcję diody w formie diody typu "pin" połączoną z tranzystorem polowym. Taką konstrukcję oznacza się symbolem PIN-FET. Czas życia fotodiod jest bardzo duży i sięga wartości  $10^7$  godz.



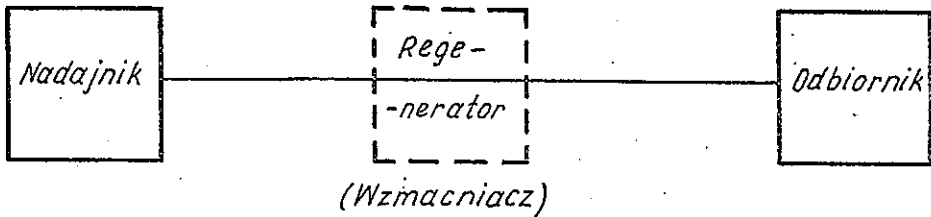
Rys. 16. Widmowa charakterystyka promieniowania diody laserowej w zakresie  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$

## 7. SYSTEMY TELEKOMUNIKACYJNE

Głównym, a może nawet jedynym jak dotąd, polem zastosowań techniki światłowodowej w telekomunikacji jest teletransmisja. Typowy uproszczony schemat systemu teletransmisyjnego światłowodowego pokazuje rys. 17. System jak zwykle zawiera



nadajnik i odbiornik połączone torem światłowodowym, w którym mogą być urządzenia wzmacniające /regenerujące/.



Rys. 17. Uproszczona struktura teletransmisyjnego toru światłowodowego

Oprócz oczywistych funkcji głównych, jakie muszą spełniać nadajnik i odbiornik optycznej fali modulowanej, inną ważną funkcją, jaką spełniają te końcówki, jest funkcja nadzoru nad takim traktem transmisyjnym. Z reguły końcówka odbiorcza ma za zadanie wykazywać następujące główne nieprawidłowości [18]:

- brak sygnału w torze,
- złą jakość transmisji,
- degradację elementu nadawczego,
- uszkodzenia w układach kodujących i dekodujących,
- uszkodzenia w układzie zasilania.

Zawarty w urządzeniu końcowym układ lokalizacji uszkodzeń nadaje sygnały alarmowe w przypadku wystąpienia jednego z wymienionych uszkodzeń.

W przypadku transmisji cyfrowej PCM, która dominuje w systemach światłowodowych, w końcówce nadawczej następuje przekształcenie kodu wewnętrznej krotnicy w odpowiedni kod światłowodowy /liniowy/. Najczęściej wybieranym kodem jest kod typu mBnB, zamieniający sekwencję m bitów kodu wejściowego w n bitów kodu wyjściowego /liniowego/, przy czym  $n > m$ .

Zadaniem kodu liniowego jest zapewnienie możliwie najlepszej jakości transmisji w systemie.

W licznych, typowych przypadkach, przy dobrej jakości włókna, nie ma potrzeby stosowania regeneracji /lub wzmacniania/ sygnału w torze transmisji, co jest niewątpliwą zaletą systemów światłowodowych. Regeneracja /lub wzmacnienie/ sygnału jest konieczna w zasadzie tylko w połączeniach dalekośiężnych /w sieciach międzymiastowych i międzynarodowych/.

Właściwości obecnie stosowanych elementów nadawczych /źródeł/ i odbiorczych /detektorów/, o których mowa była poprzednio, decydują o rodzaju stosowanej modulacji i detekcji sygnałów w systemie. Jedyne, praktycznie wykorzystywany obecnie rodzaj detekcji bezpośredniej oraz szerokie widmo emisji źródeł LED narzucają jako jedyną w zasadzie możliwą dziś modulację intensywności promieniowania optycznego. Modulacja intensywności /amplitudy/ dopuszcza modulację analogową i impulsową. Najbardziej naturalną dla tych systemów jest modulacja impulsowa, zwłaszcza zaś impulsowokodowa wobec jej rozpowszechnienia w sieciach telekomunikacyjnych.

W tej sytuacji teletransmisyjne systemy światłowodowe są najczęściej systemami cyfrowymi. Odnosi się to przede wszystkim do systemów teletransmisyjnych służących głównie transmisji sygnałów teleoptycznych. W przypadku teletransmisji służącej przekazywaniu w sieciach kablowych sygnałów telewizyjnych jak dotąd równie często stosuje się modulację analogową. Przykładem takiego rozwiązania może być światłowodowa sieć telewizji kablowej miasta Biarritz [15].

Prowadzi się wprawdzie badania nad innymi rodzajami modulacji /częstotliwości, fazy/ oraz odbiorem heterodynowym, co zwiększyłoby czułość odbiornika o ok. 20 dB, wymaga to jednak odbieranej fali optycznej koherentnej i nowej techniki odbioru [16, 17]. Ze względów oczywistych /znaczące zwiększenie zasięgów w systemach bezregeneratorowych/ badania te są b.ważne.

Z wyżej podanych informacji wynika, że w teletransmisji światłowodowej z powodzeniem mogą być wykorzystywane zarówno systemy z podziałem czasowym TDM, jak i podziałem częstotliwościowym FDM, jakkolwiek zdecydowane pierwszeństwo daje się obecnie systemom cyfrowym TDM. W systemach światłowodowych wyodrębnia się ponadto systemy WDM /wave length division multiplexing/, wykorzystujące podział falowy, czyli kilka fal nośnych w tym samym włóknie transmisyjnym /każda z tych fal może być modulowana na zasadzie TDM lub FDM/. Konkretny system WDM obejmować może zarówno jedno, jak też więcej "okien" transmisyjnych.

Przy dzisiejszych, już dostępnych możliwościach /lasery koherentne, włókna jednomodowe z b.małą tłumiennością i zerową lub b. małą dyspersją/ osiągalne są już zasięgi bezregeneratorowe rzędu 100 km i więcej dla systemów cyfrowych PCM o przepływności 140 Mb/s. A jeśli uwzględnimy możliwości odbioru heterodynowego, to zasięgi te muszą być znakomicie powiększone /20 dB poprawy czułości odpowiada, przy tłumieniu włókna ok. 0,2 dB/km, zwiększeniu zasięgu o ok. 100 km/.

Podstawowe zagadnienie projektowania systemu teletransmisyjnego - problem rozkładu tłumienności i zasięgu systemu ilustruje następujący przykład.

Założmy, że chcemy zaprojektować system teletransmisyjny o przepływności 34 Mb/s w drugim oknie transmisji /  $\lambda \approx 1300$  nm/ z wykorzystaniem światłowodu gradientowego. Przyjmijmy, że mamy do dyspozycji nadajnik laserowy o poziomie mocy

$$P_n = -0,3 \text{ dBm}$$

i odbiornik typu PIN-FET o czułości

$$P_o = -46,5 \text{ dBm.}$$

Przypuśćmy, że nadajnik połączony jest z kablem światłowodowym włóknem stacyjnym o tłumienności

$$\alpha_s = 0,7 \text{ dB}$$

Dodajmy do tego pewien konieczny margines bezpieczeństwa

$$\alpha_b = 1,8 \text{ dB}$$

Uwzględniając powyższe mamy poziom mocy nadawanej na wejściu kabla

$$P'_n = P_n - \alpha_s - \alpha_b = -2,8 \text{ dBm}$$

Po stronie odbiorczej również uwzględniamy niezbędne poprawki w bilansie tłumienia /niech poprawka ta  $\alpha_o = 3,7 \text{ dB/}$ , co wyznacza czułość odbiornika na poziomie

$$P'_o = P_o + \alpha_o = 42,8 \text{ dBm}$$

Tak więc różnica poziomów pomiędzy wejściem i wyjściem kabla wynosi

$$P = |P'_o| - |P'_n| = 40 \text{ dB}$$

Wartość  $P$  nazywana jest potencjałem systemu i wyznacza zasięg systemu. Dla wyznaczenia zasięgu bezpiecznego potencjał ten pomniejszymy o 3 dB marginesu bezpieczeństwa.

Stąd

$$P' = P - 3 \text{ dB} = 37 \text{ dB}$$

Potencjał  $P'$  odpowiada pełnemu tłumieniu kabla światłowodowego. Tłumienie, to dla włókna gradientowego winno wynieść

$$\alpha \approx 1,2 \text{ dB/km}$$

Dodajmy do tego tłumienia spawów /po 0,2 dB na spaw/ i przyjmijmy, że mamy do czynienia z kilometrowymi odcinkami fabrycznymi. Wówczas kabel ma jednostkowe tłumienie

$$\alpha' = 1,4 \text{ dB/km}$$

Stąd ostatecznie zasięg systemu, albo inaczej długość odcinka międzyregeneratorowego /jeśli dopuszcza się istnienie regeneratorów/, wynosi

$$L = \frac{P'}{\alpha'} = \frac{37}{1,4} = 26,4 \text{ km}$$

Przeprowadzony rachunek musi być sprawdzony ze względu na drugi ważny parametr transmisyjny - dyspersją systemu. Często bywa ona określana jako pasmo przenoszenia odcinka jednostkowego i mierzy się iloczynem jednostek częstotliwości i odległości - [MHz · km]. W takim przypadku sprawdzenie rachunku polega na obliczeniu szerokości pasma odcinka o długości  $L = 26,4 \text{ km}$  i jego porównaniu z wymaganym pasmem dla systemu o danej przepływności. Jeśli pasmo przepustowe odcinka  $L$  jest wystarczające, to rachunek oparty o bilans mocy uznajemy za poprawny.

Przykład powyższy wskazuje, w jaki sposób określone parametry systemu wpływają na jego kształt główny. Jak widać, do najważniejszych należą: tłumienie włókna  $\alpha$ , moc nadajnika  $P_n$ , czułość odbiornika  $P_o$  i pasmo przenoszone przez światłowód /czyli dyspersja/. Te właśnie parametry były przedmiotem dyskusji w głównych punktach tego opracowania.

Dzisiejsze możliwości techniczne teletransmisyjnych systemów światłowodowych pozwalają na stwierdzenie, że systemy te mogą być z powodzeniem stosowane w dowolnych płaszczyznach sieci telekomunikacyjnych.

Dotyczy to [19]:

- sieci dalekosiężnej.
- sieci międzycentralowej.
- sieci abonenckiej.

W sieciach dalekosiężnych /międzydzielcowych i międzynarodowych/ stosuje się systemy wysokokrotne, które w zależności od konfiguracji sieci obsługują linie transmisyjne o rozciągłości od kilkudziesięciu do kilku tysięcy kilometrów. W tym obszarze zastosowań systemy światłowodowe cyfrowe zarówno, ze względu na ekonomikę /małą gęstość regeneratorów wygody eksploatacyjne i inwestycyjne i inne czynniki w porównaniu z systemami klasycznymi/, jak też i jakość transmisji, zaczynają wykazywać zdecydowaną przewagę w stosunku do systemów do tej pory stosowanych. Wkrótce będzie się to odnosiło nawet do łączności satelitarnej, która na-  
potka wkrótce naturalny czynnik ograniczający w postaci skończonej pojemności orbity geostacjonarnej.

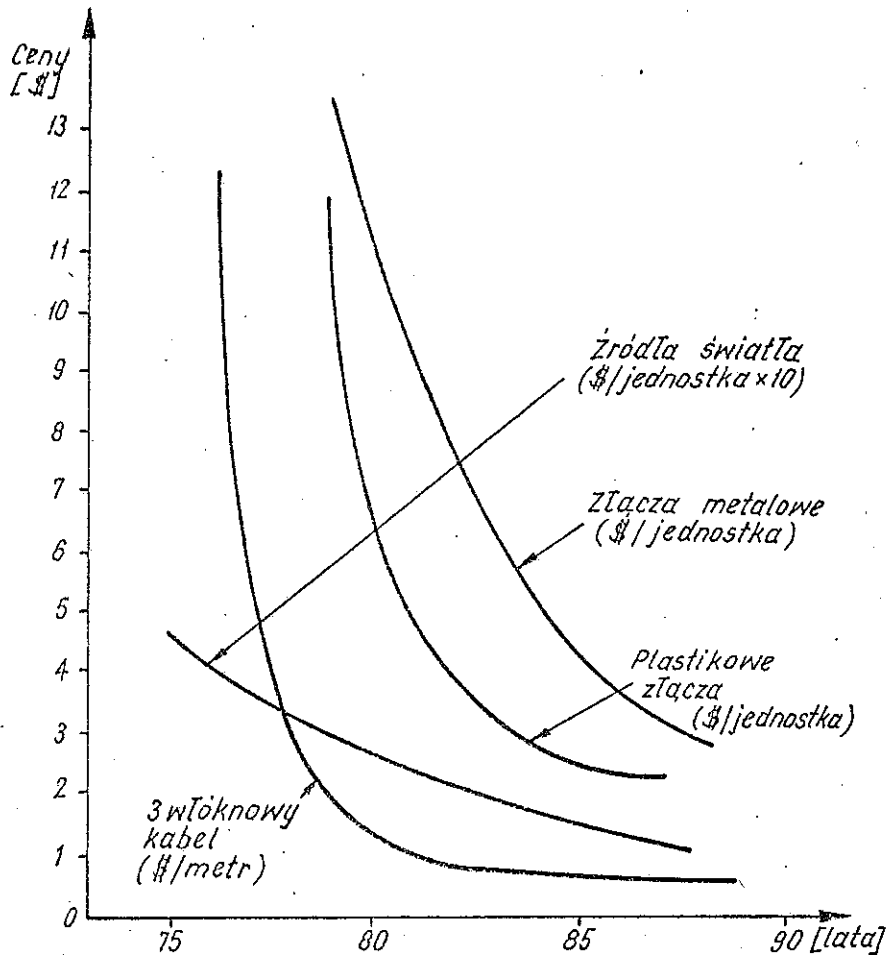
W obecnym stanie rozwoju systemów cyfrowych w sieciach dalekosiężnych znajdują zastosowania systemy 34 Mb/s, 140 Mb/s i wkrótce o wyższych przepływnościach /560 Mb/s i więcej/. W tej płaszczyźnie sieci największą przyszłość mają systemy wykorzystujące włókna jednomodowe oraz drugie i trzecie okno transmisji.

W sieciach międzycentralowych, gdzie odległości obsługi są rzędu do 20 km /przeciętna w sieciach europejskich wynosi ok. 12 km/, a pojemności wiązek łączy nie przekraczają kilkuset, typowymi systemami cyfrowymi są systemy o przepływnościach 2, 8 i pewnej mierze 34 Mb/s. W tej płaszczyźnie sieci możliwe jest skuteczne wykorzystanie systemów pierwszej generacji /pierwsze okno transmisji, ew. drugie okno, kabel gradientowy wielomodowy/ i to w większości sytuacji w wersjach bezregeneratorowych. Możliwość ta jest również, zarówno technicznie jak i ekonomicznie, znacznie korzystniejsza niż rozwiązania tradycyjne /z kablem miedzia-

nym/, jeśli trzeba podejmować nowe inwestycje. W przypadku wykorzystania kabli istniejących zastosowanie systemów tradycyjnych, ze względu na dość wysokie jeszcze ceny kabli światłowodowych, może być korzystniejsze. W pewnych specyficznych sytuacjach niezależnie od kalkulacji ekonomicznych rozwiązania światłowodowe są jedynymi możliwymi do zastosowania.

W sieciach telefonicznych abonenckich zastosowanie technik światłowodowych jest nieekonomiczne i na razie w najbliższej przyszłości mało prawdopodobne. Natomiast dla szerokopasmowych sieci abonenckich /dystrybucja sygnałów telewizji, stereofonia wysokiej jakości, dostęp i łączność interakcyjna do banków danych i ośrodków typu telewizyjnego, wizjofonia/ jest to prawdopodobnie idealna technika realizacyjna. W sieciach takich, gdzie odległości transmisji nie przekraczają kilku kilometrów, problem regeneracji w ogóle nie istnieje. Mogą tu być wykorzystywane systemy najprostsze i najtańsze /pierwsze okno transmisji, kable gradientowe, podział widma WDM/TDM lub WDM/FDM/. Oczywiście w sieciach takich realizowana byłaby również najpowszechniejsza dziś usługa - telefonia. Dodajmy jednak, że nigdzie jeszcze na świecie tak rozumiane /jak powyżej/ sieci abonenckie nie zostały na szeroką skalę rozwinięte.

Problem szybkości wnikania systemów światłowodowych w istniejące sieci telekomunikacyjne i wpływu osiągnięć w tej dziedzinie na tworzenie nowych usług /szerokopasmowe sieci abonenckie/, jest już dziś głównie problemem ekonomicznym. Dobrą ilustracją dzisiejszych problemów ekonomicznych rozwoju techniki światłowodowej jest wykres zmian cen w USA podstawowych składowych systemów światłowodowych w czasie, zamieszczony w czasopiśmie "Telephony" [13]. Wykres ten podajemy na rys. 18. Z rysunku widać, że ceny podstawowego wyposażenia systemów światłowodowych radykalnie w latach osiemdziesiątych zmalały i maleją nadal. Oznacza to, że wkraczamy w okres szerokiego rozpowszechniania w praktyce systemów światłowodowych.



Rys.18. Zmiany cen elementów systemów światłowodowych w czasie na rynku USA

Wprowadzenie dużej ilości środków transmisji cyfrowej we wszystkie płaszczyzny sieci wraz z rozwojem komutacji elektronicznej postawi na porządku dnia szybciej niż się tego dziś spodziewamy podstawowy problem jakościowego przekształcenia sieci, problem budowy zintegrowanej sieci telekomunikacyjnej.



Dalszy rozwój technik optoelektronicznych i światłowodowych spowoduje prawdopodobnie ich wkroczenie do wnętrza aparatów dziś elektronicznych, zwłaszcza zaś urządzeń systemów komutacyjnych.

## 8. ZAKOŃCZENIE

W opracowaniu niniejszym, głównie ze względu na potrzebę ograniczenia objętości referatu pominięto liczne ważne problemy dotyczące wprost lub pośrednio omawianej dziedziny. Świadomie więc opuszczono tu zagadnienia montażu i eksploatacji, w tym zwłaszcza miernictwa. Pominięto również liczne i ważne szczegółowe zagadnienia systemowe. Autor wyraża jednak nadzieję, że opracowanie to, choć nie pozbawione luk, daje dość dobry pogląd na całość omawianej dziedziny.

## WYKAZ LITERATURY

1. Kao K.S., Hockham G.A.: Proc. IEE, vol. 113, July 1966.
2. Kapron F.P., Keck D.B., Mauer R.D.: Appl. Phys. Lett, vol. 71, December 1970.
3. Van-Uitert L.G., Wemple S.H.: Appl. Phys. Lett, vol. 33, 1978.
4. Miyashita T., Manabe T.: IEEE Journ. Quant Electr., vol. QE-18, 1982.
5. Midwinter J.E.: Światłowody telekomunikacyjne. WNT Warszawa 1983.
6. Smoliński A.: Ekspertyza światłowody 83. PAN, Warszawa 1983.
7. Le Noane G., Giraud P.I., Niquil M., De Vecchis M.: Commutation & Transmission, No 2/3, 1982.
8. Boscher D., Missout B., Cheron P.: Intern. Wire & Cable Symp. Proc., 1981.

9. Midwinter J.E.: Telephony, vol. 207, September 1984.
10. Midwinter J.E.: Telephony, vol. 207, October 1984.
11. Kalata H., Zieliński A.: Archiwum Elektrotechniki, tom XX, zeszyt 4, 1971.
12. Missout B.: Kable światłowodowe i technologia ich produkcji. Referat na sympozjum firmy SAT w Warszawie, 24-25 października 1984 r.
13. Fiber optics has the edge in the battle against copper: Telephony, January 23, 1984.
14. Lusardy P.Y.: Optyczne podzespoły końcowe. Referat na sympozjum firmy SAT w Warszawie, 24-25 października 1984 r.
15. Niquil M.: Od eksperymentu miasta Biarritz do zintegrowanych sieci videokomunikacyjnych. Referat na sympozjum firmy SAT w Warszawie, 24-25 października 1984 r.
16. Jaroszewicz L., Szustakowski M.: Przegląd telekomunikacyjny, nr 2, 1985.
17. Midwinter J.E.: Telephony, February 25, 1985.
18. Foucoult J.: Cyfrowe urządzenia transmisyjne w technice światłowodowej. Referat na sympozjum firmy SAT w Warszawie, 24-25 października 1984 r.
19. Artman J., Zieliński A.: Przegląd Telekomunikacyjny, nr 2, 1985.



ISSN 0209-1046

