



mgr inż. Tomasz Bobruk

Optymalizacja procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych

*Promotor:
dr hab. inż. Andrzej Kowalski*

ROZPRAWA DOKTORSKA

Szczególne podziękowania kieruję do dr hab. inż. Andrzeja Kowalskiego, którego rady i wskazówki przyczyniły się do wyboru tematu i powstania niniejszej pracy.

Dodatkowo, chciałbym podziękować mojej rodzinie za cierpliwość, wyrozumiałość oraz wsparcie przy pisaniu rozprawy.

Rozprawy Doktorskie – Politechnika Lubelska



POLITECHNIKA
LUBELSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I INFORMATYKI

mgr inż. Tomasz Bobruk

Optymalizacja procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych

Promotor:
dr hab. inż. Andrzej Kowalski



Lublin 2022

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	7
ABSTRACT.....	8
1. WSTĘP	9
2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY	10
2.1. TEZA ROZPRAWY	10
2.2. CEL I ZAKRES PRACY	10
3. ZJAWISKO DYSPERSJI CHROMATYCZNEJ	11
3.1. DYSPERSJA CHROMATYCZNA	15
3.1.1. <i>Dyspersja materiałowa</i>	15
3.1.2. <i>Dyspersja falowodowa</i>	17
3.1.3. <i>Obliczenie $dt/d\lambda$</i>	17
3.2. DYSPERSJA MIĘDZYMODOWA	19
3.3. DYSPERSJA CAŁKOWITA.....	20
3.3.1. <i>Światłowody wielomodowe</i>	20
3.3.2. <i>Światłowody jednomodowe</i>	21
4. SYSTEMY TRANSMISJI OPTYCZNEJ.....	33
4.1. DWDM (DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)	33
4.2. METRODWDM (METROPOLITAN DWDM).....	33
5. KOMPENSACJA DYSPERSJI.....	34
5.1. DCF-SMF	34
5.2. SIATKI BRAGA	36
5.3. DC-PCF	38
5.4. DOMIESZKOWANIE FLUOREM	43
6. WYKAZANIE TEZY	46
6.1. NORMALIZACJE, NORMY EUROPEJSKIE	46
6.1.1. <i>Zalecenia ITU-T G.957</i>	46
6.1.2. <i>Zalecenia ITU-T G.691</i>	46
6.1.3. <i>Zalecenia ITU-T G.671</i>	47
6.2. METODY PROJEKTOWANIA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH.....	48
6.2.1. <i>Linia SMF bez kompensacji</i>	48
6.2.2. <i>Linia SMF z kompensatorem DC-SMF</i>	48
6.2.3. <i>Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF</i>	49
6.2.4. <i>Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG</i>	49
6.3. ANALIZA KOSZTOWA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH	54
6.3.1. <i>Linia SMF z kompensatorem DC-SMF</i>	54
6.3.2. <i>Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF</i>	55
6.3.3. <i>Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG</i>	56

7.	PODSUMOWANIE.....	57
8.	LITERATURA.....	59

Optymalizacja procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy omówiono problematykę kompensacji dyspersji chromatycznej w istniejących operatorskich liniach telekomunikacyjnych.

Linie te zostały wybudowane w oparciu o włókna w standardzie ITU G.652 A i B i są stale rozbudowywane poprzez dołączanie linii światłowodowych SMF opartych o najnowsze standardy ITU G.652 D. Z drugiej strony przez lata operatorzy wdrażali niekoherentne systemy DWDM, co powoduje, że przy ciągłym wzroście zapotrzebowania użytkowników na coraz szersze pasmo, właściwe skompensowanie dyspersji w długich liniach, staje się problemem krytycznym. Wymiana tych kabli na nowsze NZDSF z płaską charakterystyką dyspersji chromatycznej nie jest możliwa ze względu na ogromne koszty inwestycyjne.

Z uwagi na konieczność minimalizacji kosztów kapitałowych oraz operacyjnych poszukiwane są rozwiązania atrakcyjne cenowo, które mogą zaspokoić wyżej określone potrzeby przy maksymalnym wykorzystaniu istniejących sieci światłowodowych, jak również zaimplementowanych systemach DWDM.

W rozprawie przedstawiono analizę sposobów poprawy pasma w oparciu o istniejącą infrastrukturę światłowodową, bez wymiany wszystkich istniejących kabli.

Omówiono metody projektowania modyfikacji istniejących traktów światłowodowych, możliwych do wykorzystania w operatorskich traktach światłowodowych. Przedstawiono modele najczęściej stosowane, ale również pokazano inne możliwości osiągnięcia kompensacji dyspersji chromatycznej jeszcze niższym kosztem inwestycyjnym.

Słowa kluczowe: dyspersja chromatyczna, dyspersja światłowodu, kompensacja, DWDM

Optimization of the chromatic dispersion compensation process in operator optical fiber lines

ABSTRACT

In this thesis presents the problems of chromatic dispersion compensation in the existing operator telecommunication lines.

These lines were built on the basis of ITU G.652 A and B fibers and are constantly expanded by adding SMF fiber lines based on the latest ITU G.652 D standards. On the other hand, over the years, operators have implemented incoherent DWDM systems, which causes that with the continuous growth of users' demand for wider and wider bandwidth, proper compensation of dispersion in long lines becomes a critical problem. Replacing these cables with the newer NZDSF with flat chromatic dispersion characteristics is not possible due to the huge investment costs.

Due to the need to minimize capital and operational costs, we are looking for cost-effective solutions that can meet the above-mentioned needs with the maximum use of the existing fiber optic networks as well as the implemented DWDM systems.

Thesis presents an analysis of ways to improve the bandwidth based on the existing fiber-optic infrastructure, without replacing all existing cables.

The methods of designing modifications to the existing optical fiber lines that can be used in operator optical line are presented. The most commonly used models are presented, but also other possibilities of achieving chromatic dispersion compensation with even lower investment costs are shown.

Keywords: chromatic dispersion, optical fiber dispersion, compensation, DWDM

1. WSTĘP

Przez lata, operatorzy telekomunikacyjni budowali sieci DWDM, które w znacznej mierze oparte są o kable światłowodowe SMF w standardzie ITU G.652 A i B [85]. Sieci te są stale rozbudowywane poprzez dołączanie linii światłowodowych SMF opartych o najnowsze standardy ITU G.652 D.

Z drugiej strony, przy dużych nakładach finansowych, operatorzy budowali systemy DWDM, które umożliwiają przenoszenie transmisji o przepływnościach do 40 Gbit/s.

Głównym ograniczeniem dla tego rodzaju transmisji jest istniejąca już infrastruktura wybudowana w oparciu o włókna w standardzie G.652 A i B [85]. Włókna te, mają relatywnie dużą dyspersję. Wymiana tych kabli na nowsze NZDSF z płaską charakterystyką dyspersji chromatycznej [86] nie jest możliwa ze względu na ogromne koszty inwestycyjne [49][69]. Światłowody te mają niższą dyspersję niż światłowody standardowe, lecz niektóre z nich posiadają większe nachylenie charakterystyki dyspersyjnej, co powoduje, że właściwe skompensowanie dyspersji w długich liniach z wykorzystaniem techniki DWDM, staje się problemem krytycznym [30].

Oczywiście, są prowadzone badania nad poszerzeniem pasma [1], których wynikiem jest już osiągnięcie transmisji dla systemów DWDM 8x40 Gbit/s i 8x54 Gbit/s na odcinku 200 km w paśmie 1310 nm [82], a z drugiej strony mamy dziś dostępne systemy koherentne z odbiorem heterodynowym [79][7][83], które umożliwiają przepływności 100 Gbit/s, 200 Gbit/s [47] czy nawet 800 Gbit/s, co sumarycznie daje przepływność rzędu nawet 4 Tbit/s [26][42], i które tolerują dyspersję na poziomie nawet 40000 ps/nm [47]. Jednakże, obserwując sytuację ekonomiczną operatorów telekomunikacyjnych oraz ciągły wzrost zapotrzebowania użytkowników na coraz szersze pasmo [23][24][8], niezbędnym jest, z punktu widzenia operatorów telekomunikacyjnych, minimalizacja kosztów kapitałowych oraz operacyjnych. W związku z tym, poszukiwane są rozwiązania atrakcyjne cenowo, które mogą zaspokoić wyżej określone potrzeby przy maksymalnym wykorzystaniu istniejących sieci światłowodowych, jak również zaimplementowanych systemach DWDM.

2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

2.1. TEZA ROZPRAWY

Metodyka kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych może być optymalizowana jako proces wielokryterialny z uwzględnieniem wypadkowego pasma transmisyjnego, tłumienności toru i nakładów finansowych.

2.2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest przedstawienie analizy sposobów poprawy pasma w oparciu o istniejącą infrastrukturę światłowodową operatorów telekomunikacyjnych, bez wymiany wszystkich istniejących kabli.

W rozprawie omówiono również metody projektowania modyfikacji istniejących traktów światłowodowych, możliwych do wykorzystania w operatorskich traktach światłowodowych. Przedstawiono modele najczęściej stosowane, ale również pokazano inne możliwości osiągnięcia kompensacji dyspersji chromatycznej, jeszcze niższym kosztem inwestycyjnym.

Praca nie obejmuje dyspersji polaryzacyjnej, a skupia się jedynie na aspektach dyspersji chromatycznej.

3. ZJAWISKO DYSPERSJI CHROMATYCZNEJ

Dyspersja transmitowanego sygnału optycznego jest przyczyną zniekształceń zarówno sygnału cyfrowego, jak i analogowego.

Mechanizmy dyspersji we włóknie światłowodowym powodują rozmywanie się transmitowanych impulsów światła podczas ich drogi wzdłuż kanału. Zjawisko to jest przedstawione na rysunku 3.1, gdzie można zaobserwować, że każdy impuls rozszerza się, stając się w końcu nierozróżnialnym na wyjściu. Efekt ten jest znany jako zakłócenia międzysymbolowe (ISI). Wzrasta liczba błędów, jakie pojawiają się w cyfrowym kanale optycznym, w miarę jak efekt ISI staje się wyraźniejszy [78][90].

Zjawisko dyspersji ogranicza maksymalną możliwą szerokość pasma przenoszenia w każdym włóknie optycznym, do poziomu, gdzie poszczególne impulsy światła nie mogą być już dłużej rozróżnialne. Aby nakładanie się impulsów światła w połączeniu światłowodowym nie występowało, szybkość przekazywania informacji (liczba bitów na sekundę wprowadzona do kanału-częstotliwość B_T) musi być mniejsza niż odwrotność czasu trwania poszerzonego przez dyspersję impulsu (2τ). Stąd:

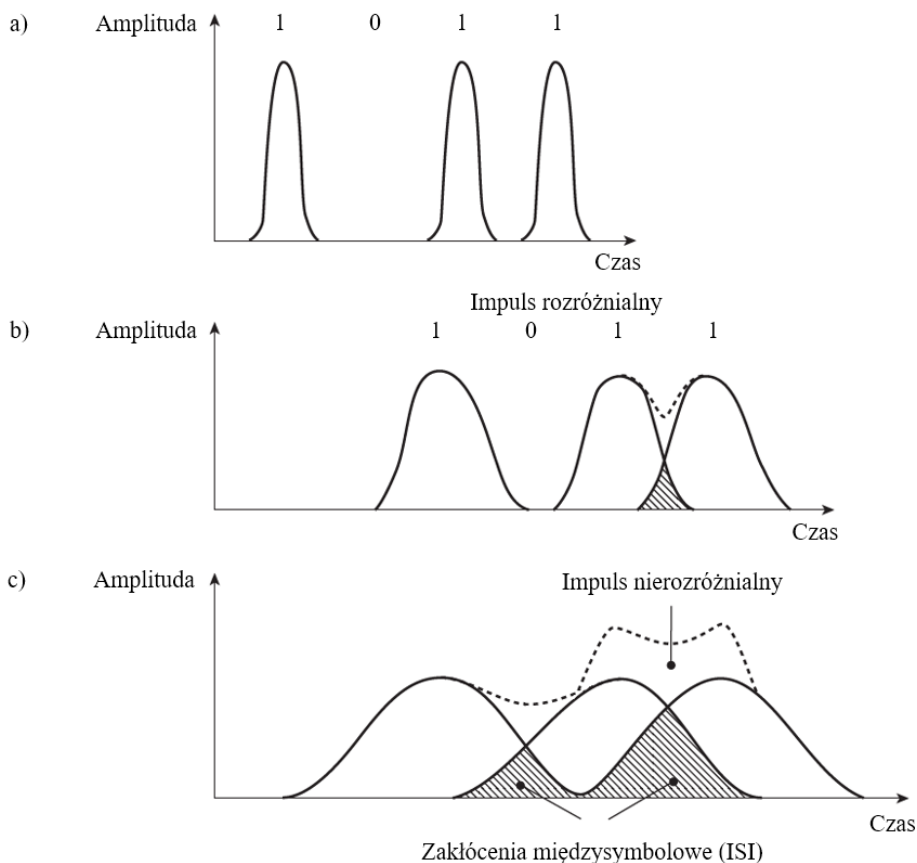
$$B_T \leq \frac{1}{2\tau}. \quad (3.1)$$

Zakładamy, że poszerzenie impulsu powodowane dyspersją w kanale jest równe τ , a z tego wynika, że czas trwania impulsu wejściowego też jest równe τ . Równanie (3.1) daje ostrożne przybliżenie maksymalnej szybkości transmisji bitów, jaka może występować w połączeniu światłowodowym jako $1/2\tau$ [78].

Kolejne, dokładniejsze przybliżenie maksymalnej szybkości transmisji bitów w kanale optycznym, w którym występuje dyspersja, można uzyskać biorąc pod uwagę to, że impuls światła na wyjściu ma kształt krzywej Gaussa z szerokością średniokwadratową [78]. Analiza ta zezwala na istnienie pewnej skończonej liczby sygnałów zachodzących na siebie, natomiast pomija wpływ SNR. Maksymalna szybkość transmisji bitów jest dana przez przybliżenie [78]:

$$B_T(\max) = \frac{0.2}{\sigma} \text{bit } s^{-1}. \quad (3.2)$$

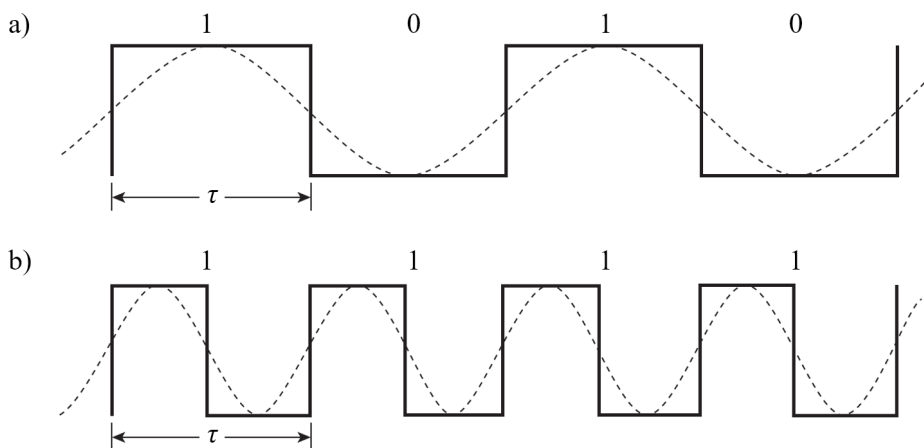
Niektóre źródła podają jako stały składnik w liczniku równania (3.2) równy 0.25. Równanie (3.2) daje wystarczająco dobre przybliżenie dla innych kształtów impulsów jakie mogą występować w kanale, jako rezultat różnych mechanizmów dyspersji we włóknie światłowodowym [78].



Rys. 3.1. Ilustracja poszerzania impulsów światła podczas przejścia przez światłowód przykładowego ciągu bitów: 1011 a) wejście światłowodu; b) wyjście światłowodu o długości L_1 c) wyjście światłowodu o długości $L_2 > L_1$ [78]

Konwersja szybkości transmisji bitów na szerokość pasma w dziedzinie częstotliwości, zależy od użytego formatu kodowania. Dla przewodników metalowych, gdzie używany jest system bez powrotu do zera (nonreturn to zero), tzn., że poziom logicznej jedynki utrzymywany jest przez cały okres τ . W tym przypadku są dwa przedziały bitowe dla jednej długości fali (tzn. 2 bity na sekundę na Hz), jak ilustruje to rys 3.2(a). Stąd maksymalna szerokość pasma B jest połową maksymalnej szybkości transmisji danych:

$$B_T(\text{max}) = 2B. \quad (3.3)$$



Rys. 3.2. Schematyczna ilustracja zależności między przepustowością a długością fali dla kodowania cyfrowego: a) bez powrotu do zera (NRZ) b) z powrotem do zera (RZ) [78]

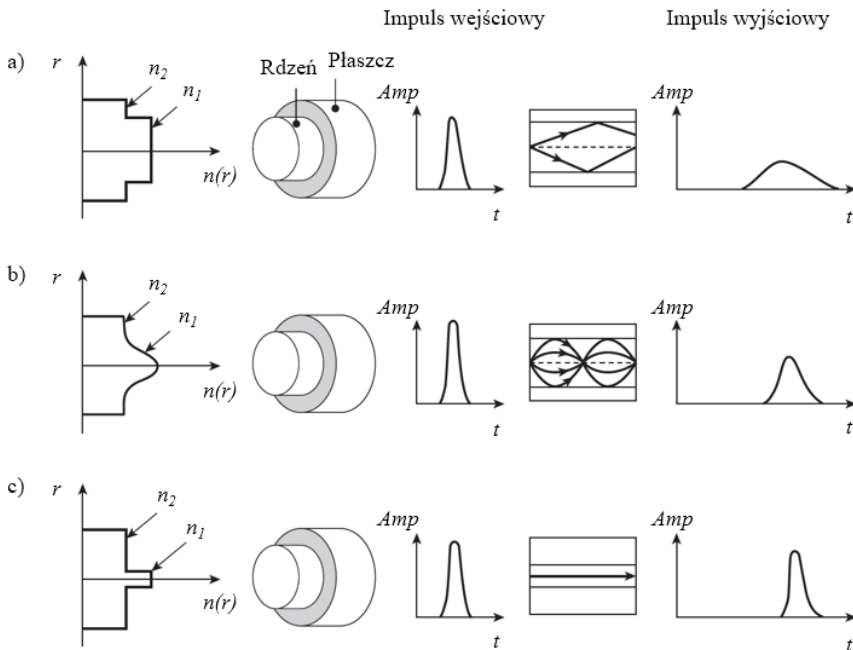
Jeśli rozpatrujemy kodowanie z powrotem do zera, jak pokazuje to rys 3.2(b), poziom logicznej jedynki jest utrzymywany przez część (zwykle przez połowę) okresu bitowego. Dla tego sposobu transmisji danych, jej szybkość jest równa szerokości pasma w hercach (tzn. 1 bit na sekundę na herc) i z tego wynika, że $B_T = B$. Szerokość pasma B dla przewodników metalowych jest jeszcze zwykle definiowana przez elektryczne kryterium 3 decybelowe (tzn. częstotliwość, przy której moc elektryczna spadła do 1/3 swojej stałej maksymalnej wartości) [78]. Ograniczenie szerokości pasma światłowodu z powodu dyspersji (optyczna szerokość pasma) zwykle odnosi się do sposobu kodowania z powrotem do zera, gdzie szerokość pasma w Hz jest równa szybkości transmisji bitów [78][62].

Rysunek 3.3 przedstawia trzy główne profile światłowodów, światłowod wielomodowy ze skokowym profilem współczynnika załamania, wielomodowy z gradientowym profilem współczynnika załamania i jednomodowy ze skokowym profilem współczynnika załamania, gdzie na wykresie zilustrowano odpowiednie poszerzenie się impulsu charakterystyczne dla każdego typu światłowodu [32][71]. Światłowod jednomodowy wykazuje mniejsze rozszerzenie impulsu i dlatego też jest zdolny do transmisji w najszerszych pasmach, które obecnie są w przedziale GHz, podczas gdy transmisja światłowodem wielomodowym ze skokowym profilem współczynnika załamania zwykle ogranicza się do kilku dziesiątek megahertzów. Poszerzenie impulsów zależy od wielkości, jaką impuls pokazuje w światłowodzie i dlatego też dla każdego połączenia światłowodowego restrykcje odnośnie pasma użytecznego są dyktowane przez odległość między stacjami wzmacniającymi (tzn. odległość, jaką impuls światła pokonuje przed wzmocnieniem). Pomiar właściwości dyspersyjnych poszczególnego światłowodu jest zwykle

przedstawiany jako poszerzenie impulsu w czasie na jednostkę długości światłowodu (tzn. ns/km).

Liczba impulsów sygnału optycznego, jakie mogą być transmitowane w danym czasie, czyli zdolność przeniesienia informacji światłowodami, jest ściśle zależna od wielkości dyspersji impulsu na jednostkę długości. Zakładając brak sprzężenia modów i filtracji, poszerzenie impulsu wzrasta liniowo z długością światłowodu i dlatego też pasmo przenoszenia jest odwrotnie proporcjonalne do długości światłowodu. To powoduje potrzebę wprowadzenia bardziej użytecznego parametru do określenia zdolności przenoszenia informacji, np. jako iloczyn pasmo-długość ($B_{opt} \times L$). Typowe iloczyny pasmo-długość dla trzech światłowodów z rysunku 3.3 to 20 MHzkm, 1 GHzkm i 100 GHzkm, odpowiednio dla światłowodu wielomodowego ze skokowym współczynnikiem załamania, wielomodowego z gradientowym współczynnikiem załamania i jednodomowego [78].

W celu zrozumienia przyczyn różnej wielkości poszerzenia impulsu w różnych typach światłowodów konieczne jest rozróżnienie mechanizmów dyspersji powodujących to zjawisko.



Rys. 3.3. Schematyczny diagram przedstawiający: a) światłowod wielomodowy ze skokowym profilem współczynnika załamania światła, b) światłowod wielomodowy z gradientowym profilem współczynnika załamania światła, c) światłowod jednodomowy ze skokowym profilem współczynnika załamania światła i poszerzenie impulsu powodowane dyspersją międzymodową dla każdego typu światłowodu [78]

3.1. DYSPERSJA CHROMATYCZNA

Dyspersja chromatyczna może występować we wszystkich typach włókien optycznych i wynika ze skończonej szerokości spektralnej źródła światła. Ponieważ źródła światła nie emitują tylko jednej częstotliwości, ale pewne pasmo (w przypadku lasera jest to tylko ułamek procenta częstotliwości środkowej, podczas gdy dla diody LED jest to znaczący procent), dlatego też mogą pojawić się różnice opóźnień grupowych propagacji między różnymi składowymi spektralnymi transmitowanego modu, czyli dyspersja chromatyczna. Różnice opóźnień grupowych mogą być powodowane przez właściwości dyspersyjne materiału światłowodu (dyspersja materiałowa), ale także przez efekty występujące podczas transmisji sygnału w strukturze światłowodu (dyspersja falowodowa) [78].

3.1.1. Dyspersja materiałowa

Poszerzenie impulsu powodowane dyspersją materiałową jest wynikiem różnych prędkości grupowych składowych spektralnych wprowadzonych do światłowodu przez źródło światła i występuje wtedy, kiedy prędkość fazowa fali płaskiej propagującej w środowisku dielektrycznym zmienia się nieliniowo z długością fali. Materiał wykazuje dyspersję materiałową, kiedy druga pochodna współczynnika załamania po długości fali jest różna od zera ($d^2n/d\lambda^2 \neq 0$). Poszerzenie impulsu powodowane dyspersją materiałową może być określone za pomocą opóźnienia grupowego we włóknie optycznym, które to opóźnienie jest odwrotnością prędkości grupowej. Stąd jednostkowe opóźnienie grupowe jest równe:

$$\tau_g = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left(n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right), \quad (3.4)$$

gdzie n_1 jest współczynnikiem załamania rdzenia. Opóźnienie impulsu τ_m powodowane dyspersją materiałową w światłowodzie długości L jest równe:

$$\tau_m = \frac{L}{c} \left(n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right). \quad (3.5)$$

Dla źródła z szerokością spektralną średniokwadratową σ_λ i średnią długością fali λ , wartość szerokości średniokwadratowej impulsu poszerzonego w wyniku dyspersji materiałowej może być wyznaczona z rozwinięcia równania 3.5 w szereg Taylora, w wyniku czego trzymujemy:

$$\sigma_m = \sigma_\lambda \frac{d\tau_m}{d\lambda} + \sigma_\lambda \frac{2d^2\tau_m}{d\lambda^2} + \dots \quad (3.6)$$

Ponieważ pierwszy składnik w równaniu 3.6 zwykle dominuje, szczególnie dla źródeł działających w zakresie 0,8 do 0,9 μm długości fali, otrzymujemy więc przybliżenie:

$$\sigma_m = \sigma_\lambda \frac{d\tau_m}{d\lambda}. \quad (3.7)$$

Na podstawie równania 3.5 poszerzenie impulsu zostało przedstawione w następującej postaci:

$$\frac{d\tau_m}{d\lambda} = \frac{L\lambda}{c} \left[\frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} - \frac{dn_1}{d\lambda} \right] = \frac{-L\lambda}{c} \frac{d^2n_1}{d\lambda^2}. \quad (3.8)$$

Podstawiając wyrażenie występujące w równaniu (3.8) do równania (3.7) wartość szerokości średniokwadratowej impulsu poszerzonego przez dyspersję materiałową jest dana równaniem:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} \right|. \quad (3.9)$$

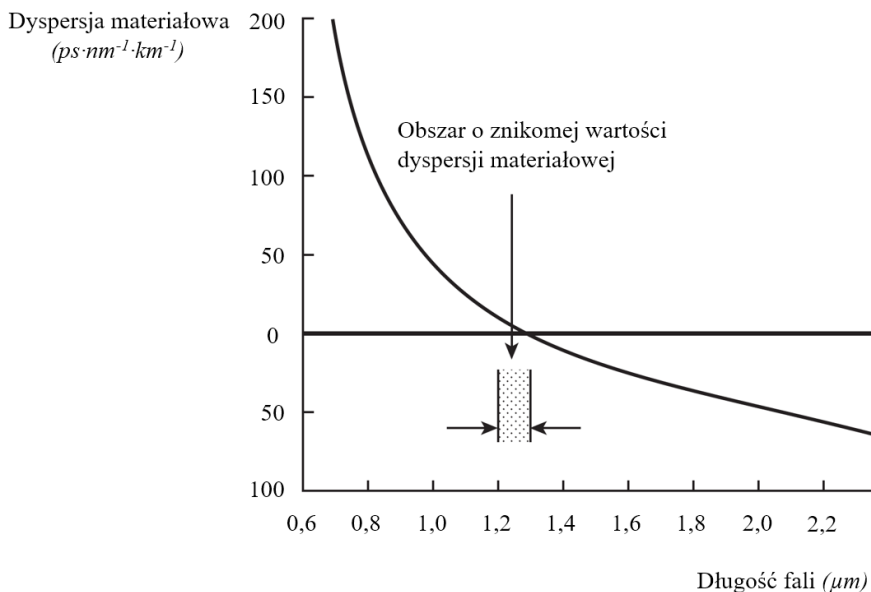
Dyspersja materiałowa światłowodów czasami jest przedstawiana jako wartość wyrażenia $|\lambda^2(d^2n_1/\lambda^2)|$ lub po prostu $|d^2n_1/d\lambda^2|$.

Dyspersja materiałowa jest wyrażana parametrem M definiowanym jako:

$$M = \frac{1}{L} \frac{d\tau_m}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \left| \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} \right|, \quad (3.10)$$

i wyrażana w jednostkach $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$.

Rysunek 3.4 przedstawia zmiany parametru dyspersji materiałowej M z długością fali dla czystej krzemionki. Można zaobserwować, że dyspersja materiałowa dąży do zera dla zakresu fal dłuższych ok. 1,3 μm (dla czystej krzemionki). To jest dodatkową zachętą (inną niż niska tłumienność) do operowania w zakresie fal dłuższych, gdzie dyspersja materiałowa może być pomijana. Także użycie lasera, który posiada węższą szerokość spektralną niż dioda LED, jako źródła światła, powoduje znaczną redukcję poszerzenia impulsu powodowanego dyspersją materiałową, nawet w zakresie fal krótszych.



Rys. 3.4. Parametr M dyspersji materiałowej dla krzemionki w funkcji długości fali [78]

3.1.2. Dyspersja falowodowa

Dyspersja falowodowa jest wynikiem różnicy prędkości grupowej fal przy zmianie długości dla poszczególnego modu. Opierając się na teorii promieniowej jest ona równoznaczna z wystąpieniem kąta między określonym promieniem, a osią światłowodu zmieniającego się wraz z długością fali, co dalej prowadzi do różnic w czasach transmisji promieni, a stąd do dyspersji. Dla jednego modu, o stałej propagacji β światłowód wykazuje dyspersję falowodową, kiedy $d^2\beta/d\lambda^2 \neq 0$. Światłowody wielomodowe, gdzie większość modów propaguje daleko od odcięcia, są praktycznie wolne od dyspersji falowodowej, bo w porównaniu z dyspersją materiałową ($\sim 0,1$ do $0,2 \text{ ns} \cdot \text{km}^{-1}$) jest ona nieznacząca [78].

3.1.3. Obliczenie $d\tau/d\lambda$

Dyspersja chromatyczna jest określona właściwościami źródła światła, szerokością jego widma σ_λ i właściwościami falowodu poprzez $d\tau/d\lambda$. Opóźnienie grupowe τ jest dane zależnością, którą można zapisać w postaci [32]:

$$\tau = \frac{L}{c} \frac{d\beta}{dk} = \frac{Ln_2}{c} \left(1 + \Delta \frac{d(kb)}{dk} \right) + \frac{Lk}{c} \frac{dn_2}{dk}. \quad (3.11)$$

Różniczkując powyższe wyrażenie względem λ otrzymano:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{L}{c} \frac{dn_2}{d\lambda} \left(1 + \Delta \frac{d(kb)}{dk} \right) + \frac{Ln_2}{c} \left(\frac{d\Delta}{d\lambda} \frac{d(kb)}{dk} + \Delta \frac{d^2(kb)}{dk^2} \frac{dk}{d\lambda} \right) + \frac{L}{c} \frac{d}{d\lambda} \left(-\lambda \frac{dn_2}{d\lambda} \right). \quad (3.12)$$

Przy wyprowadzaniu zależności (3.12) wykorzystano zależność $k=2\pi/\lambda$ oraz

$$\frac{dn}{dk} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dk} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3.13)$$

Podstawiając do równania (3.12) zależności:

$$\frac{dk}{d\lambda} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} = -k/\lambda \quad \text{oraz} \quad \frac{d}{d\lambda} \left(-\lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) = -\left(\frac{dn}{d\lambda} + \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right),$$

otrzymano:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{L}{c} \left[\frac{n_2\Delta}{\lambda} k \frac{d^2(kb)}{dk^2} + \frac{d^2n_2}{d\lambda^2} \right] + \frac{L}{c} \left[\Delta \frac{dn_2}{d\lambda} + n_2 \frac{d\Delta}{d\lambda} \right] \frac{d(kb)}{dk}. \quad (3.14)$$

Jeżeli rdzeń i płaszcz światłowodu są wykonane ze szkła o podobnych właściwościach to ma miejsce zależność:

$$\frac{dn_1}{d\lambda} \approx \frac{dn_2}{d\lambda}, \quad \text{i wówczas:}$$

$$\Delta \frac{dn_2}{d\lambda} + n_2 \frac{d\Delta}{d\lambda} \approx 2\Delta^2 \frac{dn_2}{d\lambda}, \quad (3.15)$$

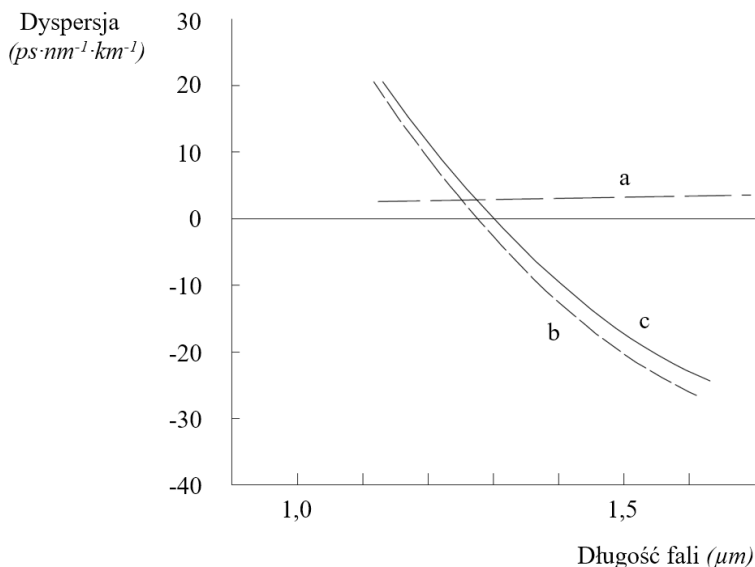
a ostatni składnik wyrażenia (3.14) jest mały w stosunku do pierwszego, a więc może być pominięty przy $\Delta \ll l$.

Przy tym przybliżeniu otrzymano wyrażenie określające dyspersję chromatyczną:

$$\sigma_K = \sigma_\lambda \frac{d\tau}{d\lambda} = \sigma_\lambda \frac{L}{c} \left[\frac{n_2\Delta}{\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} + \lambda \frac{d^2n_2}{d\lambda^2} \right]. \quad (3.16)$$

W wyrażeniu tym wykorzystano zależność: $k \frac{d^2(kb)}{dk^2} = V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$.

Pierwszy składnik w nawiasach wyrażenia (3.16) zależy od właściwości światłowodu, zaś drugi od materiału, z którego wykonany jest światłowód. Składniki te, określają odpowiednio dyspersję falowodową i materiałową. Ponieważ mogą mieć one różny znak, może być to wykorzystane przy projektowaniu światłowodu. Przez odpowiedni dobór wymiarów światłowodu i materiału można uzyskać, w przybliżeniu, taką samą wartość bezwzględną obu składników przy przeciwnych ich znakach.



Rys. 3.5. Przykład światłowodu z kompensacją dyspersji *a* – dyspersja falowodowa, *b* – dyspersja materiałowa, *c* – dyspersja całkowita [32]

W ten sposób otrzymuje się, tak zwany, dyspersyjnie skompensowany światłowód o małym rozszerzeniu impulsu. Na rysunku 3.5 przedstawione są przykładowe przebiegi dyspersji falowodowej i materiałowej w funkcji długości fali λ . Jak widać światłowód jest dyspersyjnie skompensowany przy długościach fali w otoczeniu $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ [32].

W celu przystosowania istniejących systemów światłowodowych, pracujących przy długości fali $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ do nowej długości fali $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, proponuje się dodanie do istniejących już światłowodów, specjalnie zaprojektowanych światłowodów z kompensacją dyspersji [32].

3.2. DYSPERSJA MIĘDZYMODOWA

Poszerzenie impulsu powodowane dyspersją międzymodową (czasem nazywaną po prostu modową lub dyspersją modu) jest wynikiem różnic w opóźnieniu propagacji między modami w światłowodzie wielomodowym. W związku z tym, że różne mody, które tworzą impuls światła w światłowodzie wielomodowym propagują wzdłuż rdzenia z różnymi prędkościami grupowymi, szerokość impulsu na wyjściu jest zależna od czasów transmisji najwolniejszych i najszybszych modów. Ten mechanizm dyspersji stwarza fundamentalną różnicę w dyspersji całkowitej dla trzech rodzajów światłowodów pokazanych na rysunku 3.3. Światłowody wielomodowe ze skokowym profilem współczynnika załamania wykazują największą dyspersję międzymodową, co

daje największe poszerzenie impulsu. Dyspersja międzymodowa w światłowodach wielomodowych może być zredukowana przez przyjęcie optymalnego profilu współczynnika załamania, co prowadzi do prawie parabolicznego profilu większości światłowodów z gradientowym profilem współczynnika załamania. Całkowite poszerzenie impulsu w światłowodach wielomodowych z gradientowym profilem współczynnika załamania jest o wiele mniejsze niż to występujące w światłowodach wielomodowych ze skokowym profilem współczynnikiem załamania (typowo 100 razy). Dlatego też światłowody z gradientowym profilem współczynnika załamania używane ze źródłami wielomodowymi dają olbrzymi wzrost pasma w stosunku do światłowodów wielomodowych ze skokowym profilem współczynnika załamania [78].

Biorąc pod uwagę propagację jednomodową zauważamy, że nie występuje tam dyspersja międzymodowa i poszerzenie impulsu jest powodowane wyłącznie mechanizmami dyspersji wewnątrzmodowej. W teorii jest to przypadek światłowodu jednomodowego ze skokowym profilem współczynnika załamania, gdzie może propagować tylko jeden mod. Światłowody jednomodowe wykazują mniejsze poszerzenie impulsu i mają największe możliwe pasmo, ale w większości przypadków, są wykorzystywane tylko ze źródłami jednomodowymi.

3.3. DYSPERSJA CAŁKOWITA

3.3.1. Światłowody wielomodowe

Całkowita dyspersja w światłowodach wielomodowych obejmuje dyspersję wewnątrzmodową i dyspersję międzymodową stałą. Całkowita wartość średniokwadratowa poszerzenia impulsu σ_T jest dana przez:

$$\sigma_T = (\sigma_c^2 + \sigma_n^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.17)$$

gdzie σ_c jest średniokwadratowym wewnątrzmodowym albo chromatycznym poszerzeniem, a σ_n jest średniokwadratowym międzymodowym poszerzeniem spowodowanym przez opóźnienia różnicowe między modami (σ_s dla światłowodu wielomodowego ze skokowym profilem współczynnika załamania i σ_g dla światłowodu wielomodowego z gradientowym profilem współczynnika załamania). Wewnątrzmodowa stała σ_c składa się z poszerzenia impulsu spowodowanego dyspersją materiałową i falowodową. W światłowodach wielomodowych dyspersja falowodowa jest bardzo mała w porównaniu z dyspersją materiałową, więc $\sigma_c \approx \sigma_m$ [78].

3.3.2. Światłowody jednomodowe

Poszerzenie impulsu w światłowodach jednomodowych jest prawie w całości wynikiem dyspersji wewnątrzmodowej albo chromatycznej, jako że tylko jeden mod może propagować. Pasma jest ograniczone przez skończoną szerokość spektralną źródła. W odróżnieniu od sytuacji w światłowodach wielomodowych, mechanizmy powodowane dyspersją wewnątrzmodową w światłowodach jednomodowych są ze sobą powiązane w sposób kompleksowy. Czas przejścia albo ściślej opóźnienie grupowe τ_g impulsu światła propagującego wzdłuż jednostki długości światłowodu jednomodowego może być wyrażone równaniem [78]:

$$\tau_g = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk}, \quad (3.18)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni, β jest stałą propagacji dla modu w rdzeniu światłowodu o współczynniku załamania n_1 , a k jest stałą propagacji modu w próżni.

Całkowity parametr pierwszego rzędu dyspersji albo dyspersja chromatyczna światłowodu jednomodowego, D_T , danego przez pochodną opóźnienia grupowego po długości fali λ w próżni wyrażony jest zależnością:

$$D_T = \frac{d\tau_g}{d\lambda}. \quad (3.19)$$

Powszechnie parametr M dyspersji materiałowej jest wyrażany w jednostkach $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Jeśli zmienną λ zastąpimy przez ω , wtedy parametr dyspersji całkowitej będzie równy:

$$D_T = -\frac{\omega}{\lambda} \frac{d\tau_g}{d\omega} = -\frac{\omega}{\lambda} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}. \quad (3.20)$$

Światłowód wykazuje dyspersję wewnątrzmodową, jeśli stała propagacji β zmienia się nieliniowo wraz z długością fali. Stała propagacji β może być wyrażona przez względną różnicę współczynnika załamania Δ i znormalizowaną stałą propagacji b jako [78]:

$$\beta = kn_1 [1 - 2\Delta(1 - b)]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.21)$$

Wartość średniokwadratowa poszerzenia impulsu spowodowanego dyspersją wewnątrzmodową w światłowodzie o długości L dana jest pochodną opóźnienia grupowego po długości fali λ :

$$\sigma_\lambda L \left| \frac{d\tau_g}{d\lambda} \right| = \frac{\sigma_\lambda L 2\pi}{c\lambda^2} \frac{d^2\beta}{dk^2}, \quad (3.22)$$

gdzie σ_λ jest średniokwadratową szerokością spektralną linii skoncentrowanej wokół fali o długości λ [78].

Kiedy równanie 3.17 jest podstawione do równania 3.18, wtedy szczegółowe przeliczenia pierwszej i drugiej pochodnej k dają zależność poszerzenia impulsu

do właściwości materiałowych światłowodu i znormalizowanej stałej propagacji b , co daje trzy wzajemnie ze sobą powiązane wielkości, które składają się ze skomplikowanych stałych. Końcowe wyrażenie może być podzielone na trzy zmienne zależne od dominujących efektów. Dominujące efekty spowodowały, że otrzymano:

1. Parametr dyspersji materiałowej D_M definiowany przez $\lambda/c|d^2n/d\lambda^2|$ gdzie $n=n_1$ albo n_2 odpowiednio dla rdzenia i płaszczka.
2. Parametr dyspersji falowodowej D_F , który może być wyznaczony z równania:

$$D_F = -\left(\frac{n_1 - n_2}{\lambda c}\right)V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}, \quad (3.23)$$

gdzie V jest znormalizowaną częstotliwością dla światłowodu. Znormalizowana stała propagacji b dla określonego światłowodu jest zależna tylko od V , wtedy znormalizowany współczynnik dyspersji falowodowej $Vd^2(Vb)/dV^2$ także zależy od V . Ostatnia funkcja jest kolejnym uniwersalnym parametrem, który odgrywa główną rolę w teorii światłowodów jednomodowych.

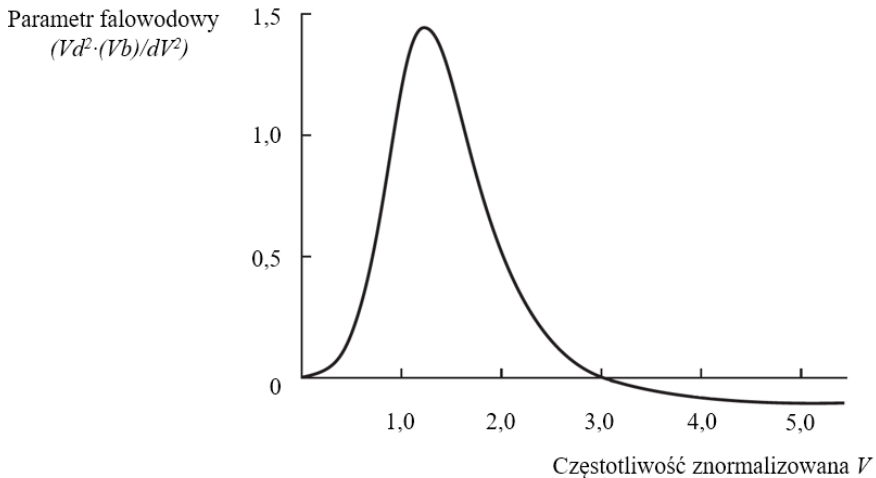
Sytuacja jest inna niż w przypadku światłowodów wielomodowych, gdzie większość modów propaguje daleko od fali odcięcia i dlatego większość energii jest transmitowana rdzeniem światłowodu. W światłowodach wielomodowych składowe dyspersji mogą być w uproszczeniu rozłożone na dwie stałe wewnątrzmodowe, które zależą albo od dyspersji materiałowej, albo od falowodowej.

W standardowych światłowodach jednomodowych całkowita dyspersja jest zdominowana przez dyspersję materiałową domieszkowanego krzemu. Parametr M dyspersji materiałowej w funkcji długości fali λ jest przedstawiony na rysunku 3.4. Można zaobserwować, że charakterystyka przechodzi przez zero przy długości fali 1,27 μm . Jest to punkt zera dyspersji materiałowej (ZMD), który może być przesuwany w zakresie 1,2 do 1,4 μm przez dodanie odpowiednich domieszek. Przesunięcie punktu (ZMD) z 1,27 μm do około 1,37 μm odbywa się przez zwiększenie koncentracji domieszki GeO_2 z 0 do 15% [78]. Punkt ZMD nie odpowiada zerowemu poszerzeniu impulsu, ponieważ na poszerzenie impulsu wpływa dyspersja falowodowa.

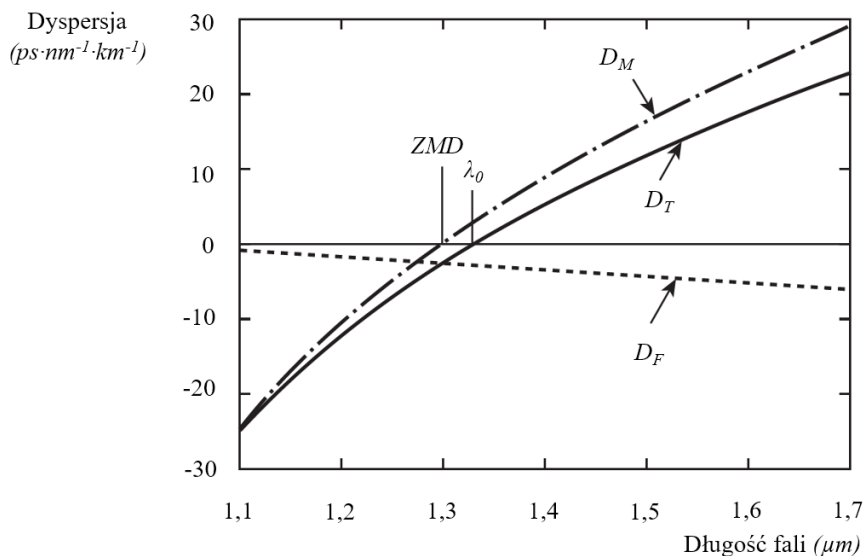
Poszerzenie impulsu przy zerze dyspersji materiałowej jest powodowane przez współczynnik dyspersji falowodowej $Vd^2(Vb)/dV^2$, który jest przedstawiony na rysunku 3.6 w funkcji częstotliwości znormalizowanej dla V modu LP_{01} . Można zaobserwować obszar jednomodowy, gdzie częstotliwość znormalizowana V jest mniejsza niż 2.405, dyspersja falowodowa jest zawsze dodatnia.

Dyspersja falowodowa przechodzi przez zero poza rzeczywistym obszarem jednomodowy przy $V=3.0$. Zmiana parametrów światłowodu (takich jak promiennosc, zmniejszający się rdzeń) albo zmiana długości fali pracy, przesuwa częstotliwość znormalizowaną, a co za tym idzie, dyspersją falowodową.

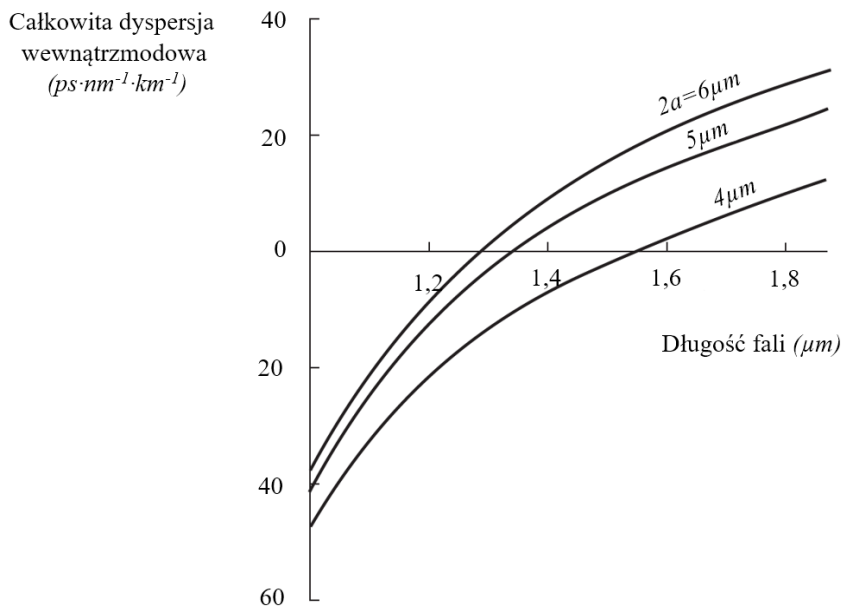
Całkowita dyspersja światłowodu, która zależy od składników materiałowych i wymiarów, może być zminimalizowana przez zbilansowanie dyspersji materiałowej i falowodowej. Dla fal o długościach większych niż punkt ZMD parametr dyspersji materiałowej jest dodatni, podczas gdy dyspersja falowodowa jest ujemna. Zostało to przedstawione na rysunku 3.7. Dyspersja całkowita D_T jest w przybliżeniu równa sumie dyspersji materiałowej D_M i falowodowej D_F . Dla długości fali λ_0 , która jest nieco większa od długości fali punktu ZMD, dyspersja falowodowa kompensuje dyspersję materiałową i parametr pierwszego rzędu dyspersji całkowitej D_T równy jest zero (rysunek 3.7). Długość fali, dla której dyspersja pierwszego rzędu równa jest zero λ_0 może być wybrana z zakresu 1.3 do 2 μm przy dokładnym kontrolowaniu średnicy i profilu rdzenia. Tą zależność przedstawia rysunek 3.8, gdzie całkowita dyspersja pierwszego rzędu jest w funkcji długości fali [78].



Rys. 3.6. Parametr falowodowy $Vd^2(Vb)/dV^2$ w funkcji częstotliwości znormalizowanej V dla modu LP_{01} [78]

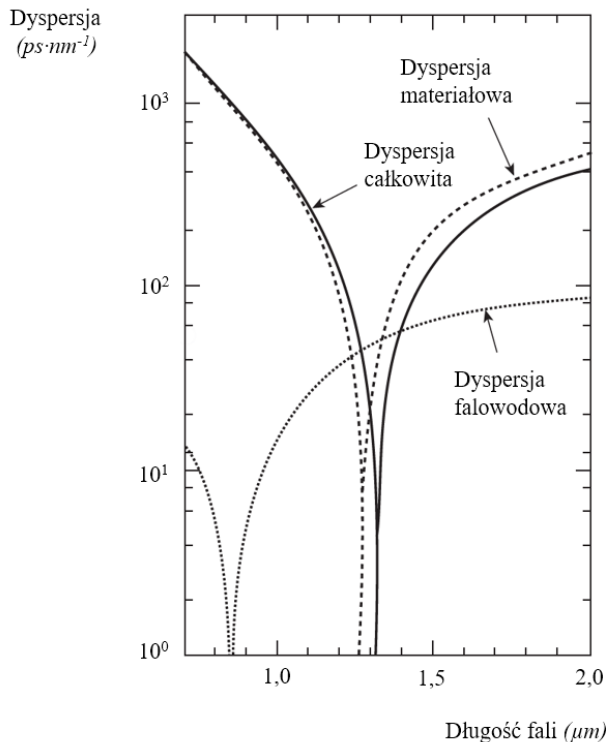


Rys. 3.7. Parametr dyspersji materiałowej (D_M), parametr dyspersji falowodowej (D_F) i parametr dyspersji całkowitej (D_T) jako funkcje długości fali dla konwencjonalnego światłowodu jednomodowego [78]



Rys. 3.8. Całkowita dyspersja wewnątrzmodowa pierwszego rzędu w funkcji długości fali dla światłowodów jednomodowych o średnicach rdzeni 4,5 i 6 μm [78]

Efekt interakcji dyspersji materiałowej z dyspersją falowodową przy fali o długości λ_0 jest przedstawiony na charakterystykach dyspersji w funkcji długości fali λ dla światłowodu jednomodowego krzemionkowego (rysunek 3.9). Punkt ZMD występuje przy fali 1,27 μm , ale wpływ dyspersji falowodowej przesuwa minimum dyspersji całkowitej w stronę fal dłuższych dając $\lambda_0=1,32\mu\text{m}$.



Rys. 3.9. Dyspersja impulsu w funkcji długości fali dla 11 kilometrowego jednomodowego włókna ukazująca główne mechanizmy dyspersji (krzywe kreskowana i kropkowana) i całkowita dyspersja (krzywa ciągła) [78]

Długość fali, przy której dyspersja pierwszego rzędu jest równa zero, może być rozciągnięta do fal o długościach 1,55 μm i dłuższych przez kombinację trzech technik:

- a) obniżenie częstotliwości znormalizowanej dla światłowodu,
- b) zwiększenie względnej różnicy współczynnika załamania Δ światłowodu,
- c) odpowiednie domieszkowanie krzemionki germanem.

Pozwala to iloczynowi pasmo-długość takich światłowodów osiągnąć wartości ponad 100 $\text{GHz}\cdot\text{km}^{-1}$ z niewielkim wzrostem tłumienia powodowanym rozproszeniem Rayleigha w domieszkowanej krzemionce [78].

Dla światłowodów jednomodowych pracujących przy długości fali 1,3 μm zalecana jest maksymalna wartość dyspersji chromatycznej D_T nie przekraczająca $3,5 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ w zakresie fal o długościach 1,285–1,330 μm .

Ponadto, dla tego samego światłowodu, D_T powinno być mniejsze niż $20 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ przy fali o długości 1,5 μm . Stąd, chociaż długość fali, przy której dyspersja chromatyczna pierwszego rzędu (tzn. $D_T = 0$, $D_T = 0$) jest często nazywana długością fali zerowej dyspersji, to bardziej poprawnie jest określać ją jako długość fali minimalnej dyspersji ze względu na znaczące efekty dyspersji drugiego rzędu.

Zmiany dyspersji wewnątrzmodowej wraz z długością fali są zwykle charakteryzowane przez parametr dyspersji drugiego rzędu albo nachylenie dyspersji S , które może być zapisane jako

$$S = \frac{dD_T}{d\lambda} = \frac{d^2\tau_g}{d\lambda^2}. \quad (3.24)$$

Podczas gdy parametr dyspersji pierwszego rzędu D_T zależał tylko od drugiej pochodnej stałej propagacji β po częstotliwości kątowej, nachylenie dyspersji zależy od obu pochodnych: drugiego i trzeciego rzędu według zależności [78]:

$$S = \frac{(2\pi c)^3}{\lambda^4} \frac{d^3\beta}{d\omega^3} + \frac{4\pi c}{\lambda^3} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}. \quad (3.25)$$

Należy zauważyć, że chociaż zero dyspersji pierwszego rzędu występuje przy λ_0 , to efekty chromatyczne opisane równaniami wyższych rzędów nakładają ograniczenia na możliwe do osiągnięcia pasmo w światłowodach jednomodowych.

Na przykład podstawowa dolna granica poszerzenia impulsu w światłowodach na bazie krzemionki $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, jest sugerowana przy długości fali 1,273 μm . Te drugorzędne efekty takie jak pojawiająca się dwójłomność z powodu eliptyczności, naprężenia mechaniczne w rdzeniu mogą powodować dyspersję, zwłaszcza w przypadku naprężeń mechanicznych będą to wartości między 2 i 40 $\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$ [78]. Jeśli pomijamy naprężenia mechaniczne, dyspersja impulsu, przy dolnej granicy, może występować w obszarze fal dłuższych (1,3 do 1,7 μm).

Dla kontrastu minimum poszerzenia impulsu dla długości fali 0,85 μm wynosi około $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ [78].

Ważna wartość nachylenia dyspersji $S(\lambda)$ występuje przy minimum dyspersji wewnątrzmodowej dla długości fali λ_0 , tj:

$$S_0 = S(\lambda_0), \quad (3.26)$$

gdzie S_0 jest nazywane zerem nachylenia dyspersji, które na podstawie równań 3.19 i 3.24 jest określone tylko przez trzecią pochodną β .

Typowe wartości nachylenia dyspersji dla standardowego światłowodu jednomodowego przy λ_0 leżą w zakresie 0,085 do 0,092 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ [78].

Ponadto, dla takich światłowodów ITU proponuje, aby przy λ_0 leżącym w zakresie 1,295 do 1,322 μm S_0 było mniejsze niż 0,095 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. Całkowita dyspersja chromatyczna dla dowolnej długości fali może być wyznaczona za pomocą parametrów λ_0 i S_0 według zależności:

$$D_T(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right]. \quad (3.27)$$

3.3.2.1. Światłowody jednomodowe ze zmodyfikowaną dyspersją.

Możliwe jest modyfikowanie charakterystyk dyspersji światłowodów jednomodowych przez zmodyfikowanie odpowiednich parametrów światłowodu. Główny nacisk jest kładziony na odpowiednie zbilansowanie dyspersji materiałowej (równanie 3.10) i falowodowej (równanie 3.23)

$$D_T = D_M + D_F = \frac{\lambda}{c} \left| \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right| - \left[\frac{n_1 - n_2}{\lambda c} \right] \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2}. \quad (3.28)$$

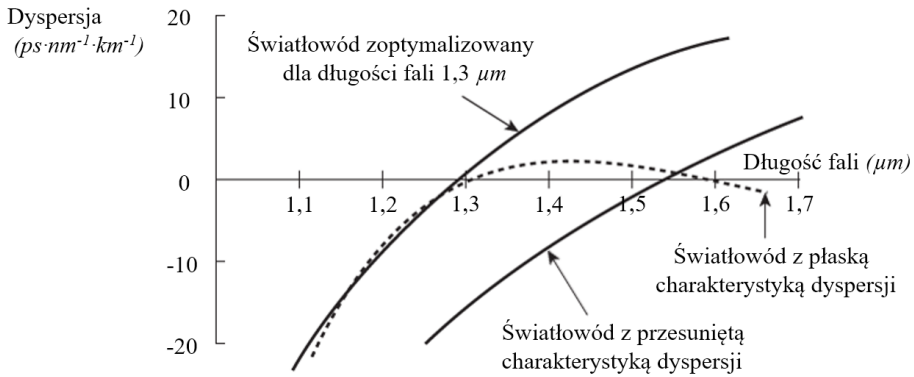
dyspersja dyspersja
materiałowa falowodowa

Dla fal dłuższych niż punkt zerowej dyspersji materiałowej (ZMD) powinno projektować się światłowody, gdzie składowe: D_M i D_F są przeciwnych znaków i w ten sposób same się znoszą. Dlatego też długość fali zerowej dyspersji chromatycznej pierwszego rzędu może być przesunięta w stronę fal o najmniejszych stratach dla szkła krzemionkowego, to jest 1,55 μm i w ten sposób otrzymano dwie korzyści. Może to być osiągnięte przez mechanizmy takie jak redukcja średnicy rdzenia i wzrost względnej różnicy współczynnika załamania. W ten sposób tworzy się tzw. światłowody jednomodowe z przesuniętą dyspersją.

Alternatywną metodą modyfikacji charakterystyk dyspersji światłowodów jednomodowych jest osiągnięcie okna niskiej dyspersji w obszarze fal o niskich stratach między 1,3 μm i 1,6 μm . Takie światłowody mają mniejsze wymagania spektralne co do źródeł światła i pozwalają na elastyczny multiplexing w dziedzinie długości fali (DWDM) i są znane jako światłowody jednomodowe z płaską dyspersją.

Światłowody te mają wielopowłokowe profile współczynnika załamania, zwiększoną dyspersję falowodową w celu utrzymania dyspersji całkowitej mniejszej niż 2 $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ w całym przedziale fal od 1,3 do 1,6 μm . W efekcie, te światłowody wykazują dwa zera całkowitej dyspersji chromatycznej. Fakt ten można zaobserwować na rysunku 3.10, który pokazuje charakterystyki dyspersji całkowitej w funkcji długości fali optycznej dla

standardowego światłowodu jednomodowego zoptymalizowanego na długość fali $1,3 \mu\text{m}$ [78].



Rys. 3.10. Charakterystyki dyspersji dla różnych typów światłowodów jednomodowych [78]

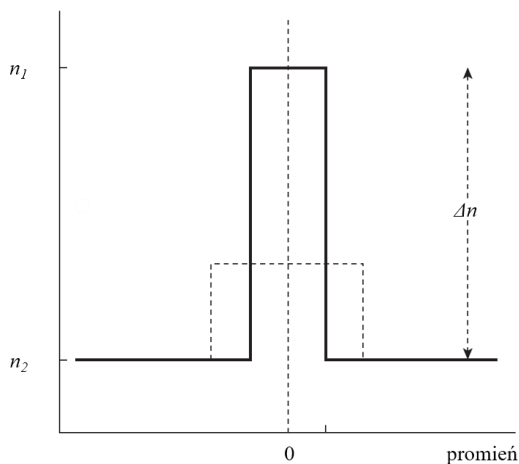
3.3.2.2. Światłowody z przesuniętą dyspersją

Występuje duża różnorodność profili współczynnika załamania ze względu na zestrojenie punktu zerowej dyspersji przy fali o długości λ_0 z poszczególnymi długościami w obszarze wokół punktu zerowej dyspersji materiałowej. W najprostszym przypadku, skokowy profil współczynnika załamania pokazany na rysunku 3.11 daje przesunięcie w stronę fal dłuższych przez zmniejszenie średnicy rdzenia i zwiększenie względnej różnicy współczynnika załamania. Typowe wartości tych parametrów to odpowiednio $4,4 \mu\text{m}$ i $0,012$. Dla porównania, linią kropkową pokazano profil standardowego światłowodu z nieprzesuniętą dyspersją.

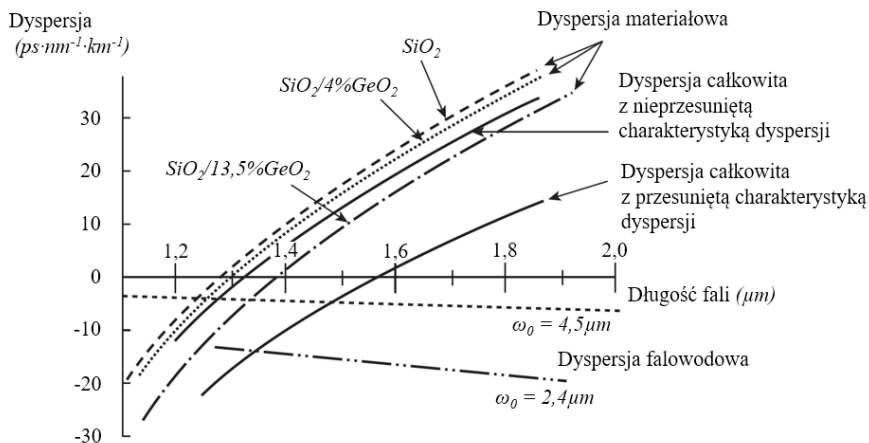
W Rozdziale 3.3.2 sygnalizowano, że λ_0 może być przesunięte w stronę fal dłuższych przez zmianę struktury materiałowej światłowodu jednomodowego. Dla odpowiedniej izolacji mocy modu podstawowego częstotliwość znormalizowana powinna być utrzymywana w przedziale $1,5$ do $2,4 \mu\text{m}$, względna różnica współczynnika załamania musi wzrastać kwadratowo, podczas gdy średnica rdzenia musi być liniowo zmniejszona, aby utrzymać stałe V . Jest to osiągnięte przez zwiększenie domieszki germanu w rdzeniu światłowodu. Rysunek 3.12 przedstawia typowe charakterystyki dyspersji materiałowej i falowodowej światłowodów jednomodowych z różnymi domieszkami w rdzeniu. Należy zauważyć, że większe koncentracje domieszki powodują przesunięcie w stronę fal dłuższych, a w połączeniu z redukcją średnicy pola modu (MFD) (i zwiększoną ujemną dyspersją światłowodu) daje charakterystyki światłowodów z przesuniętą dyspersją [78].

Problem, jaki pojawia się przy przesuwanie dyspersji pokazany na rysunku 3.11 w prostych światłowodach jednomodowych polega na tym, że

produkowane światłowody wykazują relatywnie duże straty podczas domieszkowania przy operowaniu falą o długości około $1,55\mu\text{m}$. Te dodatkowe straty optyczne, które mogą być rzędu 2 dB/km, mogą być powodowane przez defekty naprężeniowe pojawiające się na granicy rdzeń – płaszcz. Logicznym przypuszczeniem jest fakt, że naprężenie pojawiające się w poprzek granicy płaszcz – rdzeń mogą być zredukowane przez wprowadzenie gradientu współczynnika załamania, dlatego też podjęto badania nad projektami światłowodu jednomodowego gradientowego.

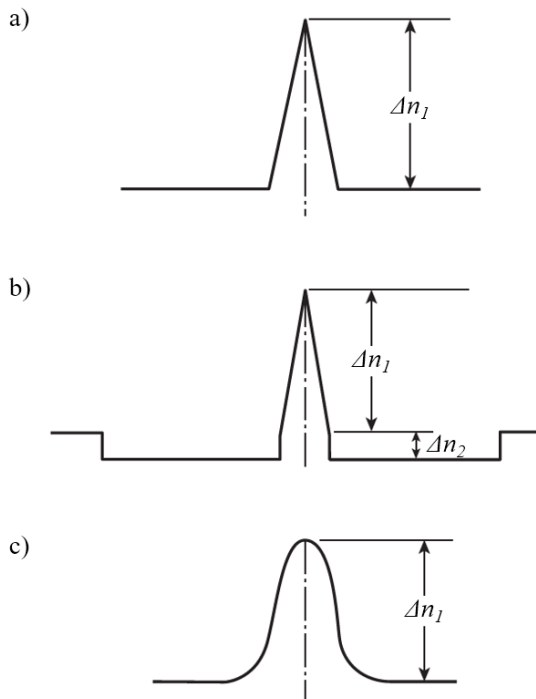


Rys. 3.11. Profil współczynnika załamania dla światłowodu skokowego z przesuniętą dyspersją (krzywa ciągła) i konwencjonalnego z nieprzesuniętą dyspersją (krzywa kreskowa) [78]



Rys. 3.12. Charakterystyki dyspersji materiałowej, falowodowej i całkowitej dla konwencjonalnych oraz z przesuniętą dyspersją światłowodów skokowych jednomodowych, ukazujące różnice w ułożeniu i wielkości plamki (ω) [78]

Kilka profili gradientowych współczynnika załamania światłowodów z przesuniętą dyspersją przedstawiono na rysunku 3.13. Profil trójkątny przedstawiony na rysunku 3.13(a) był najprostszym i pierwszym, który wykazywał te same straty (tj. 0,24 dB/km) przy długości fali 1,56 μm (tj. λ_0 co konwencjonalny światłowod jednodomowy z nie przesuniętą dyspersją). Ponadto takie projekty światłowodu powodują wzrost MFD w stosunku do odpowiednich struktur skokowych, co ułatwia spawanie światłowodu. Optymalne parametry podstawowych projektów profili trójkątnych dawały najniższe straty i zero dyspersji przy długości fali 1,55 μm to mod LP_{11} miał długość fali odcięcia w obszarze 0,85–0,9 μm . Dlatego też światłowod operujący daleko od fali odcięcia ma dużą czułość na straty w zagięciach (w poszczególnych mikrozgięciach) przy długości fali 1,55 μm . Jedną z metod przeciwdziałania temu jest zastosowanie, razem z trójkątnym profilem, współczynnika załamania płaszcz, jak pokazuje to rysunek 3.13(b). W tym przypadku wrażliwość na straty mikrozgięciowe jest redukowana przez przesunięcie długości fali odcięcia modu LP_{11} do około 1,1 μm z MFD ok. 7 μm przy 1,55 μm .

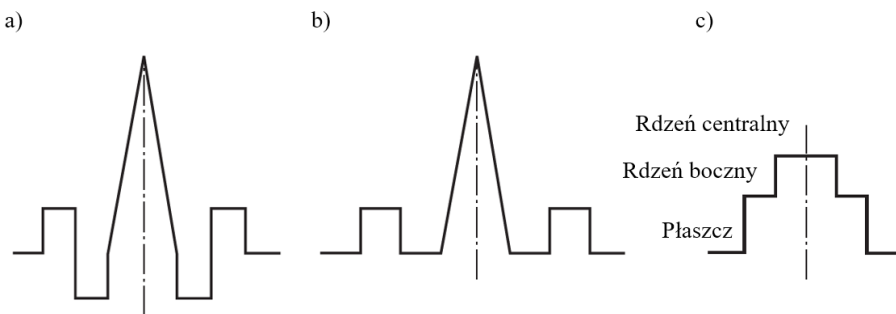


Rys. 3.13. Profile współczynnika załamania dla światłowodów gradientowych z przesuniętą dyspersją a) profil trójkątny; b) profil trójkątny z depresją płaszcz; c) profil Gaussowski [78]

Małe straty i zero dyspersji przy długości fali $1,55 \mu\text{m}$ występują tylko dla Gaussowskiego profilu współczynnika załamania, co ilustruje rysunek 3.13(c). Ten profil, który został osiągnięty przy użyciu metody VAD wykazuje straty $0,21 \text{ dB/km}$ przy $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ [78].

Alternatywne rozwiązania w produkcji jednomodowych światłowodów z przesuniętą dyspersją, opierają się na projektach złożonych współczynników załamania. Jeden z takich typów światłowodu, który został użyty do zademonstrowania przesuwania dyspersji, ale który szerzej wykorzystywany jest w światłowodach z płaską dyspersją, to światłowod o podwójnym płaszczu albo światłowod typu W. Światłowod o profilach trójkątnych ze złożonym współczynnikiem załamania i projekty profili trójkątnych z segmentowym rdzeniem, które są pokazane na rysunku 3.14(a) i (b) mają zmniejszoną czułość na mikrozgięcia przez przesunięcie fali odcięcia modu LP_{11} w stronę fal dłuższych jednocześnie utrzymując MFD ok. $9 \mu\text{m}$ przy fali o długości $1,55 \mu\text{m}$. Ostatnia technika opierająca się na wprowadzeniu pierścienia o obniżonym współczynniku załamania wokół trójkątnego rdzenia poprawia propagację modu LP_{11} w kierunku fal dłuższych. Takie światłowod występują jako produkty komercyjne i są wykorzystywane w sieciach telekomunikacyjnych, wykazują straty około $0,17 \text{ dB}$.

Prowadzone są również badania nad światłowodami z przesuniętą dyspersją o dwukształtnym rdzeniu w celu wyeliminowania strat mikrozgięciowych przy długościach fal powyżej $1,55 \mu\text{m}$. Profil o dwukształtnym współczynniku załamania rdzenia jest pokazany na rysunku 3.14(c). Prowadzone są także badania nad kilkoma profilami gradientowymi w celu wyeliminowania strat na zgięciach bez narażania na wzrost strat podczas spawania, gdy światłowod są łączone.

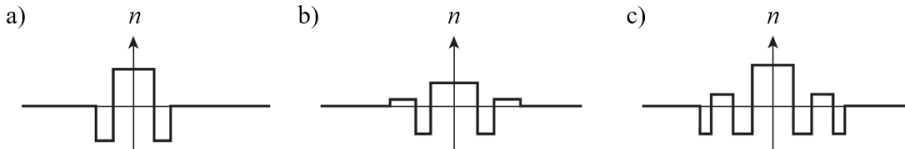


Rys. 3.14. Zaawansowane profile współczynnika załamania dla światłowodów z przesuniętą dyspersją a) profil trójkątny złożonego współczynnika załamania; b) projekt profilu trójkątnego o segmentowym rdzeniu; c) projekt dwukształtnego rdzenia [78]

3.3.2.3. Światłowody z płaską dyspersją

Oryginalna struktura W światłowodu wspomniana w rozdziale 3.3.2.2 miała być pierwotnie wykorzystana do zmodyfikowania charakterystyk dyspersji światłowodów jednodomowych w celu uzyskania dwóch długości fal zerowej dyspersji, co ilustruje rysunek 3.10. Typowy światłowod o profilu współczynnika typu W (podwójny płaszcz) jest pokazany na rysunek 3.15(a). Pierwsze praktyczne demonstracje spłaszczenia dyspersji przy użyciu struktury typu W były w roku 1981. Na wady światłowodów typu W składają się: wymaganie kontroli wysokiego stopnia wymiarów, tak jak w produkcji światłowodów z płaską dyspersją, w zasadzie duże straty całkowite (około 0,3 dB/km), tak samo jak bardzo wysoka czułość na straty zgięciowe. Ostatni fakt jest rezultatem pracy bardzo blisko długości fali odcięcia modu podstawowego w trzecim oknie telekomunikacyjnym w celu uzyskania płaskiej charakterystyki dyspersji [78].

W celu zmniejszenia czułości na straty zgięciowe związane ze strukturą typu W, w której światło penetruje w zewnętrznym płaszczu, należy wprowadzić zewnętrzny obszar o zwiększonym współczynniku załamania do struktury. To rozwiązanie zaowocowało strukturami potrójnego płaszczu (TC) i poczwórnego płaszczu (QC) pokazanymi na rysunku 3.15(b) i (c). Niezależne, ale podobne założenia doprowadziły do powstania projektów światłowodu z płaską dyspersją o segmentowym rdzeniu. Wykazały one niskie tłumienie (0,19 dB/km) dla jednodomowego światłowodu z płaską dyspersją przy 1,55 μm i znacząco zredukowane straty zgięciowe. Dodatkowo średnie straty spawania wynosiły od 0,04 do 0,05 dB przy typowych MFD 6 μm i 7 μm dla długości fal odpowiednio 1,3 μm i 1,55 μm .



Rys. 3.15. Profile współczynnika załamania światłowodu z płaską dyspersją: a) światłowod z podwójnym płaszczem (światłowod W); b) światłowod z potrójnym płaszczem; c) światłowod z poczwórnym płaszczem [78]

4. SYSTEMY TRANSMISJI OPTYCZNEJ

4.1. DWDM (DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)

Najczęściej wykorzystywanym w telekomunikacji systemem transmisji optycznej jest system zwielokrotnienia falowego DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), który umożliwia transmisję z sumaryczną przepływnością liczoną w Tbit/s.

System DWDM to jednoczesne wprowadzenie do światłowodu kilkudziesięciu lub kilkuset sygnałów optycznych, z długościami fal przesuniętymi między sobą o 200 GHz lub ułamek tego (100 GHz, 50 GHz, 25 GHz) [72].

Pierwsze wdrażane systemy DWDM to proste zwielokrotnienie transmisji w układzie punkt – punkt. Na początku linii są umieszczane nadajniki z laserami o różnych długościach fal. Sumowanie sygnałów odbywa się w multipleksersie połączonym ze światłowodem jednomodowym. Na drugim końcu linii światłowodowej jest demultipleksor, rozdzielający fale do różnych odbiorników [73]. Pomiędzy węzłami tej sieci umieszczane są wzmacniacze optyczne, znacznie zwiększające zasięg transmisji, oraz urządzenia typu ADM (Add Drop Multiplexer), umożliwiające wydzielanie ze światłowodu jednej lub kilku fal dla odbiorców lokalnych. Wzmacniacze zwiększają zasięgi, lecz nie eliminują zniekształceń impulsów wywołanych dyspersją chromatyczną, czy polaryzacyjną, która ma charakter nieliniowy i zależy od geometrii wybudowanych włókien [22][33][16].

Zjawisko nieliniowości powoduje powstawanie interferencji międzykanałowych (mieszanie czterofalowe, ang. FWM – Four Wave Mixing), co znacznie ogranicza zasięg lub przepływność kanałów [56].

System DWDM wykorzystuje pasma optyczne C i L w zakresie 1530 nm do 1610 nm [56].

4.2. METRODWDM (METROPOLITAN DWDM)

Mniej wymagające pod względem zasięgu transmisji są sieci optyczne dla aglomeracji miejskich, dla których opracowane zostały systemy MetroDWDM (Metropolitan DWDM). Istotą tych systemów jest wykorzystanie zwielokrotnienia falowego DWDM w konfiguracji zamkniętych pierścieni, zwiększone przepływności w stosunku do DWDM, możliwość kreacji połączeń w konfiguracji kratowej, mniejsze odległości między węzłami, większa różnorodność interfejsów, elastyczny system zarządzania, szybka rekonfiguracja dla potrzeb kierowania ruchem czy podłączenia nowych abonentów do sieci [56].

5. KOMPENSACJA DYSPERSJI

Operatorskie trakty światłowodowe zbudowane są w oparciu o standardowe włókno G.652. Dyspersja standardowego włókna jednomodowego w trzecim oknie wynosi ok. $17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ i ogranicza wielkość iloczynu przepływności bitowej i odległości. Jednak techniki kompensacji dyspersji są w stanie znacznie zredukować to ograniczenie [2][76]. Standardowe włókno jednomodowe, optymalizowane dla transmisji jednofalowej w drugim oknie optycznym, jest wyjątkowo dobrze przystosowane do transmisji wielofalowej DWDM w trzecim oknie optycznym.

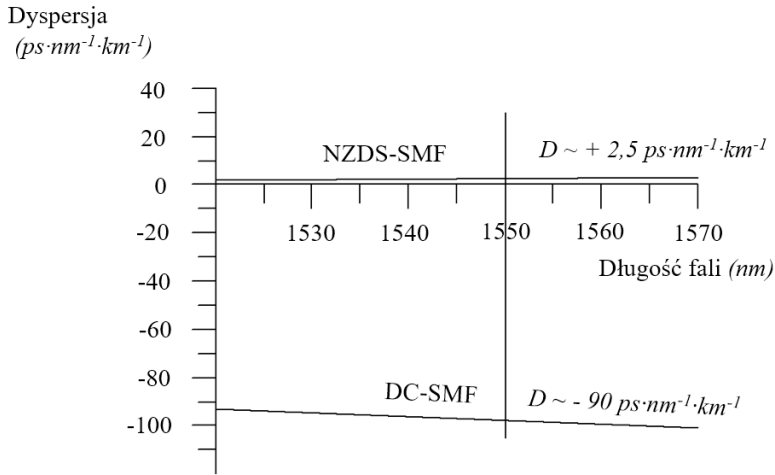
Uwzględniając wymogi dalekosiężnych systemów transmisyjnych DWDM o wysokiej przepływności bitowej, włókno telekomunikacyjne powinno mieć niską tłumienność w paśmie wzmacnienia wzmacniacza EDFA, niską dyspersję dla umożliwienia realizacji łączy dalekosiężnych, wysoką lub przynajmniej różną od zera dyspersję w paśmie wzmacnienia dla likwidacji mieszania czterofalowego i skróśnej modulacji fazy oraz niski współczynnik nieliniowy [13][52], co przede wszystkim oznacza dużą powierzchnię efektywną.

Przy dużych prędkościach transmisji w tych włóknach należy jednak mierzyć i kompensować dyspersję, stąd opracowano kilka metod kompensacji tego zjawiska [63].

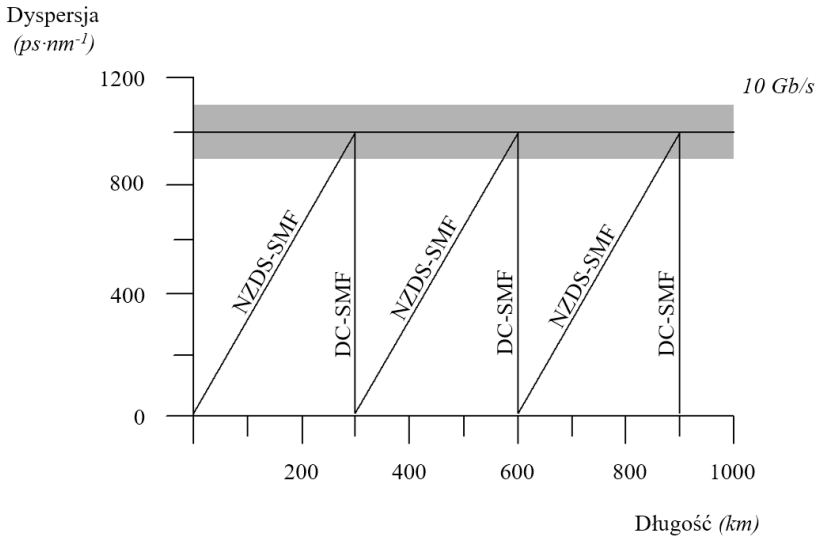
5.1. DCF-SMF

Jednym ze sposobów kompensacji dyspersji, stosowanym obecnie w operatorskich traktach światłowodowych jest wstawienie w linię, w miejscu gdzie osiągnięto odległość graniczną, światłowodu kompensującego dyspersję DC-SMF (*Dispersion Compensating Single Mode Fiber*). Charakterystykę dyspersyjną tego światłowodu w porównaniu z charakterystyką światłowodu NZDS-SMF przedstawia rysunek 5.1

Mała dyspersja światłowodów NZDS-SMF umożliwia szybką transmisję na znaczne odległości. System transmisyjny z zastosowaniem światłowodów NZDS-SMF praktycznie nie wymaga kompensacji dyspersji dla odległości do 1000 km przy prędkości transmisji 2.5 Gb/s lub do 360 km przy prędkości 10 Gb/s. Nieznaczna kompensacja dyspersji (~3 km światłowodu DC-SMF na każde 120 km linii) daje możliwość późniejszego zwiększenia prędkości transmisji. Światłowody kompensujące dyspersję zwiększają jednak istotnie tłumienność linii [21].



Rys. 5.1. Charakterystyki dyspersyjne światłowodów NZDS-SMF i DC-SMF [75]



Rys. 5.2. Kompensacja dyspersji światłowodu NZDS-SMF z zastosowaniem światłowodu DC-SMF [29]

Współczynnik kompensacji teoretycznie określa zależność:

$$c = \left| \frac{D_{DC-SMF} \cdot L_{DC-SMF}}{D_{NZDS-SMF} \cdot L_{NZDS-SMF}} \right|, \quad (5.1)$$

gdzie:

D_{DC-SMF} – współczynnik dyspersji chromatycznej światłowodu DC-SMF,

$D_{NZDS-SMF}$ – współczynnik dyspersji chromatycznej światłowodu NZDS-SMF,
 L_{DC-SMF} – długość światłowodu DC-SMF,
 $L_{NZDS-SMF}$ – długość światłowodu NZDS-SMF.

W praktyce jednak, kompensacja dyspersji z wykorzystaniem włókna DC-SMF niesie za sobą ograniczenia przy jednoczesnym stosowaniu wzmacniaczy EDFA [66]. W takiej sytuacji współczynnik kompensacji nie jest wielkością stałą i zależy od poziomu mocy transmitowanej i szybkości transmisji [67]. Efekt ten związany jest z własną modulacją fazy i dyspersją światłowodu. Przy niskich poziomach mocy współczynnik kompensacji c wynosi 1, natomiast gdy poziom mocy wzrasta, wzrasta samomodulacja fazy powodująca kompresję impulsu, co w konsekwencji powoduje zmniejszanie współczynnika kompensacji [29][81].

Ponieważ włókna światłowodowe kompensujące dyspersję mają większą wartość współczynnika nieliniowości w porównaniu z włóknami G.652 i G.655 powinny być instalowane przed wzmacniaczami optycznymi.

5.2. SIATKI BRAGA

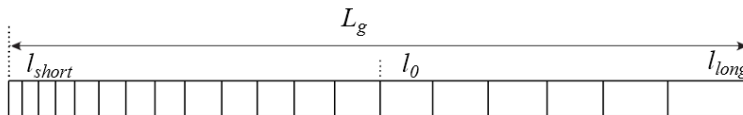
Do kompensacji dyspersji doskonale nadają się również siatki o zmiennym okresie, które ze względu na zastosowanie nazywane są również skrótowo DCG (Dispersion Compensating Gratings) [17][3][9]. Ze względu na nierównomierne rozłożenie siatki różne długości fal odbijają się w różnych miejscach, zatem przebywają różne drogi, a w konsekwencji każda długość fali doznaje innego opóźnienia na wyjściu [53]:

$$\tau(\lambda) \approx \frac{(\lambda_0 - \lambda)}{\Delta\lambda_{chirp}} \cdot \frac{2L_g}{v_g}, \quad (5.2)$$

gdzie:

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{eff} \cdot \Delta\Lambda_{chirp}, \quad (5.3)$$

oraz l_0 środkowa długość fali pasma siatki, v_g średnia prędkość grupowa wiązki światła we włóknie.



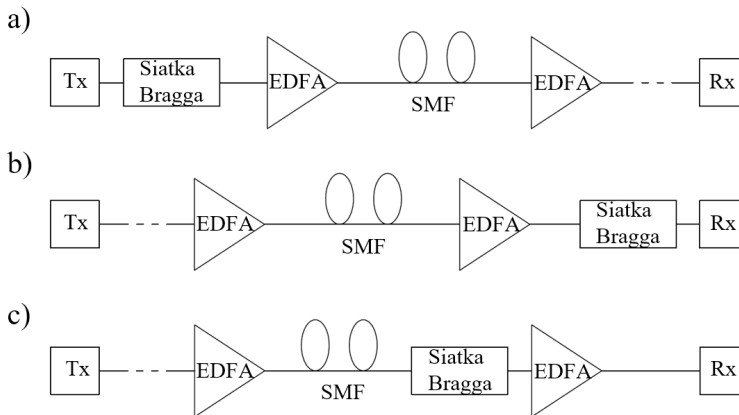
$$\Delta A_{chirp} = A_{long} - A_{short}$$

Rys. 5.3. Siatka Bragga o zmiennym okresie [36]

Siatki Bragga wykorzystuje się do tworzenia wąsko- i szerokopasmowych kompensatorów dyspersji oraz kompensatorów nachylenia charakterystyki

dyspersyjnej [4][65]. Kompensatory takie charakteryzują się niewielkimi stratami i wprowadzają stosunkowo niewielkie opóźnienia. Doskonale nadają się zatem do stosowania w długodystansowych systemach WDM i DWDM [66][27]. Ponadto produkowane są siatkowe kompensatory strojne przeznaczone do stosowania w liniach podmorskich bez zwielokrotnienia o przepływnościach do 40 Gb/s [15][41].

Sposoby instalowania siatki Bragga w systemie transmisyjnym przedstawione są na rysunku 5.4. Podobnie jak dla włókien kompensujących (DC-SMF) możemy za pomocą siatkowych kompensatorów dokonywać prekompensacji, postkompensacji lub stosować je w dowolnym innym dostępnym miejscu dla kompensacji pojedynczego odcinka [31][45].



Rys. 5.4. Miejsca montowania siatki Bragga jako kompensatora dyspersji: a) prekompensacja; b) postkompensacja; c) kompensacja jednego odcinka [64]

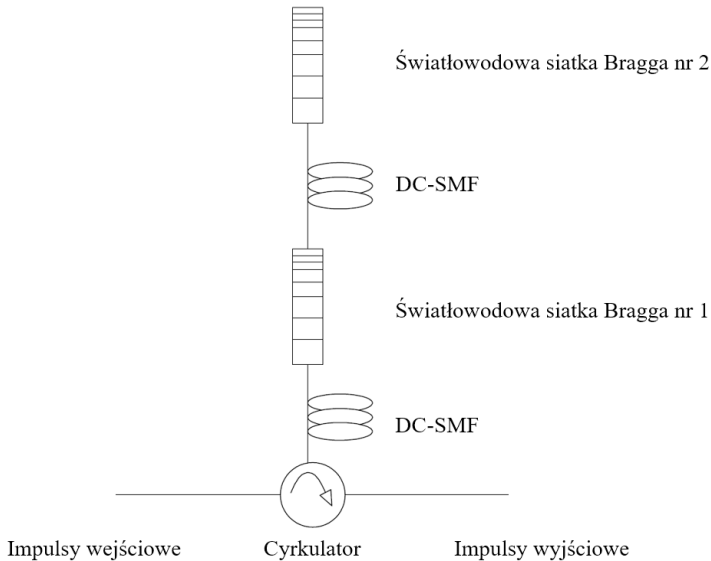
Na bazie siatki Bragga, oprócz klasycznych wąskopasmowych kompensatorów, produkowane są także elementy kompensujące nachylenie charakterystyki dyspersyjnej przeznaczone dla systemów WDM i DWDM, a także kompensatory strojne [10][68].

Przestrajalność kompensatora opartego o siatkę Bragga umożliwia zmianę współczynnika dyspersji chromatycznej w granicach od 940 ps/nm do nawet 8770 ps/nm [74].

Obecnie prowadzone są badania dla systemów o zasięgu 300 km, w których proponuje się hybrydowy system dyspersji poprzez wykorzystanie światłowodu DC-SMF i siatki Bragga [44][58]. Schemat takiego kompensatora przedstawiono na rysunku 5.5.

W tym rozwiązaniu wszystkie kanały WDM kierowane są przez cyrkulator do pętli światłowodu DC-SMF i później do serii siatek Bragga utworzonych w światłowodzie DC-SMF. Różne kanały WDM odbijają się od siatki w różnym

miejsu, w związku z czym różne kanały propagują się przez inną długość DC-SMF, co dalej przekłada się na różną kompensację dyspersji [74].



Rys. 5.5. Schemat kompensatora wykorzystującego siatki Bragga i światłowody typu DC-SMF [74]

5.3. DC-PCF

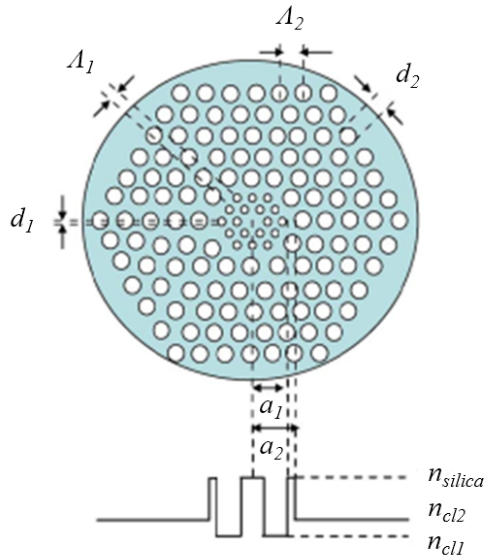
Dotychczas przedstawione metody kompensacji dyspersji chromatycznej pozwalają na optymalną kompensację tylko w jednym oknie transmisyjnym. Zastosowanie światłowodów fonicznych o strukturze double cladding (DC-PCF) pozwala na kontrolę dyspersji w całym zakresie pasma transmisyjnego [18][43][54], poprzez modelowanie długości fali przy zerowej dyspersji λ_0 i współczynnika nachylenia charakterystyki dyspersji [64][59][84].

Rysunek 5.6 przedstawia przekrój poprzeczny światłowodu DC-PCF, z podwójnym płaszczem i różnym współczynnikiem efektywności. Wewnętrzny płaszcz posiada średnicę otworu d_1 i odległość między środkami otworów Λ_1 , natomiast zewnętrzny średnicę otworu d_2 i odległość między nimi Λ_2 ; a_1 promień zewnętrzny okręgu płaszcza wewnętrznego, a_2 promień wewnętrzny okręgu płaszcza zewnętrznego [14]. Przedstawiony światłowód DC-PCF posiada centralny rdzeń, który stanowią otwory powietrza w wewnętrznym płaszczu, oraz drugi rdzeń, którym jest obszar pomiędzy a_1 i a_2 . Stąd pochodzą parametry R_a i R_n ;

$$R_a = \frac{a_2}{a_1} \tag{5.4}$$

$$R_n = \frac{n_{cl2} - n_{cl1}}{n_{cl1}} \quad (5.5)$$

gdzie n_{cl1} i n_{cl2} są efektywnymi współczynnikami płaszczu. R_n odpowiada szerokości drugiego rdzenia, natomiast R_a jest długością fali zależną i odpowiadającą relatywnemu współczynnikowi pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym płaszczem [12][34].

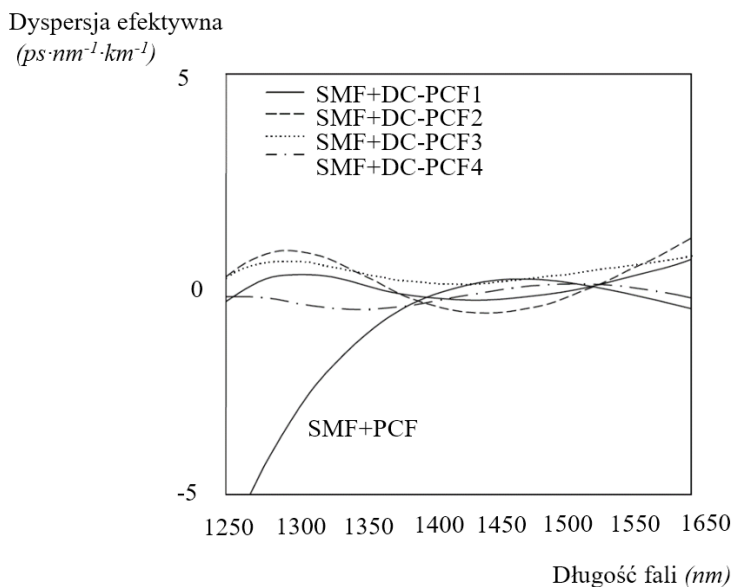
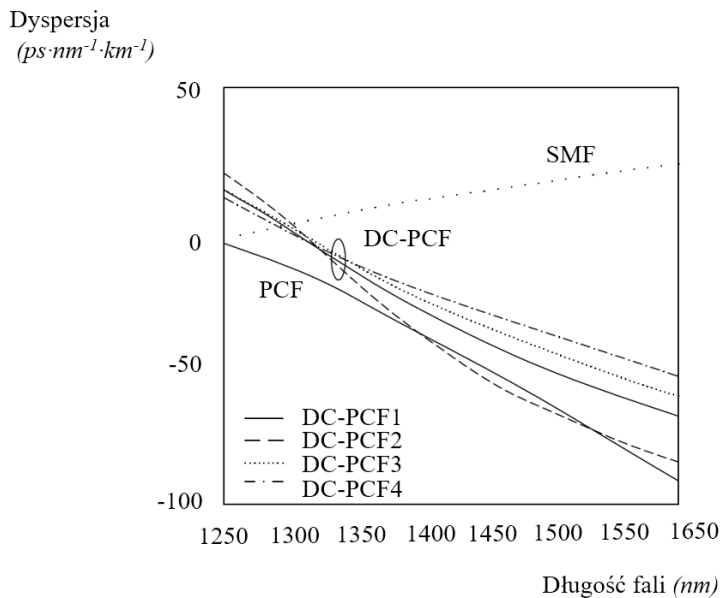


Rys. 5.6. Przekrój poprzeczny światłowodu DC-PCF i profil efektywnego współczynnika załamania [56]

Pierwszym warunkiem przy projektowaniu światłowodu kompensującego dyspersję, jest dopasowanie nachylenia charakterystyki dla danego SMF przy długości fali 1550 nm [25]. Inną zmienną braną pod uwagę, jest wartość długości fali przy zerowej dyspersji λ_0 tłumiącą niewydolność dyspersyjną przy λ_0 w SMF. Te dwa warunki prowadzą do kompensacji – dyspersja światłowodu DC-PCF obniża się, kiedy długość fali wzrasta [77][5].

Okazuje się, że charakterystyka dyspersji w światłowodach fotonicznych o małych odległościach między otworami zależy od odległości między środkami otworów oraz od ich rozmiaru [40]. Przy projektowaniu światłowodu DC-PCF, zmiana odległości między środkami otworów A_1 o 1%, powoduje zmianę długości zerowej dyspersji λ_0 o 1% [59][38]. Można sądzić, że zła jakość powierzchni otworów powietrza, spowoduje rozproszenie i powstanie dodatkowych strat i wieloprześciowej interferencji [39][61]. Dlatego, bardziej dokładny proces fabrykacji wymagałby dodatkowej techniki wypalania. Ponadto, udoskonalenie techniki spawania poprzez wykorzystanie stożkowych

włókien, będzie potrzebne do zredukowania strat spawów pomiędzy DC-PCF, a standardowym światłowodem SMF [56][6].



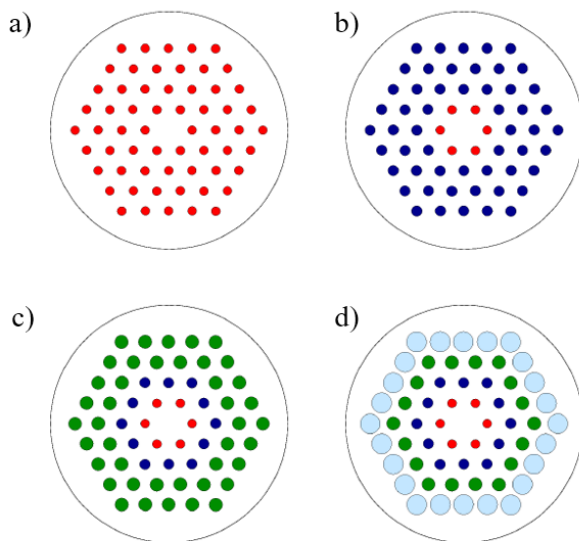
Rys. 5.7. Charakterystyka projektowanego światłowodu DC-PCF, a) właściwości projektowanego światłowodu DC-PCF w porównaniu z konwencjonalnym światłowodem DCF i SMF [56]
b) Charakterystyka projektowanego światłowodu DC-PCF, efektywna dyspersja światłowodu SMF+DC-PCF i SMF+PCF [56]

Rysunek 5.7 (a) przedstawia charakterystykę dyspersji w projektowanym światłowodzie DC-PCF. Rysunek przedstawia także dyspersję w światłowodzie PCF (ciągła szara linia). Kropkowana krzywa nawiązuje do dyspersji w konwencjonalnym światłowodzie SMF. Rysunek 5.7 (b) przedstawia także efektywną dyspersję dla światłowodu SMF + DC-PCF oraz SMF + PCF. Współczynnik długości światłowodu SMF oraz kompensacja światłowodu, powodują jeszcze mniejsze zmiany efektywnej dyspersji w całym paśmie telekomunikacyjnym. Rysunek 5.7 (b) potwierdza, że cały projekt światłowodu DC-PCF osiągnięty został poprzez efektywną dyspersję $\pm 0,8$ ps·nm·km w całym paśmie telekomunikacyjnym [64][[80].

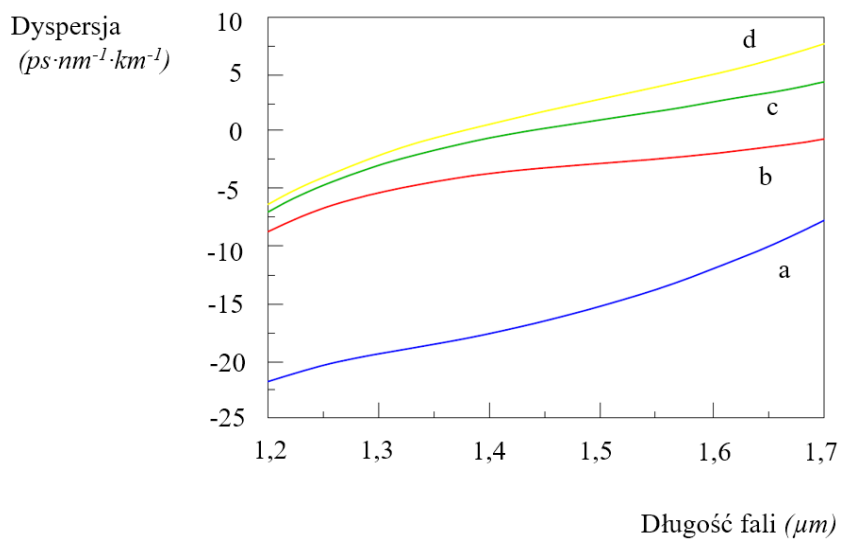
Światłowód PCF o strukturze będącej sumą kilku siatek krystalicznych może mieć prawie zerową dyspersję chromatyczną. Na rysunku 5.8 przedstawiono kolejne etapy projektowania takiego światłowodu, gdzie kolejne warstwy otaczające rdzeń, mają inne stałe siatki. Pierwsza z nich wpływa na średnicę pola modu, druga na wielkość współczynnika dyspersji D , a trzecia jest odpowiedzialna za nachylenie zmian tej wielkości w funkcji długości fali [60][46]. Odległość między otworami zawsze $A=2$ μm ; wykresy: a) jednakowa średnica $\phi = 0,5$ μm , b) zwiększenie średnicy zewnętrznych otworów, d) każda warstwa to inne otworki, odpowiednio: 0,5; 0,6, 0,7 i 0,8 μm . W efekcie tego projektowania powstaje światłowód z płaską charakterystyką dyspersji 0 ± 4 ps/km·nm w zakresie fal 1,23 μm do 1,73 μm [11][19].

Jeszcze ciekawsze zastosowanie PCF wymyślono w zastosowaniach do optycznych układów scalonych. Światłowód fotoniczny może być przewodnicą w technologii układów planarnych. Wytrawienie regularnych otworów wokół ścieżki prowadzącej światło – to małostratna przewodnica. Usunięcie (brak wytrawienia) jednego z otworów wywołuje efekt dyslokacji – powstaje rozproszenie sygnału. W bok od przewodnicy zostaje odprowadzony sygnał o jednej, ściśle określonej długości fali. Ze zbioru fal DWDM wydzielany jest wąskopasmowy kanał optyczny (OADM – Optical Add Drop Miltipekser). Cały układ ma kilka μm długości, co ułatwia budowę małych układów optycznych [56].

W ostatnim czasie zbadano również wpływ temperatury na właściwości dyspersyjne światłowodu fotonicznego [37]. Wyniki pokazują, że wraz ze wzrostem temperatury wartości efektywnych wskaźników PCF maleją, a dyspersja włókna wzrasta. W miejscach, gdzie temperatura nie jest stała i stale się zmienia, ten typ PCF może być zainstalowany w aplikacjach z kompensacją dyspersji wielu kanałów optycznych [28][35].



Rys. 5.8. Przekroje poprzeczne różnych światłowodów fotonicznych [56]

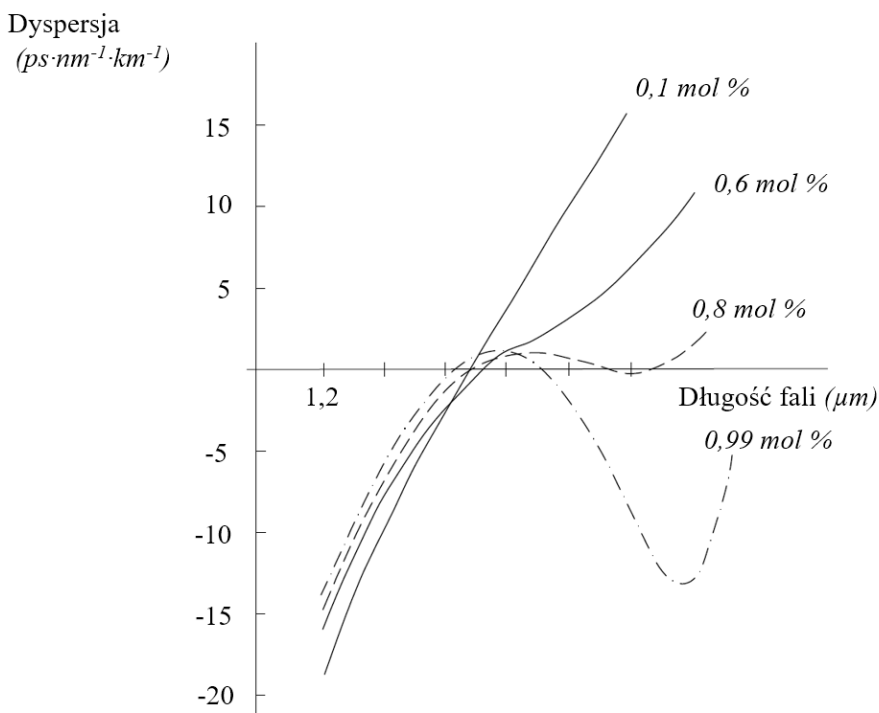


Rys. 5.9. Dyspersja chromatyczna światłowodu PCF w funkcji długości fali [55]

5.4. DOMIESZKOWANIE FLUOREM

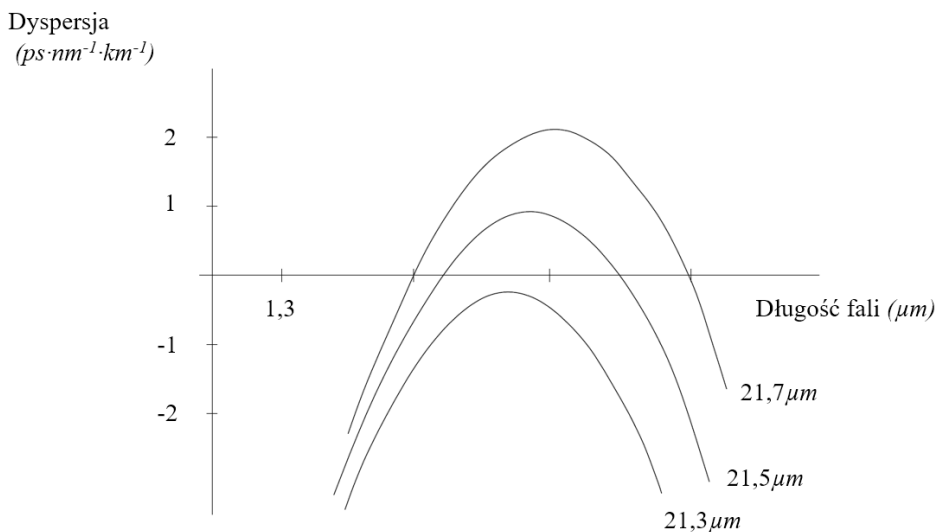
Kompensować dyspersję możemy również domieszkując profil światłowodu np. fluorem.

W pracy [57] została przedstawiona metoda domieszkowania fluorem profilu światłowodu opisanego szeregiem Czebyszewa. Na rysunku 5.10 przedstawiono wpływ domieszkowania fluorem na charakterystykę dyspersji w funkcji długości fali. Można zauważyć, że w miarę wzrostu domieszkowania fluorem pojawia się przegięcie charakterystyki dyspersji i jednocześnie przesunięcie zera dyspersji w stronę mniejszych długości fal. Dla domieszkowania na poziomie 1 mol %, zerowa dyspersja jest dla trzech długości fal [57].



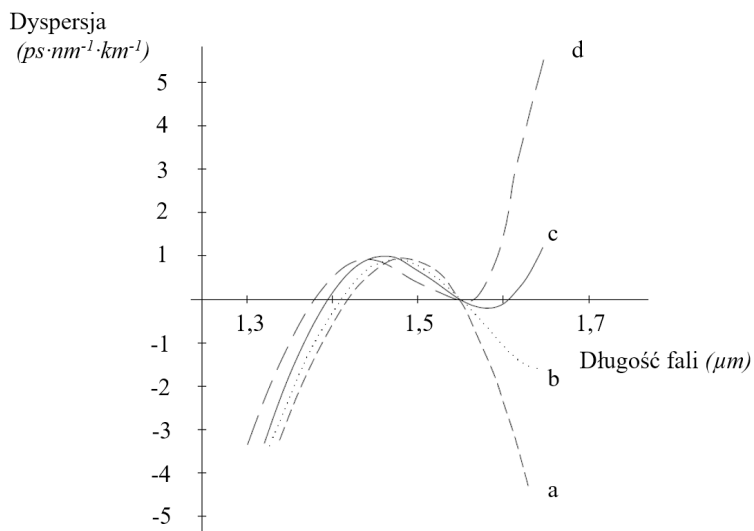
Rys. 5.10. Wpływ domieszkowania fluorem na właściwości dyspersyjne światłowodu typu W dla domieszkowania $GeO_2 - 4,5$ mol % [57]

Zwiększenie średnicy zewnętrznej powoduje przesuwanie obszaru przegięcia funkcji w stronę dodatnich wartości dyspersji, a zmniejszanie w stronę ujemnych. Na rysunku 5.11 przedstawiono wykresy dyspersji przy 1% zmianach średnicy rdzenia światłowodu [57].



Rys. 5.11. Wpływ zmian średnicy rdzenia na dyspersję dla światłowodu typu W [57]

Utrzymywanie obszaru przegięcia funkcji w pobliżu zera dyspersji jest możliwe dla różnych proporcji domieszkowania GeO_2 i F. Na rysunku 5.12 przedstawiono wykresy dyspersji dla różnych domieszkowań [57].



Rys. 5.12. Przesuwanie pasma w światłowodzie: a) GeO_2 – 4,5 mol %, F – 0,99 mol %, $2a=21,508 \mu m$, b) GeO_2 – 3 mol %, F – 0,62 mol %, $2a=24,976 \mu m$, c) GeO_2 – 2,2 mol %, F – 0,465 mol %, $2a=28,12 \mu m$, d) GeO_2 – 2,2 mol %, F – 1,8 mol %, $2a=29,945 \mu m$, bariera GeO_2 – 0,63 mol % [57]

Wynika z tego, że zmniejszanie domieszkowania GeO_2 umożliwia przesunięcie pasma o małej dyspersji w stronę małych długości fal (wykresy a), b) i c) rysunek 5.12). Efektem niepożądanym jest wówczas przesunięcie długości fali odcięcia w stronę większych długości fal oraz wzrost wrażliwości na mikrozgięcia. Wykres d) z rysunku 5.12 przedstawia dyspersję światłowodu, w którym zmniejszono domieszkowanie bariery z GeO_2 do wartości 0,63 mol % i odpowiednio zmieniono domieszkowanie fluorem i średnicę $2a$. Otrzymano w ten sposób światłowód z jeszcze większym przesunięciem pasma w stronę zakresu $1,3 \mu\text{m}$. Oznacza to, że światłowody jednomodowe przedstawione na rysunku 5.12 mogą mieć małą dyspersję $\pm 1 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ w zmienianym paśmie $1,39\text{--}1,57 \mu\text{m}$ (wykres a) rysunek 5.12) do $1,35\text{--}1,59 \mu\text{m}$ (wykres d) rysunek 5.12).

6. WYKAZANIE TEZY

6.1. NORMALIZACJE, NORMY EUROPEJSKIE

Dopuszczalne wartości dyspersji chromatycznej dla konkretnego systemu DWDM powinny być podane przez producenta systemu, ale można je również odczytać w zaleceniach ITU-T.

6.1.1. Zalecenia ITU-T G.957

Dla systemów o przepływności 2,5 Gbit/s wartość dopuszczalnej dyspersji można odczytać z zaleceń ITU-T G.957 i wynosi ona 1600 ps/nm dla górnego zakresu fal i 1200 ps/nm dla dolnego zakresu fal z przedziału 1500–1580 nm [87]. Szczegółowe dane zawiera Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Zalecenia ITU-T G.957 dla systemów 2,5 Gbit/s [87]

	Jednostka	Wartość
Sygnal cyfrowy		STM-16
Nominalna przepływność	<i>kbit/s</i>	2 488 320
Oznaczenie		L-16.2
Zakres pracy długości fali	<i>nm</i>	1500–1580
Maksymalna dyspersja dla górnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1600
Maksymalna dyspersja dla dolnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1200

6.1.2. Zalecenia ITU-T G.691

Podobnie jest dla systemów o przepływności 10 Gbit/s, wartość dopuszczalnej dyspersji można odczytać z zaleceń ITU-T G.691 i wynosi ona odpowiednio dla odcinka linii dalekiego zasięgu L o długości 80 km i V o długości 120 km, 1600 ps/nm i 2400 ps/nm dla górnego zakresu fal z przedziału 1530-1565 nm oraz 800 ps/nm i 1600 ps/nm dla dolnego zakresu fal we wskazanym przedziale [89].

Tabela 6.2. Zalecenia ITU-T G.691 dla systemów 10 Gbit/s [89]

	Jednostka	Wartość	Wartość
Oznaczenie		DST L-64.2/2	DST V-64.2
Zakres pracy długości fali	<i>nm</i>	1530–1565	1530–1565
Maksymalna dyspersja dla górnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1600	2400
Maksymalna dyspersja dla dolnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	800	1600

6.1.3. Zalecenia ITU-T G.671

Zalecenie ITU-T G.671 zawiera omówienie podstawowych parametrów elementów systemów DWDM, gdzie m.in. opisane zostały parametry kompensatora dyspersji chromatycznej. Szczegółowe wartości tłumienia dla kompensowanych linii zawiera Tabela 6.3, natomiast Tabela 6.4 przedstawia wartości dyspersji.

Tabela 6.3. Wartości tłumienia dla kompensowanych linii według zaleceń ITU-T G.671 [88]

	Długość kompensowanej linii	Maksymalne tłumienie
	<i>km</i>	<i>dB</i>
5.11.5	20	3,6
5.11.7	40	5,5
5.11.9	60	7,5
5.11.11	80	9,5
5.11.13	100	11,5
5.11.15	120	13,5

Tabela 6.4. Wartości dyspersji dla kompensowanych linii według zaleceń ITU-T G.671 [88]

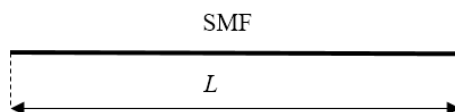
	Długość kompensowanej linii	Maksymalna dyspersja	Minimalna dyspersja
	<i>km</i>	<i>ps/nm</i>	<i>ps/nm</i>
5.12.1	10	-168	-178
5.12.2	20	-337	-356
5.12.3	30	-506	-533
5.12.4	40	-675	-711
5.12.5	50	-844	-888
5.12.6	60	-1013	-1066
5.12.7	70	-1182	-1244
5.12.8	80	-1351	-1421

6.2. METODY PROJEKTOWANIA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH

Poniżej przedstawiono typowe możliwości optymalizacji procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich liniach telekomunikacyjnych, które umożliwiają poprawę pasma bez wymiany wszystkich istniejących kabli.

6.2.1. Linia SMF bez kompensacji

Pierwszy wariant dotyczy istniejącej linii telekomunikacyjnej o długości L wybudowanej w oparciu o włókna światłowodowe w standardzie G.652 A



Rys. 6.1. Linia SMF

Tłumienie tej linii określone jest wzorem:

$$A = \alpha \cdot L, \quad (6.1)$$

gdzie α – tłumienność linii SMF [dB/km], L – długość linii SMF [km]

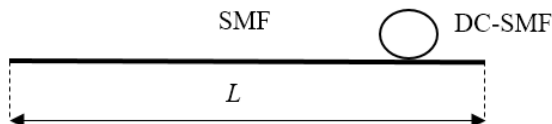
natomiast dyspersja całkowita linii SMF wynosi:

$$d = D \cdot L, \quad (6.2)$$

gdzie D – dyspersja jednostkowa linii SMF [ps/nm·km]

6.2.2. Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

W tym modelu do kompensacji linii SMF wykorzystano światłowód DC-SMF, który został nawinięty na bęben i umieszczony w węźle telekomunikacyjnym.



Rys. 6.2. Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

Tłumienie takiej linii wynosi:

$$A = \alpha \cdot L + \alpha_c \cdot L_c, \quad (6.3)$$

gdzie α_c – tłumienność kompensatora [dB/km], L_c – długość kompensatora [km],

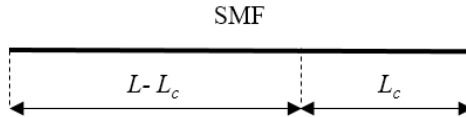
natomiast dyspersja całkowita linii z zastosowanym kompensatorem DCF-SMF wynosi:

$$d = D \cdot L + D_c \cdot L_c, \quad (6.4)$$

gdzie D_c – dyspersja jednostkowa kompensatora [ps/nm·km]

6.2.3. Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF

Model ten przedstawia linię SMF o długości $L-L_c$, w której założono wymianę odcinka istniejącego kabla SMF na kabel DC-SMF o długości L_c



Rys. 6.3. Linia SMF z wymienionym odcinkiem kabla na DC-SMF

Wówczas tłumienie takiej linii będzie wynosiło:

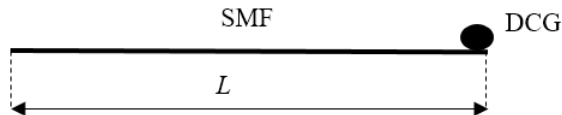
$$A = \alpha \cdot (L - L_c) + \alpha_c \cdot L_c, \quad (6.5)$$

a całkowita dyspersja linii:

$$d = D \cdot (L - L_c) + D_c \cdot L_c. \quad (6.6)$$

6.2.4. Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

W tym modelu do kompensacji dyspersji wykorzystano DCG, który został umieszczony na końcu linii



Rys. 6.4. Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

Tłumienie takiej linii będzie wynosiło:

$$A = \alpha \cdot L + A_B, \quad (6.7)$$

gdzie A_B – tłumienie DCG [dB],

a dyspersja całkowita linii wynosi:

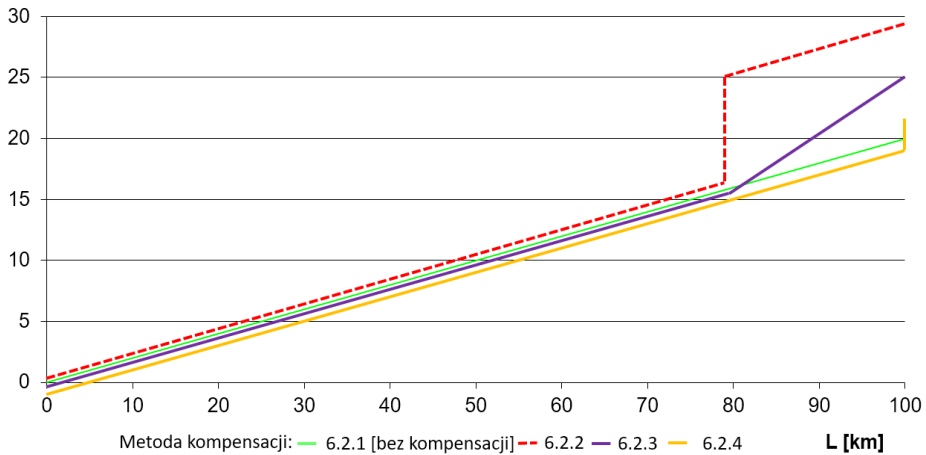
$$d = D \cdot L + d_B, \quad (6.8)$$

gdzie d_B oznacza dyspersję DCG [ps/nm]

Przykład I

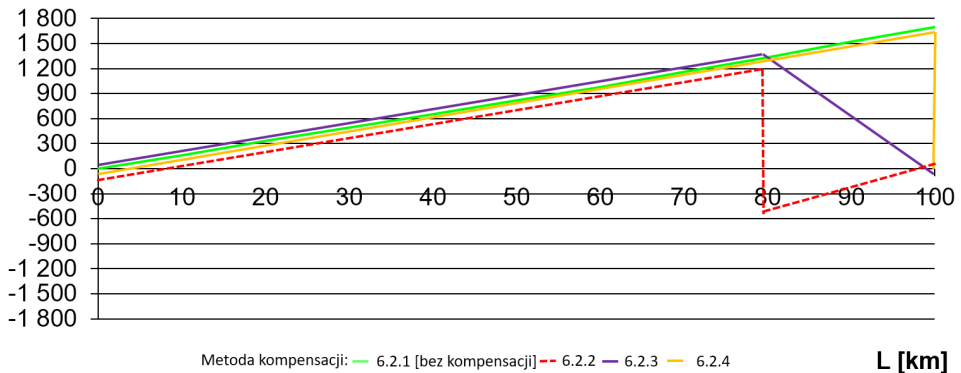
Poniżej, na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla systemu niekoherentnego na podstawie przedstawionych w pkt. 6.2 metod modyfikacji istniejących traktów światłowodowych, przy długości fali 1550.92 nm dla przykładowej linii o długości 100 km. Do kalkulacji przyjęto następujące wartości $\alpha = 0,2$ dB/km, $\alpha_{c^-} = 0,5$ dB/km, $D = 17$ ps/nm·km, $D_c = -90$ ps/nm·km, $A_B = 2$ dB, $d_B = -1700$ ps/nm [20]

A [dB]



Rys. 6.5. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji [20]

d [ps/nm]



Rys. 6.6. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji [20]

Uzyskane wyniki wskazują, że nawet dla systemów niekoherentnych o długości linii do 100 km praktycznie kompensacja nie jest wymagana, ponieważ zgodnie z zaleceniami ITU-T określonymi w pkt. 6.1.1 i 6.1.2, niewiele odbiegają one od granicznych wartości.

Jednakże, w zależności od zastosowanych elementów systemu DWDM, np. biorąc pod uwagę oferowane przez dostawców elementy systemów DWDM dla transmisji 10 Gbit/s [48] są w stanie poradzić sobie z dyspersją na poziomie kilkuset ps/nm (np. od -200 do +300 ps/nm, czy od +100 do +800 ps/nm), stąd w takich przypadkach zastosowanie metod modyfikacji istniejących traktów opisanych w pkt. 6.2.2 – 6.2.4 jest niezbędne nawet dla linii o długości 100 km.

Idąc dalej, przyjmując założenie konieczności kompensacji, przedstawione na rysunku 6.6 wartości dyspersji chromatycznej dotyczą jednokanałowego systemu DWDM. Stosowane u operatorów telekomunikacyjnych systemy posiadają wiele kanałów. Stosując kompensację dyspersji wyliczoną pod kątem jednej długości fali (w rozpatrywanym przypadku jest to 1550,92 nm), na pozostałych kanałach mamy niepełną kompensację. W Tabeli 6.5 przedstawiono wyliczone wartości dyspersji chromatycznej dla czterokanałowego systemu DWDM o długościach fal 1549,32 nm, 1550,12 nm, 1550,92 nm i 1551,72 nm. Do wyliczeń przyjęto wartości z Przykładu I oraz dodatkowo, przyjęto, że dyspersja chromatyczna w poszczególnych kanałach linii różni się o 0,06 ps/nm·km na każde 0,8 nm.

Tabela 6.5. Zmiany wartości dyspersji chromatycznej dla poszczególnych kanałów DWDM

Metoda kompensacji	Dyspersja chromatyczna d [ps/nm]			
	1549,32 nm	1550,12 nm	1550,92 nm	1551,72 nm
6.2.1 [lina bez kompensacji]	1688	1694	1700	1706
6.2.2	-11,2	-5,2	0,8	6,8
6.2.3	-10,32	-5,27	-0,23	4,82
6.2.4	-12	-6	0	6

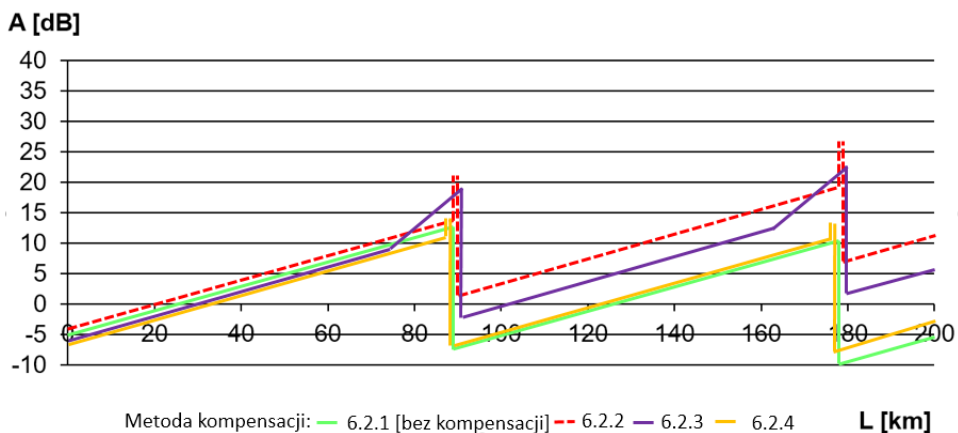
Przykład II

Kolejny przykład dotyczy linii o długości 200 km. Do wyliczeń przyjęto parametry jak w Przykładzie I, przy czym zmieniono długość linii na 200km. Dodatkowo, z uwagi na konieczność uwzględnienia wzmacniaczy optycznych, założono moc nadawania 5 dBm, czułość odbioru sygnału dla odbiornika wynosi -18 dBm, moc przesterowania tego odbiornika -10 dBm.

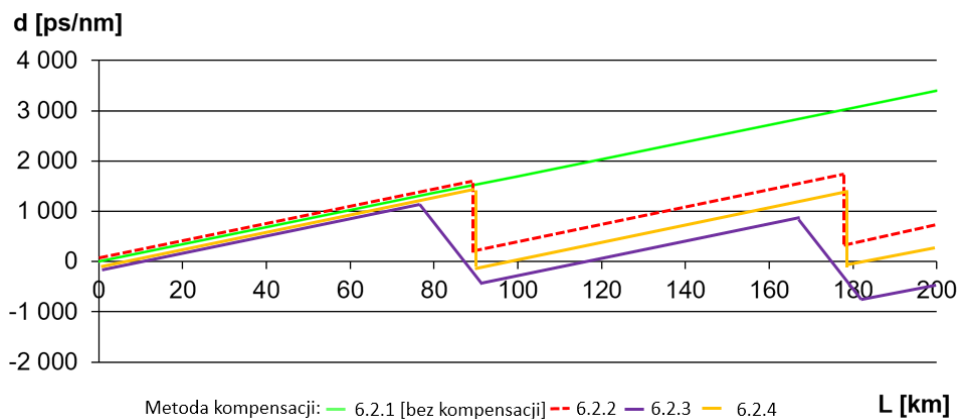
Całkowita wartość dyspersji dla zakładanej linii wynosi 3400 ps/nm·km, co oznacza, że dla systemów koherentnych kompensacja nie jest wymagana, ale dla systemów niekoherentnych bez zastosowania kompensatorów maksymalny zasięg tego systemu wynosi 94 km. Skoro dopuszczalna wartość dyspersji dla

tego systemu wynosi $1600 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$, stąd niezbędnym jest kompensacja dyspersji chromatycznej. Na podstawie wyliczeń, zastosowano w dwóch miejscach metody modyfikacji traktów opisane w pkt. 6.2, odpowiednio na 90 km i 180 km.

Całkowite tłumienie wnoszone przez linię 200 km wraz z kompensatorami wynosi 57 dB, co oznacza, że moc na wejściu odbiornika wynosi -52 dBm. Otrzymana wartość jest 34 dB poniżej czułości odbiornika. Uwzględniając przesterowanie odbiornika, do linii dodano dwa wzmacniacze o mocy 20 dB. Na rysunku 6.7 i 6.8 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla tej linii.



Rys. 6.7. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji



Rys. 6.8. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji

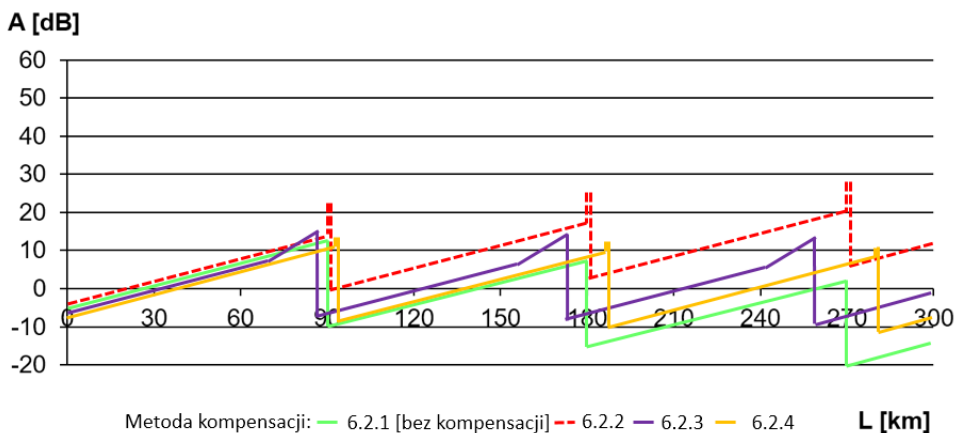
Przykład III

W tym przykładzie rozważono jeszcze dłuższą linię o długości 300 km. Wyliczenia oparto o te same parametry, które przyjęto w przykładzie I oraz w przykładzie II w zakresie wzmacniaczy systemu.

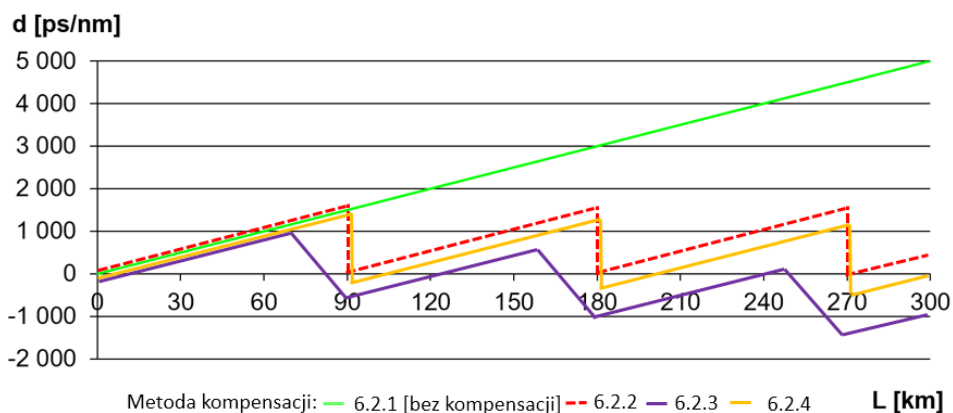
Całkowita wartość dyspersji przy założonych parametrach dla linii 300 km wynosi 5100 ps/nm·km, a więc podobnie jak w Przykładzie II, dla systemów koherentnych kompensacja nie jest wymagana, ale dla systemów niekoherentnych bez kompensacji dyspersji maksymalny zasięg tego systemu wynosi również 94 km. Stąd, zastosowano w trzech miejscach metody modyfikacji traktów opisane w pkt. 6.2, odpowiednio na 90 km, 180 km i 270 km.

Całkowite tłumienie wnoszone przez linię 300 km wraz z kompensatorami wynosi 85,5 dB, co oznacza, że moc na wejściu odbiornika wynosi -80,5 dBm. Otrzymana wartość jest 62,5 dB poniżej czułości odbiornika. Uwzględniając przesterowanie odbiornika, do linii dodano trzy wzmacniacze o mocy 22 dB.

Na rysunku 6.9 i 6.10 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla tej linii.



Rys. 6.9. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji



Rys. 6.10. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji

6.3. ANALIZA KOSZTOWA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH

Poniżej przedstawiono przykładowe analizy kosztowe proponowanych w pkt. 6.2 modyfikacji istniejących traktów optycznych dla systemów niekoherentnych, z uwzględnieniem aktualnych kosztów budowy kabli światłowodowych i elementów kompensujących dyspersję chromatyczną dostępnych na rynku. Koszty przyjęte w analizie są aktualne na czas pisania przedmiotowej rozprawy.

6.3.1. Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

Kompensator DC-SMF prezentowany w pkt. 6.2.2 to najczęściej wykorzystywany sposób kompensacji dyspersji chromatycznej przez operatorów telekomunikacyjnych. Jest to światłowód DCF-SMF nawinięty najczęściej na bęben i opakowany w dyskretne elementy rackowe wysokości 1U, które umieszcza się w szafach telekomunikacyjnych w punktach węzłowych.

Rynek aktualnie prezentuje najwięcej takich rozwiązań. Charakteryzują się one niską tłumiennością oraz szerokim spektralnym zakresem pracy. Producenci standardowo oferują kompensatory z gradacją co 10 km kompensowanej linii [50]. Możliwe są również do wykonania kompensatory DC-SMF na konkretnie zmierzoną długość linii.

Ceny uzależnione są od kompensowanego dystansu, czyli od wartości dyspersji jaka ma być skompensowana. Na podstawie uśrednionych ofert kształtują się one na poziomie od kilku do kilkunastu tysięcy złotych [70].

Przedstawiona modyfikacja traktu w pkt. 6.2.2 sprowadza się do zastosowania w punkcie węzłowym wyżej opisanych elementów, czyli koszt kompensacji w Przykładzie I przyjmuje się na poziomie kilku tysięcy złotych, natomiast w Przykładzie II jest to dwukrotność wartości z Przykładu I i analogicznie w Przykładzie III jest to trzykrotność wartości z Przykładu I.

6.3.2. Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF

Modyfikacja ta zakłada wymianę odcinka linii SMF o długości $L-L_c$, na kabel DC-SMF o długości L_c . W analizowanym Przykładzie I, przy przyjętych parametrach i kompensacji linii o długości 100 km, wymianie podlega odcinek linii SMF o długości 16 km.

Analiza kosztowa sprowadza się do dwóch czynników, kosztu kabla DC-SMF oraz kosztu wymiany kabla zlokalizowanego w kanalizacji teletechnicznej lub rurociągu kablowym.

Do analizy przyjmuje się koszt kabla światłowodowego DC-SMF na poziomie 2 tys. zł za kilometr, adekwatnie do kosztu typowego kabla telekomunikacyjnego o profilu 24J. Wymiana kabla światłowodowego uzależniona jest od rodzaju kanalizacji, w której jest zlokalizowany (kanalizacja pierwotna w miastach lub rurociągi poza miastami) i od profilu kabla (ilość włókien do spawania), ale dla analizy przyjęto, że kształtuje się ona na poziomie kilku tysięcy złotych za kilometr (ok. 7 tys. zł za km). Koszt wymiany odcinka linii SMF w analizowanym Przykładzie I wynosi ok. 140 tys. zł, natomiast w Przykładach II i III, odpowiednio dwu- i trzykrotność wartości z Przykładu I.

Przedstawiony model może mieć zupełnie inny obraz analizy kosztowej jeżeli operator telekomunikacyjny dokona wymiany kabla w sytuacji, kiedy zewnętrzne czynniki tj. np. przebudowa linii światłowodowej z uwagi na przebudowę infrastruktury drogowej lub konieczność modernizacji linii z uwagi na awarię, wymuszają wymianę kabla. Wówczas koszt kompensacji dyspersji chromatycznej w takim modelu jest bliski zeru.

Przyjmuje się, że koszt kabla DC-SMF jest porównywalny z kosztem typowego kabla SMF stosowanego w sieci przez operatorów, czyli wykorzystując daną sytuację uzależnioną od czynników zewnętrznych możemy w łatwy i bezkosztowy sposób wykonać kompensację linii.

Taka sama korzyść powstanie w sytuacji, kiedy operator będzie zobowiązany do przeniesienia węzła do innej lokalizacji i będzie się to wiązało z dobudowaniem nowego fragmentu linii światłowodowej SMF. Wówczas również można zabudować kabel DC-SMF kompensując chociaż w części dyspersję chromatyczną linii. W tej sytuacji, podobnie jak przy czynnikach zewnętrznych (przebudowa, awaria) koszt kompensacji dyspersji z punktu widzenia operatora telekomunikacyjnego jest bliski zeru.

6.3.3. Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

Kompensator DCG prezentowany w pkt. 6.2.4 to rzadziej stosowany sposób kompensacji dyspersji chromatycznej przez operatorów telekomunikacyjnych. Jest to dyskretny element z zastosowaną siatką Bragga umieszczony na końcu linii.

Charakteryzują się one jeszcze niższą tłumiennością, szerokim spektralnym zakresem pracy i bardzo niskimi opóźnieniami. Producenci oferują kompensatory dla typowych długości 60 km, 80 km i 100 km [51].

Ceny kompensatorów DCG również uzależnione są od kompensowanego dystansu, czyli od wartości dyspersji jaka ma być skompensowana, niemniej, na podstawie uśrednionych ofert kształtują się one na poziomie około 10 tysięcy złotych [70].

Przedstawiona w pkt. 6.2.4 metoda modyfikacji istniejących traktów sprowadza się również do zastosowania wyżej opisanego elementu czyli koszt kompensacji w przypadku analizowanej linii z Przykładu I przyjmuje się na poziomie 10 tysięcy złotych, a dla Przykładów II i III również odpowiednio dwu - i trzykrotność wartości z Przykładu I.

7. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki analiz wskazują, że:

1. dla linii światłowodowych o długości do 100 km nie trzeba kompensować dyspersji chromatycznej. Znaczenie mają zastosowane elementy systemu DWDM, ale zgodnie z Zaleceniami ITU-T opisanymi w pkt. 6.1, wartość dyspersji chromatycznej dla linii do 100 km mieści się w granicach określonych Zaleceniami
2. dla linii światłowodowych 200 km i 300 km również nie trzeba kompensować dyspersji pod warunkiem, że operator telekomunikacyjny zastosuje system detekcji koherentnej. W innym przypadku kompensacja jest niezbędna
3. dla systemów niekoherentnych wymagana jest kompensacja dla 20% długości linii
4. należy precyzyjnie zmierzyć sumaryczną dyspersję dla każdej linii optycznej i dobrać metodykę kompensacji w taki sposób, aby uzyskać w szerokim zakresie odpowiednią dla danej linii telekomunikacyjnej charakterystykę dyspersji przy najniższym nakładzie finansowym.

Ponadto, posługując się metodą modyfikacji zaproponowaną w pkt. 6.2.3 można uzyskać najmniejsze tłumienie linii. Z punktu widzenia operatora telekomunikacyjnego, w sytuacji, kiedy mamy awarię na danej linii, lub przebudowę linii z uwagi na przebudowę infrastruktury drogowej, metoda 6.2.3 jest optymalną również w kontekście finansowym, ponieważ zaistniała sytuacja i tak wymusza poniesienie kosztów naprawy czy modernizacji linii. Wówczas operator, praktycznie bez dodatkowych kosztów, może dokonać zmiany typu zastosowanego na danym odcinku kabla światłowodowego, co przyniesie oczekiwaną kompensację dyspersji chromatycznej. Dodatkowo, nawet jeżeli wyżej opisane sytuacje umożliwią wymianę fragmentu linii która nie skompensuje nam w pełni dyspersji chromatycznej, należy rozważyć jej zastosowanie i dokonać analizy uzyskanej kompensacji. Może się okazać, że wymiana kilku kilometrów linii, niweluje nam dyspersję do poziomu obsługiwanego przez zastosowany system DWDM.

Podobną sytuację mamy w momencie, kiedy operator będzie musiał zmienić punkt zakończenia linii, poprzez relokację węzła, wówczas, na nowobudowanym odcinku operator powinien rozważyć zastosowanie kabla DC-SMF.

W sytuacji, kiedy nie mamy możliwości wykorzystania wyżej opisanych sytuacji, wówczas przy uwzględnieniu obecnych nakładów finansowych, najkorzystniejszym sposobem optymalizacji procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w istniejących liniach światłowodowych jest metoda przedstawiona w pkt. 6.2.2. Kompensator DC-SMF nawinięty na bęben i umieszczony w węźle, przy obecnych cenach rynkowych na poziomie kilku

tysięcy złotych, gwarantuje skuteczną kompensację dyspersji do poziomu w okolicach 0 ps/nm.

Metoda optymalizacji przedstawiona w pkt. 6.2.3, przy pominięciu sytuacji awarii linii lub jej przebudowy, pozwala osiągać również dobre poziomy kompensacji, ale przy nieco wyższych kosztach inwestycyjnych.

Oczywiście, przedstawione metody kompensacji dyspersji, nie są w stanie kształtować charakterystyki dyspersyjnej linii w całym dostępnym paśmie, co jest szczególnie ważne w systemach DWDM. Nie korygują one dyspersji równomiernie, korygują ją jedynie dla określonej długości, podczas gdy długości fali sąsiadujące będą nadmiernie skompensowane lub niedostatecznie skompensowane [30].

Powyższe wykazuje, że metodyka kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych może być optymalizowana jako proces wielokryterialny, z uwzględnieniem wypadkowego pasma transmisyjnego, tłumienności toru i nakładów finansowych, a właściwe zarządzanie dyspersją linii jest procesem jej równoważenia za pomocą dodatniej i ujemnej dyspersji wzdłuż długości linii, w całym interesującym nas zakresie widma tak, aby całkowita wartość dyspersji była bliska zeru lub mieściła się w z góry określonych granicach.

Oznacza to, że cel pracy został zrealizowany, a postawiona teza została udowodniona.

8. LITERATURA

- [1] Abass A.K., Ali M.H., Tahhan S.R., *Characteristics of dispersion compensation for 32 channels at 40 Gb/s under different techniques*, Journal of Optical Communications, 41 (1), November 2017, pp. 57-65
- [2] Aggarwal S., Garg N., Kaur G., *Performance Evaluation of Various Dispersion Compensation Modules*, Wireless Personal Communications, October 2021
- [3] Aghzout O., Ait Ahmed B., Chakkour M., Chaoui F., *Enhancements using FBG and EDFA-wavelength division multiplexing optical transmission system*, International Journal of Optics, 2017
- [4] Ahlawat D., Arora P., Kumar S., *Performance evaluation of proposed WDM optical link using EDFA and FBG combination*. Journal of Optical Communications, 2019, 40:101–7
- [5] Ahmed Y., Hasan M., Jabin MA., Khan FU., Rana MJ., Tanmay MZZ., *Numerical demonstration of hexagonal-shaped dual-core-based photonic crystal fiber for a wide telecommunication window*, J Comput Electron, 2019, 18:1455–68
- [6] Ahsan M. S., Bulbul A. Al., Hossain Md. M., Mondal H. S., Rahaman Md. E., Sikder N., *High birefringence and broadband dispersion compensation photonic crystal fiber*, De Gruyter, January 2021
- [7] Ajayi O. T., Ayeni A.A., Ibironke E. S., Onidare S.O., Tihamiyu O. A., *Optical dispersion compensation using different modulation formats*, Journal of Engineering and Technology, Vol.15 No.2, Maj 2021
- [8] Al-Askary A. J., Hammadi A. M., Mohsen D. E., *WDM and DWDM based RoF System in Fiber Optic Communication Systems*: International Journal of Communication Networks and Information Security, Kohat Tom 13, April 2021, 22-32
- [9] Aly, M., Mohammed, N., Okasha, N., *A wideband apodized FBG dispersion compensator in long haul WDM systems*. J. Optoelectron. Adv. Mater. 18, 475–479, 2016
- [10] Amiri IS., Al-Awamry A., El-Aziz I. A., Kader H., Rashed A., Nabih Z., *Optical communication transmission systems improvement based on chromatic and polarization Mode dispersion compensation simulation management*, Optik, Vol. 207, April 2020
- [11] Amiri IS., Rashed ANZ., Yupapin P., *Mathematical model analysis of dispersion and loss in photonic crystal fibers*, Journal of Optical Communications, April 2019
- [12] Amiri IS., Rashed ANZ., *Different photonic crystal fibers configurations with the key solutions for the optimization of data rates transmission*, Journal of Optical Communications, July 2019

- [13] Amari A., Ciblat P., Dobre O.A., Jaouën Y., Kumar O.S., Venkatesan R., *A survey on fiber nonlinearity compensation for 400 Gb/s and beyond optical communication systems*, IEEE Commun Surv Tutor, 2017, 19:3097–113
- [14] Amoah A. K., *A theoretical investigation of a photonic crystal fiber with ultra-flattened chromatic dispersion with three zero crossing dispersion wavelengths*, Opt. Fiber Technol., 53 102032, 2019
- [15] Andreev V., *Chromatic dispersion monitoring based on Bragg notch filter central frequency polyharmonic probing*, Proc. SPIE 11146/2019, 111461M, June 2019, 7–9.
- [16] Arora P., Dahiya S., Kumar S., Sharma D., *Mitigating polarization mode dispersion for enhanced capacity in polarization division multiplexed (PDM-QAM) optical fiber communication link using hybrid optical amplifier*, SPIE proceedings Optics Photonics for Information Processing XIV 115090L, San Diego, August 2020
- [17] Bhattacharjee R., Dey P., Saha A., *Implementation of an enhanced 32 channel 256 Gbps DWDM based Radio over Fiber optical system for constricted channel spacing employing Fiber Bragg Grating*, 168598 Optik, Volume 253, March 2022
- [18] Bikash K. P., Bahar A. N., Ibadul I., Kawsar A., Rabiul H., Shadidul I., Shuvo S., Sawrab Ch., Sayed A., Uddin M. S., *Proposed Square Lattice Photonic Crystal Fiber for Extremely High Nonlinearity, Birefringence and Ultra-High Negative Dispersion Compensation*, De Gruyter August 9, January 2017
- [19] Bikash K., Fahad A., Kawsar A., Pradeep K.P.S., Rani M.T., *Ultra-high negative dispersion compensating modified square shape photonic crystal fiber for optical broadband communication*, Alexandria Engineering Journal Volume 61, Issue 4, April 2022, Pages 2799-2806
- [20] Bobruk, T., *Chromatic dispersion compensation in existing fiber optic telecommunication lines with the growing bit rates needs of DWDM system*, Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 11(4), 38-41. <https://doi.org/10.35784/iapgos.280>, grudzień 2021
- [21] Bobruk T., Smolarz A., Wójcik W., *Dispersion and its compensation in telecommunication optical fibers*, Proc. SPIE 6608, Lightguides and Their Applications III, 660814, April 2007, 6–8.
- [22] Bo L., *Optical frequency comb generation for DWDM transmission over 25- to 50-km standard single-mode fiber*, Optical Engineering 57(1), January 2018, 1–12.
- [23] Cavaliere F., Contreras L.M., Lovanna P., Stracca S., Ubaldi F., Valllosera Gemma: *Network Convergence in 5G Transport*, Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), April 2019

- [24] Cavaliere F., Giorgi L., Potí L., *Transmission and switching technologies for 5G transport networks*, 2018 IEEE Optical Interconnects Conference (OI), 4-6 June 2018
- [25] Chaudhuri P.R., Maji P.S., *Design of ultra large negative dispersion PCF with selectively tunable liquid infiltration for dispersion compensation*, Opt Commun, August 2014, 30:134–43
- [26] Chorchos Ł., Turkiewicz J., *SSMF 1310nm dispersion characteristic influence on the 400 Gbit/s and 1000 Gbit/s ethernet physical layer design*, Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104450E, 1–8.
- [27] Dev S., Suresh K., *Dispersion compensation in optical fiber communication using Bragg Grating*, IJETS. 2016; 5(9):9–15, ISSN 2394–3386
- [28] Dixit A., Pandey P., Tiwari S., *Temperature-based dispersion compensating ability of a photonic crystal fiber*, Optical Engineering Vol. 61, Issue 1, January 2022
- [29] Drabik Z., *Procedura wyznaczania niepewności pomiaru dyspersji chromatycznej*, Laboratorium Badawczego OTO, Lublin 2000, 25.
- [30] Drabik Z., Koper Z., *Wyzwania dla sieci optycznej TPSA stawiane przez technikę transmisji 10Gbit/s*. Researchgate 1/2003, 7–8.
- [31] Eid M.M.A., Ibrahim A., Rashed A.N.Z., *In line and post erbium-doped fiber amplifiers with ideal dispersion compensation fiber Bragg grating for upgrading optical access networks*, Journal of Optical Communications, February 2021
- [32] Einarsson G., *Podstawy telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa, 1998
- [33] Fischer G., *Automatic polarization mode dispersion compensation in 40 Gb/s optical transmission system*. Ei.Uni-Paderborn, August 2016, 1–5
- [34] Francis J., Peter J. M., Robert J.A., *Characterisation of longitudinal variation in photonic crystal fibre*, Opt. Express, 24 (22), 24836 –24845 October 2016
- [35] Frey B.J., Leviton D.B., *Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica*, Proc. SPIE, 6273 62732K , July 2006
- [36] Hayami S., Mukasa K., Sugizaki R., *Dispersion-Managed Transmission Lines with Reverse-Dispersion Fiber*. Furukawa Review 19/2000, 6–8.
- [37] Hasan M.I., *Highly nonlinear and highly birefringent dispersion compensating photonic crystal fiber*, Opt. Fiber Technol., 20 32 –38, January 2014
- [38] Hasan M.R., Hasan M.I. Islam M.A., Rifat A.A., *A single-mode highly birefringent dispersion-compensating photonic crystal fiber using hybrid cladding*. J Mod Opt, February 2017, 4;64:218–25

- [39] Hossain M.M., Mondal H.S., Muntaseer A.S., Rahaman M.E., Saha R., *Theoretical analysis of large negative dispersion photonic crystal fiber with small confinement loss*, Appl Optic 2020;59:8925–31
- [40] Hossain M.M., Mondal H.S., Rahaman M.E., Saha R., *Design and analysis of high birefringence and nonlinearity with small confinement loss photonic crystal fiber*, Front Optoelectron 2019;12:165–73
- [41] <http://www.teraxion.com>
- [42] Huang Y., Mao Y., Yang H., *Design of linear photonic crystal fiber with all-positive/negative ultraflattened chromatic dispersion for the whole telecom band*, Optical Engineering 60, July 2021, 1–3
- [43] Huang W. P., Jian S.S., Shen L.P., *Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation*, IEEE Photonics Technol. Lett., 15 540–542, April 2003
- [44] Hussein T.F., Moustafa H.A., Rizk M.R.M., *A hybrid DCF/FBG scheme for dispersion compensation over a 300 km SMF*, Optical Q. Electron. 51(4), 1–16, March 2019
- [45] Jha D.M., Khalid I., Rath P.S., Satyam A., Tech B., *Performance analysis of long fiber optic link using fiber Bragg grating for dispersion compensation*. Int J Eng Sci Comput, April 2017;7:1–6
- [46] Jung A., Kim S., Lee Y.S., Oh K., *Dispersion control of orbital angular momentum mode using a ring core with graded-index profile*, Proc. SPIE. 11926, Optical Manipulation and Structured Materials Conference, October 2021
- [47] Karta katalogowa elementu systemu koherentnego DWDM, luty 2022
- [48] Karty katalogowe elementów systemu niekoherentnego DWDM, luty 2022
- [49] Karta katalogowa kabla NZDSF, styczeń 2022
- [50] Karty katalogowe modułów DCF kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [51] Karty katalogowe modułów DCG kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [52] Kaur G., Patterh M.S., Singh M.L., *Effect of fibre nonlinearities in a WDM transmission system*, Optik, June 2010, 121:889–96
- [53] Kaur M., Sarangal H. *Simulation of optical transmission system to compensate dispersion using chirped fiber Bragg grating (FBG)*. Int J Adv Res Comput Comm Eng., February 2015, 4(2):357–9, ISSN (online) 2278–1021
- [54] Ferrando A., Silvestre E., Miret J.J., Andrés P., *Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers*, Opt. Lett. 25, 790–792, June 2000
- [55] Koshiha M., Saitoh K., *Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion*, April 2003

- [56] Kowalski A., *Nowoczesne sieci i systemy optotelekomunikacyjne*, Proc. SPIE 6608, Lightguides and Their Applications III, April 2007, 1–2
- [57] Kowalski A., *Zastosowanie wielomianów Czybyszewa do analizy światłowodów cylindrycznych*, Politechnika Warszawska, ISSN 0137-2343, styczeń 1992
- [58] Kumar K.V., Ranathive S., Rashed A.N.Z, Sundararajan T.V.P., Tabbour M.S.F., *Performance signature of optical fiber communications dispersion compensation techniques for the control of dispersion management*, Journal of Optical Communications, March 2019
- [59] Kumar P., Kumar V., Roy J.S., *Design of quad core photonic crystal fibers with flattened zero dispersion*, AEU-Int J Electron Commun., January 2019, 98:265–72
- [60] Kumar R., Prajapati K., Singh V., *Design of a photonic crystal fiber for dispersion compensation and sensing applications using modified air holes of the cladding*, Braz. J. Phys., 49 (5), October 2019, pp. 745-751
- [61] Lu D.K., *Dispersion engineering in single-polarization single-mode photonic crystal fibers for a nearly zero flattened profile*, IEEE Photonics J., 9 2700708, October 2017
- [62] Majewski A., *Teoria i projektowanie światłowodów*, WNT, Warszawa, 1991
- [63] Majewski J., Ratuszek M., Zakrzewski Z., *Pomiary dyspersji chromatycznej tras światłowodowych*, Krajowe sympozjum telekomunikacyjne 2001, Bydgoszcz, Septemeer 2001, s. 442–451
- [64] Matsui T., Nakajima K., Sankawa I., *Dispersion Compenastion Over All the Telecommunication Bands With Double-Cladding Photonic-Crystal Fiber*, Lightwave Technology 25(3), 2007, 1–5
- [65] Meena D., Meena M.L., *Design and analysis of novel dispersion compensating model with Chirp Fiber Bragg Grating for long-haul transmission system*, International Conference on Optical & Wireless Technologies, January 2020
- [66] Meena D., Meena M.L., *Performance analysis of DWDM optical network with dispersion compensation techniques for 4 × 8 GBPS transmission system*, ICTACT J. Microelectron. 4(2), p.613–617, July 2018
- [67] Neheeda P., Pradeep M., Shaija P.J., *Analysis of WDM system with dispersion compensation schemes*, Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Procedia Comput. Sci. Elsevier 93, 647–654, 2017
- [68] Nguyen H., *Ultra-flattened chromatic dispersion in all-solid hybrid micro-structured optical fibers for mid-infrared lightwave generation*, Proc. SPIE 10902, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVIII, 109021Q, March 2019
- [69] *Oferta cenowa kabla NZDSF*, styczeń 2022

- [70] Oferty cenowe modułów kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [71] Payal K.S. *Nonlinear impairments in fiber optic communication systems*, Futuristic Trends in Network and Communication Engineering (FTNCT-2018), Chapter-3, Vol. 958. Singapore: Springer; CCIS, January 2019. p. 28–44
- [72] Perlicki K., *Pomiar w optycznych systemach telekomunikacyjnych*, WKŁ, Warszawa, 2002
- [73] Perlicki K., *Rozwój telekomunikacyjnych sieci optycznych*, Przegląd Telekomunikacyjny 1/2001, str.17-20
- [74] Perlicki K., *Systemy Transmisji Optycznej WDM*, WKŁ, Warszawa 2007.
- [75] Procedura kompensacji dyspersji chromatycznej Laboratorium Badawczego OTO Lublin
- [76] Rashed A., Tabbour M., *The engagement of hybrid dispersion compensation schemes performance signature for ultra wide bandwidth and ultra long haul optical transmission systems*, Wireless Personal Communications, August 2019, 109, 2399–2410
- [77] Rashed A.N.Z., Tabbour M.S.F., Vijayakumari P., *Numerical analysis of optical properties using octagonal shaped photonic crystal fiber*. Journal of Optical Communications, February 2019
- [78] Senior J., *Optical Fiber Communications*, Prentice Hall, London, 1992
- [79] Siuzdak J., *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa, 1997
- [80] Song P., Wang J., Zhou C., *High birefringence and near-zero dispersion photonic crystal fiber at the wavelength of 1.55 μ m*, Proc. SPIE 10255, Selected Papers of the Chinese Society for Optical Engineering Conferences held October and November 2016, 102553O, 2017, 1–5.
- [81] Szymańska A., *Łacza światłowodowe – budżet mocy*. Politechnika Warszawska, Ośrodek Kształcenia na Odległość OKNO, 2018.
- [82] Turkiewicz J., *Transmisja i przetwarzanie sygnałów optycznych o wysokich przepływnościach wykorzystująca półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne*, Politechnika Warszawska, ISSN 0137-2343, z.192, wrzesień 2013
- [83] Yabai H., *Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy*, Optica, vol. 5, no. 2, pp. 138–146, February 2018
- [84] Yang T., *High birefringence photonic crystal fiber with high nonlinearity and low confinement loss*, Opt. Express, 23 (7), 8329–8337, April 2015
- [85] *Zalecenia ITU-T G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, 03/2003

- [86] *Zalecenia ITU-T G.655, Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*, 03/2003
- [87] *Zalecenie ITU-T G.957, Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*, 2006
- [88] *Zalecenia ITU-T G.671, Transmission characteristics of optical components and subsystems*, 2019
- [89] *Zalecenie ITU-T G.691, Optical interfaces for signal channel STM-64 and other SDH systems with optical*, 2006
- [90] Zientkiewicz J., *Podstawy systemów światłowodowych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1997