



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

ROZPRAWY NR 133

Marek Ratuszek

TERMICZNE POŁĄCZENIA JEDNOMODOWYCH ŚWIATŁOWODÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH

BYDGOSZCZ – 2008

REDAKTOR NACZELNY
prof. dr hab. inż. Janusz Prusiński

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr inż. Sławomir Cieślik

OPINIODAWCY
prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz
dr hab. inż. Sergiusz Patela

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Michał Górecki, mgr Patrycja Fereni-Morzyńska

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2008

ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.utp.edu.pl/~wyd>

Wyd. I. Nakład 120 egz. Ark. aut. 11,25. Ark. druk. 12,75. Zamówienie nr 8/2008
Oddano do druku i druk ukończono we wrześniu 2008 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

*Małgorzacie, Agacie i Dorocie
oraz
moim Nauczycielom z Piotrkowa Trybunalskiego,
Lwowa i Wrocławia*

Spis treści

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów | 7 |
| 1. Wstęp | 10 |
| 2. Termiczne łączenie metodą spajania w łuku elektrycznym | 19 |
| 2.1. Centrowanie włókien | 20 |
| 2.1.1. Metoda LID jako metoda centrowania do rdzenia | 21 |
| 2.2. Analiza gorącego obrazu włókna w obszarze spoiny | 22 |
| 2.3. Typy spawarek użytych do badań | 24 |
| 2.4. Obrazy termoluminescencji gorących spoin | 26 |
| 2.4.1. Analiza obrazów gorących spoin – krzywe termoluminescencji | 26 |
| 2.5. Obrazy termoluminescencji gorących spoin badanych światłowodów | 31 |
| 3. Straty w termicznych połączeniach jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych | 36 |
| 3.1. Propagacja fali świetlnej w dielektrycznych światłowodach włóknistych – równania Maxwella | 36 |
| 3.1.2. Propagacja w strukturach włóknistych – równanie falowe | 37 |
| 3.1.3. Jednomodowe światłowody włókniste o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym | 39 |
| 3.1.4. Przybliżenie Gaussa dla jednomodowych światłowodów włóknistych o przekroju kołowym i słabym przewodzeniu | 41 |
| 3.2. Łączenie światłowodów włóknistych – model uproszczony | 43 |
| 3.3. Termiczne łączenie światłowodów – analiza tłumienia obszaru przejściowego | 47 |
| 3.3.1. Analiza właściwości transmisyjnych dyfuzyjnego obszaru przejściowego | 49 |
| 3.3.1.1. Model szczeliny | 50 |
| 3.3.1.2. Model transformacji fazy | 52 |
| 3.4. Dyfuzja domieszki w procesie zgrzewania – warunki brzegowe | 55 |
| 3.4.1. Dyfuzja z nieograniczonego i ograniczonego źródła domieszki – struktury płasko-równoległe | 56 |
| 3.4.2. Dyfuzja z ograniczonego źródła domieszki – struktury cylindryczne | 57 |
| 3.5. Termiczne łączenie – symulacja strat | 57 |
| 3.5.1. Obliczenia współczynników dyfuzji GeO_2 w SiO_2 | 59 |
| 3.5.2. Wartości współczynników dyfuzji i ich interpretacja | 60 |
| 3.5.3. Rozkłady dyfuzyjne domieszki rdzeniowej i ich gaussowska aproksymacja – struktura cylindryczna | 62 |
| 3.5.4. Rozkłady współczynników załamania | 65 |
| 3.5.5. Dopasowanie promieni pól modowych | 67 |
| 3.5.6. Straty w obszarze przejściowym termicznie łączonych włókien | 70 |
| 3.5.7. Termiczne łączenie światłowodów telekomunikacyjnych z dużą powierzchnią efektywną | 77 |
| 3.6. Jednomodowość dyfuzyjnych obszarów przejściowych | 84 |
| 3.6.1. Profile równej objętości | 85 |
| 3.6.2. Częstotliwość odcięcia dla profili równej objętości | 87 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. | Opis włókien światłowodowych użytych do badań eksperymentalnych | 90 |
| 4.1. | Standardowe, quasi-universalne włókno MC-SMF – rozważania projektowe, parametry | 90 |
| 4.2. | Włókna DC-SMF | 96 |
| 4.3. | Włókna DS-SMF i NZDS-SMF z przesunięciem do III okna zerem dyspersji | 96 |
| 4.4. | Pomiary profili współczynników załamania i wymiarów geometrycznych..... | 97 |
| 4.5. | Pomiary tłumienności, średnicy pola modu, długości fali odcięcia i dyspersji chromatycznej..... | 103 |
| 5. | Reflektometryczne pomiary włókien i spoin – analiza, możliwości interpretacyjne | 107 |
| 5.1. | Reflektometryczne pomiary strat termicznych połączeń światłowodów | 107 |
| 5.1.1. | Jednokierunkowe tłumienie spoin..... | 110 |
| 5.1.2. | Zależność tłumienia spoin od długości fali pomiarowej..... | 111 |
| 5.1.3. | Pomiary reflektometryczne spoin – analiza teoretyczna i wyniki eksperymentów | 114 |
| 5.2. | Straty w światłowodach jednomodowych dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych $\lambda = 1310, 1450, 1550$ i 1625 nm..... | 123 |
| 5.2.1. | Makrozgięcia | 124 |
| 5.2.2. | Mikrozgięcia..... | 127 |
| 5.3. | Korekcja błędów w reflektometrycznych pomiarach długości odcinków spajanych..... | 128 |
| 6. | Optymalizacja procesu grzewania, badanie dyfuzyjnego obszaru przejściowego | 134 |
| 6.1. | Zgrzewanie światłowodów o porównywalnych promieniach pola modu | 134 |
| 6.2. | Zgrzewanie światłowodów istotnie różniących się promieniami pola modu..... | 136 |
| 6.2.1. | Reflektometryczna metoda oceny procesu optymalizacji..... | 138 |
| 6.3. | Wpływ warunków klimatycznych na termiczne łączenie włókien..... | 144 |
| 6.3.1. | Badania wytrzymałości mechanicznej spoin na zrywanie | 144 |
| 6.4. | Mikroobserwacje i mikroanaliza dyfuzyjnych obszarów przejściowych..... | 147 |
| 6.4.1. | Badania mikroskopem optycznym i ich analiza..... | 147 |
| 6.4.2. | Badania elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM), mikroanaliza rentgenowska | 149 |
| 7. | Dyspersja chromatyczna i polaryzacyjna w termicznie łączonych jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych | 161 |
| 7.1. | Dyspersja chromatyczna | 161 |
| 7.1.1. | Dyspersja chromatyczna – ograniczenia transmisyjne..... | 164 |
| 7.1.2. | Dyspersja chromatyczna w spajanych liniach światłowodowych..... | 166 |
| 7.2. | Dyspersja polaryzacyjna | 172 |
| 7.2.1. | PMD – ograniczenia transmisyjne, pomiary linii spajanych..... | 175 |
| 8. | Zakończenie..... | 183 |
| | Załącznik 1. | 187 |
| | Literatura..... | 191 |
| | Streszczenia..... | 203 |

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

| | |
|------------------|------------------------------------------------------------------|
| a | – promień rdzenia |
| A_α | – tłumienie wynikające z niedopasowania promieni pól modowych |
| A_{diff} | – promień rdzenia po dyfuzji |
| A_{eff} | – powierzchnia efektywna |
| A_s | – tłumienie spoiny w pomiarze reflektometrycznym |
| A_{12}, A_{21} | – jednokierunkowe tłumienie spoiny w pomiarze reflektometrycznym |
| \vec{B} | – wektor indukcji magnetycznej |
| c | – prędkość światła w próżni |
| \vec{D} | – wektor indukcji elektrycznej |
| D | – współczynnik całkowitej dyspersji chromatycznej |
| D_m | – współczynnik dyspersji materiałowej |
| D_f | – współczynnik dyspersji falowodowej |
| \vec{E} | – wektor natężenia pola elektrycznego |
| E | – natężenie pola elektrycznego |
| E_a | – energia aktywacji domieszki |
| E_x, E_y, E_z | – kartezjańskie składowe natężenia pola elektrycznego |
| erf | – funkcja błędu |
| $erfc$ | – dopełnienie funkcji błędu |
| f | – częstotliwość |
| $F_0(r)$ | – osiowo symetryczne rozwiązanie równania falowego |
| \vec{H} | – wektor natężenia pola magnetycznego |
| H | – natężenie pola magnetycznego |
| H_x, H_y, H_z | – kartezjańskie składowe natężenia pola magnetycznego |
| HE | – mod hybrydowy |
| j | – liczba, $j^2 = -1$ |
| J | – strumień atomów domieszki |
| J_m | – funkcja Bessela pierwszego rodzaju m-tego rzędu |
| k | – liczba falowa, stała Boltzmannna |
| l | – długość, azymutalna liczba falowa |
| L_c | – charakterystyczna długość dyfuzyjnego obszaru przejściowego |
| LP | – mod liniowo spolaryzowany |
| n | – współczynnik załamania |
| $n(r)$ | – radialny rozkład współczynnika załamania |
| n_g | – grupowy współczynnik załamania |
| n_p | – współczynnik załamania w płaszczyźnie |
| n_r | – współczynnik załamania w rdzeniu |

| | |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N | – koncentracja domieszki |
| $N(r)$ | – radialny rozkład koncentracji domieszki |
| P | – moc promieniowania |
| r | – promień, współrzędna |
| r_r | – współczynnik odbicia |
| R | – promień znormalizowany |
| S | – współczynnik rozpraszania wstecznego |
| t | – czas, temperatura w °C |
| t_t | – współczynnik transmisji |
| T | – współczynnik transmisji mocy |
| v_f | – prędkość fazowa |
| v_g | – prędkość grupowa |
| V | – częstotliwość znormalizowana |
| V_c | – częstotliwość odcięcia |
| w | – parametr światłowodu |
| W | – promień pola modu |
| W_{diff} | – promień pola modu po dyfuzji |
| $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ | – wersory wzdłuż osi x, y, z |
| α | – tłumienność jednostkowa |
| β | – stała propagacji |
| Δ | – względna różnica współczynników załamania |
| ε | – przenikalność elektryczna ośrodka |
| ε_0 | – przenikalność elektryczna próżni |
| ε_r | – względna przenikalność elektryczna ośrodka |
| η | – współczynnik sprzężenia |
| λ | – długość fali |
| λ_c | – długość fali odcięcia |
| μ | – przenikalność magnetyczna ośrodka |
| μ_0 | – przenikalność magnetyczna próżni |
| τ_g | – opóźnienie grupowe |
| $\Delta\tau_g, \Delta\tau$ | – różnicowe opóźnienie grupowe |
| ω | – pulsacja |
| Ω | – efektywna objętość profilu |
| ∇ | – operator nabra |
| $\nabla \cdot$ | – dywergencja |
| $\nabla \times$ | – rotacja |
| ∇^2 | – laplasjan |
| DC-SMF | – światłowód jednomodowy z depresyjnym płaszczem (ang. <i>Depressed Cladding Single Mode Fiber</i>) |
| DCF | – światłowód kompensujący dyspersję (ang. <i>Dispersion Compensation Fiber</i>) |

| | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DS-SMF | – światłowód jednomodowy z przesuniętą dyspersją (ang. <i>Dispersion Shifted – Single Mode Fiber</i>) |
| DWDM | – gęste zwielokrotnienie z podziałem długości fali (ang. <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>) |
| EDFA | – wzmacniacz światłowodowy domieszkowany erbem (ang. <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>) |
| FWM | – mieszanie czterofalowe (ang. <i>Four Wave Mixing</i>) |
| LEAF | – światłowód z dużą powierzchnią efektywną (ang. <i>Large Effective Area Fiber</i>) |
| LSA | – metoda aproksymacji najmniejszych kwadratów (ang. <i>Least Square Approximation</i>) |
| MC-SMF | – światłowód jednomodowy ze skokowym profilem współczynnika załamania (ang. <i>Matched Cladding Single Mode Fiber</i>) |
| MCVD | – wewnętrzne osadzanie szkła z fazy gazowej (ang. <i>Modified Chemical Vapour Deposition</i>) |
| MFD | – średnica pola modu (ang. <i>Mode Field Diameter</i>) |
| MFR | – promień pola modu (ang. <i>Mode Field Radius</i>) |
| NA | – apertura numeryczna (ang. <i>Numerical Aperture</i>) |
| NZDS-SMF | – światłowód jednomodowy z przesuniętą niezerową dyspersją (ang. <i>Non Zero Dispersion Shifted - Single Mode Fiber</i>) |
| OTDR | – optyczny reflektometr w dziedzinie czasu (ang. <i>Optical Time Domain Reflectometer</i>) |
| OVD | – zewnętrzne osadzanie szkła z fazy gazowej (ang. <i>Outside Vapour Deposition</i>) |
| PMD | – dyspersja polaryzacyjna (ang. <i>Polarization Mode Dispersion</i>) |
| RTC | – kontrola w czasie rzeczywistym (ang. <i>Real Time Control</i>) |
| SI | – profil skokowy (ang. <i>Step Index</i>) |
| SMF | – światłowód jednomodowy (ang. <i>Single Mode Fiber</i>). |
| TRD | – obszar termicznie rozdyfundowanej domieszki |
| VAD | – osiowe osadzanie szkła z fazy gazowej (ang. <i>Vapour Axial Deposition</i>) |
| WDM | – zwielokrotnienie z podziałem długości fali (ang. <i>Wavelength Division Multiplexing</i>) |

1. Wstęp

W telekomunikacji najczęściej stosowane są światłowody włókniste o przekroju kołowym, których długość jest znacznie większa od przekroju. Jednomodowe światłowody włókniste, stanowiące przedmiot rozprawy, prowadzą powyżej pewnej długości fali, zwanej długością fali odcięcia λ_c , tylko hybrydowy mod podstawowy HE_{11} [1]. Wykonuje się je ze szkła krzemionkowego (amorficznego SiO_2); najprostsze składają się z koncentrycznego rdzenia i płaszczka o standardowej średnicy 125 μm . Rdzeń ma niewiele większy współczynnik załamania niż płaszcz – zwykle mniej niż 1% [1]. Oznacza to, że jednomodowe światłowody telekomunikacyjne są włóknami o słabym przewodzeniu. Nazwa ta bierze się stąd, że światło jest skupione nie tylko w ich rdzeniu, lecz także w obszarze płaszczka tym więcej, im współczynniki załamania różnią się mniej [1]. Projektuje się je tak, aby pozostawały jednomodowe w orientacyjnym zakresie 1200÷1750 nm, gdzie tłumienność wolnego od jonów wodorotlenowych OH^- szkła krzemionkowego jest mniejsza od 0,5 dB/km.

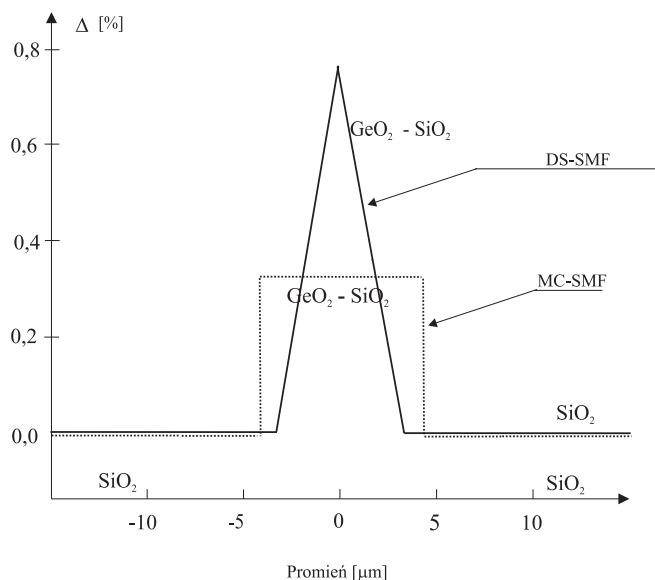
W jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych współczynnik załamania nie zmienia się wzdłuż włókna i zależy tylko od współrzędnej radialnej, tworząc profil w przekroju poprzecznym – $n(r)$. Rozkład współczynnika załamania profiluje się poprzez odpowiednie domieszkowanie szkła krzemionkowego – najczęściej GeO_2 w celu zwiększenia i F w celu zmniejszenia wartości tegoż współczynnika w stosunku do SiO_2 . Odpowiednie dobranie wymiarów rdzenia oraz profilu współczynnika załamania (zmian koncentracji domieszek) powoduje zmiany dyspersji falowodowej, a tym samym uzyskanie pożądanej charakterystyki dyspersyjnej światłowodu [1].

Do profilowania współczynnika załamania używa się wielu funkcji. Wyróżnia się profile skokowe, charakteryzujące się stałym współczynnikiem załamania w obszarach rdzenia i płaszczka, dwuskokowe, wieloskokowe, trójkątne, trapezowe i o bardziej skomplikowanych kształtach. W rzeczywistości otrzymuje się światłowody o ciągłym profilu współczynnika załamania, gdyż w procesie wyciągania światłowodów występują procesy dyfuzji domieszek, deformujące założony profil współczynnika załamania [2, 3].

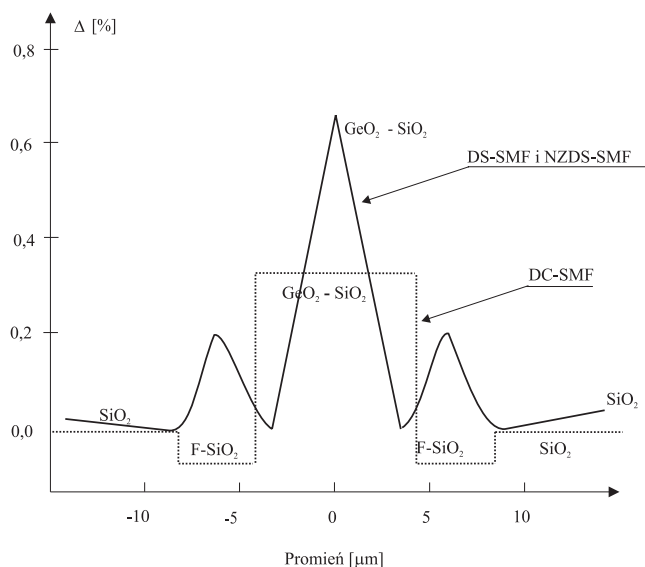
Telekomunikacyjne światłowody o skokowym i dwuskokowym – zwanym W profilach współczynnika załamania – rysunek 1.1 i rysunek 1.2 projektuje się tak, aby dla długości fali około 1310 nm (obszar tzw. II okna optycznego) dyspersja chromatyczna przyjmowała wartość zero [4÷7] – rysunek 1.3. Takie światłowody określa się jako standardowe: skokowe (nie depresyjne) jako MC-SMF (*Matched Cladding Single Mode Fiber*), a typu W jako DC-SMF (*Depressed Cladding Single Mode Fiber*). Ich parametry, dla różnych modyfikacji, są zdefiniowane w zaleceniach G.652: A, B, C, D [8] Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej (ITU-T), dlatego też tę grupę włókien nazywa się często światłowodami G.652. Trójkątny profil współczynnika załamania jest charakterystyczny dla światłowodów z przesunięciem do III okna zerem dyspersji chromatycznej, gdzie tłumienność szkła krzemionkowego jest najmniejsza. Określa się je jako DS-SMF (*Dispersion Shifted Single Mode Fiber*). Charakterystyka dyspersyjna tych światłowodów przechodzi przez zero przy długości fali około 1550 nm – rysunek 1.3. Przesunięcie charakterystyki dyspersyjnej odbywa się poprzez zwiększenie ujemnej wartości dyspersji falowodowej, tj. kosztem zmniejszenia średnicy rdzenia i zwiększenia różnicy współczynników załamania między płaszczem a rdzeniem [9]. Często nazywa się je, od numeru zalecenia ITU-T, światłowodami G.653 [10].

Światłowody DS-SMF projektowane były dla jednofalowej transmisji w III oknie optycznym. Wprowadzenie systemów zwielokrotnienia falowego WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) spowodowało zmianę wymagań dla włókien z zerową dyspersją w III oknie optycznym. Aby zminimalizować wpływ nieliniowego efektu mieszania czterofalowego FWM (*Four Wave Mixing*), występującego w transmisji wielofalowej, dyspersja chromatyczna włókna, dla zakresu długości transmitowanych fal, powinna przekraczać odpowiednią wartość – znak dyspersji ma mniejsze znaczenie [11÷13]. Włókna DS-SMF nie spełniają tych wymagań.

W celu redukcji wpływu FWM zaprojektowano włókna NZDS-SMF (*Non Zero Dispersion Shifted – Single Mode Fiber*). Światłowody NZDS-SMF charakteryzują się, w zakresie działania WDM, współczynnikiem dyspersji na poziomie kilku ps/nm×km, co zmniejsza efekt FWM, natomiast nie zmniejsza prędkości transmisji i umiarkowanie ogranicza zasięg systemów WDM. Najczęściej stosowanymi profilami współczynnika załamania we włóknach NZDS-SMF, od zaleceń ITU-T G.655 A, B, C zwanymi też G.655 [14], są profile trójkątne lub wieloskokowe, np. typu „korona” [15] – rysunki 1.1 i 1.2.



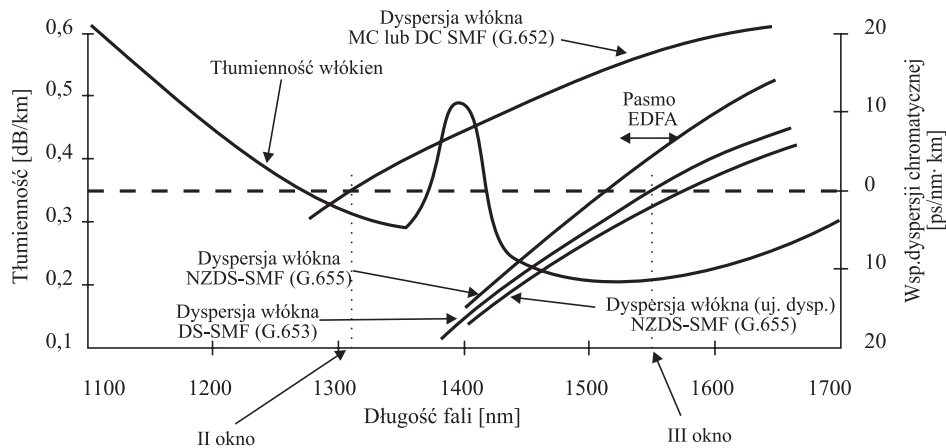
Rys. 1.1. Teoretyczne profile współczynników załamania w światłowodach DS-SMF i MC-SMF [1, 15]



Rys. 1.2. Teoretyczne profile współczynników załamania w światłowodach DS-SMF i NZDS-SMF oraz DC-SMF [1, 15]

Światłowody telekomunikacyjne wytwarza się trzema zasadniczymi metodami: MCVD (*Modified Chemical Vapour Deposition*), OVD (*Outside Vapour Deposition*) i VAD (*Vapour Axial Deposition*) [1, 6, 16]. W środowisku technologów uważa się, że proces OVD najlepiej zapewnia wysoką zgodność parametrów optycznych, geometrii i wytrzymałości mechanicznej włókien telekomunikacyjnych [16].

Doskonalenie czystości technologii wyciągania włókien doprowadziło, około 1997 roku, do wyeliminowania w SiO_2 pików absorpcyjnego spowodowanego obecnością jonów wodorotlenowych OH^- [15]. Jak już wspomniano, otworzyło to zakres transmisji od 1200÷1750 nm, w którym tłumienność nie przekracza 0,5 dB/km. W rzeczywistości, ze względu na długość fali odcięcia w kablu λ_{cc} (ograniczenie krótkofalowe) i straty makrozgięciowe (ograniczenie długofalowe), do dyspozycji pozostaje zakres 1270÷1700 nm, tj. pasmo ok. 60 THz, które może być wykorzystane w technice multipleksacji falowej WDM. Ze względu na pasmo wzmocnienia klasycznych wzmacniaczy EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) większość systemów WDM pracuje w zakresie długości fal 1528÷1560 nm, nazywanym pasmem C (*Conventional*) III okna optycznego [17]. Zastosowanie wzmacniaczy światłowodowych z włóknami ze szkła fluorkowego (*Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifier*) zapoczątkowało poszerzenie zakresu działania systemów WDM o tzw. pasmo L (*Longwave*), rozciągające się w przedziale 1570÷1610 nm. Zastosowanie wzmacniaczy półprzewodnikowych i Ramana umożliwia już transmisję w zakresie pasm: S (*Shorwave*) 1440÷1490 nm, S^+ 1490÷1530 nm oraz U (*Ultra Longwave*) 1630÷1675 nm [18]. W systemach WDM o bardzo dużych prędkościach transmisji, we wszystkich powyższych zakresach pracy, dyspersja włókien powinna być mała, by ograniczyć stosowanie kompensatorów dyspersji, ale i niezerowa, aby ograniczyć mieszanie czterofalowe. Nachylenie dyspersji powinno być również jak najmniejsze. Pozwala to dokładnie ją kompensować w szerokim zakresie widma transmisyjnego.



Rys. 1.3. Spektralna zależność tłumienności jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych i współczynnika dyspersji dla światłowodów MC (DC)-SMF, DS-SMF oraz NZDS-SMF

Zdolności transmisyjne włókien, w ogólnym przypadku są charakteryzowane przez parametry tłumieniowe, dyspersję chromatyczną, dyspersję polaryzacyjną oraz efekty nieliniowe, w tym wpływ termicznych połączeń na te parametry i zjawiska. Charakteryzacja sieci optotelekomunikacyjnych istniejących lub nowo budowanych polega przede wszystkim na pomiarach, analizie parametrów i zdolności transmisyjnych światłowodów. Są to klasyczne pomiary reflektometryczne OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometry*) dla poszerzonego zakresu fal pomiarowych, pomiary dyspersji chromatycznej i dyspersji polaryzacyjnej. Tylko indywidualne pomiary każdego włókna dają możliwość właściwej oceny budżetu mocy optycznej czy też konieczności kompensacji dyspersji chromatycznej lub polaryzacyjnej bądź eliminacji danego włókna z toru transmisyjnego.

Optymalizacja traktów światłowodowych to działanie mające na celu minimalizowanie strat tłumieniowych, kompensację dyspersji chromatycznej i polaryzacyjnej oraz neutralizowanie efektów nieliniowych.

Zwiększenie zakresu transmisyjnego oraz zmniejszenie odległości między kanałami optycznymi w systemach WDM skutkuje istotnym zwiększeniem transmitowanej gęstości mocy w światłowodzie. Gęstość mocy optycznej przekracza w takich włóknach kilka GW/m^2 , wówczas pojawia się nieliniowość optyczna szkła [11, 13, 19]. Jednym ze sposobów zmniejszenia wpływu zjawisk nieliniowych we włóknie jest zwiększenie jego powierzchni efektywnej A_{eff} , co związane jest przede wszystkim z powiększeniem pola modu. Odpowiedzią na to wymaganie było powstanie światłowodów telekomunikacyjnych z dużą powierzchnią efektywną [20÷24].

Wymagania w stosunku do włókien optycznych, szczególnie światłowodów pracujących w systemach WDM są często sprzeczne. Trudno jest uzyskać włókna jednomodowe o jednocześnie dużej powierzchni efektywnej, małej długości fali odcięcia, małym poziomie domieszkiowania (co zmniejsza rozpraszanie Rayleigha) i małym nachyleniu charakterystyki dyspersyjnej [25]. Odrębnym zagadnieniem jest dyspersja polaryzacyj-

na, która wynika przede wszystkim z niedoskonałości technologicznego procesu wyciągania włókien i zewnętrznych oddziaływań na światłowód. Koncepcje projektowe dotyczące włókien jednomodowych dostosowywane są do generacji systemów transmisyjnych, które tracą swoją nowoczesność w ciągu 3–5 lat [18]. Skutkuje to różnorodnością włókien w sieciach optotelekomunikacyjnych nawet w zakresie typów światłowodów optymalizowanych do podobnych celów. Należy podkreślić, że standardowe włókno jednomodowe MC-SMF, o skokowym profilu współczynnika załamania, optymalizowane, ze względu na dyspersję, do pracy w II oknie optycznym, wyjątkowo dobrze spełnia warunki do pracy w sieciach WDM (w III oknie optycznym) o dużych prędkościach transmisji na średnie odległości. Włókno to jest również zalecane, jako powszechne i quasi-universalne, do wytwarzania pigtaili i patchcordów. Dlatego też łączenie tego światłowodu z innymi ma duże znaczenie praktyczne.

Ze względu na wzrost szybkości transmisji, gęstości transmitowanej mocy optycznej, wrażliwości laserów, wzmacniaczy światłowodowych, wprowadzenie włókien kompensujących dyspersję czy o dużej powierzchni efektywnej połączenia światłowodów telekomunikacyjnych powinny mieć małe tłumienie i małą reflektancję.

Różnorodne włókna telekomunikacyjne trzeba ze sobą łączyć. Najczęściej stosowaną metodą łączenia jest spajanie w łuku elektrycznym. Wiele publikowanych danych dotyczących termicznego łączenia (spajania w łuku elektrycznym) standardowych, znormalizowanych jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych z telekomunikacyjnymi światłowodami niestandardowymi, np. o dużej powierzchni efektywnej, zawiera stwierdzenia, że wprowadzie teoretyczne obliczenia tłumienia spoiny wynikające z niedopasowania promieni pól modowych wskazują na duże straty takiego połączenia, to jednak wielokrotnie udało się je zmniejszyć. Ten w gruncie rzeczy brak informacji wynika z komercyjnego zapotrzebowania na tego typu badania. Codziennie wykonuje się na świecie setki tysięcy połączeń spajanych światłowodów telekomunikacyjnych. Część z nich obejmuje łączenie włókien różniących się bądź istotnie różniących się parametrami. Cena, tylko wykonania, jednej spoiny wynosi na polskim rynku 20–30 zł. Konsekwencje finansowe źle wykonanej spoiny to nie tylko powtórzenie procesu zgrzewania, ale i ewentualne koszty utraty (w jednym włóknie) nawet terabitowej transmisji.

Termiczne łączenie włókien światłowodowych jest znane od dawna [26÷36] i powszechnie stosowane, tym niemniej, ze względu na szybko zmieniające się konstrukcje i typy włókien, budzi nadal duże zainteresowanie i jest przedmiotem badań teoretycznych i eksperymentalnych [37÷50], w tym badań autora rozprawy nad optymalizacją, charakteryzacją takich połączeń i ich wpływem na parametry transmisyjne toru światłowodowego [51÷87].

Problemy związane z termicznym łączeniem światłowodów, pomiarami spoin i ich wpływem na parametry transmisyjne tras optotelekomunikacyjnych są przedmiotem badań, szczególnie w laboratoriach dużych firm elektronicznych i telekomunikacyjnych. Dotyczy to szczególnie łączenia włókien różniących się technologiami wykonania, profilami współczynnika załamania, poziomem i rodzajem domieszkowania płaszczka i rdzenia, co przekłada się na właściwości transmisyjne światłowodów. Jak już wspomniano, ciągle powstają nowe rodzaje i typy jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych i ich łączenie ma duże znaczenie praktyczne. Nie dotyczy to tylko światłowodów stricte telekomunikacyjnych. Łączenie ze sobą i z włóknami telekomunikacyjnymi światłowodów fotonicznych [88÷94] czy specjalnych – domieszkowanych pier-

wiastkami ziem rzadkich (Er, Pr, Nd, Yb) [95÷100], używanych najczęściej we wzmacniaczach i laserach światłowodowych ma bogatą bibliografię.

Optymalizacja termicznego łączenia światłowodów włóknistych różnych typów obejmuje zagadnienia z pogranicza teorii pola, fizyki ciała stałego, technologii procesów dyfuzji, mechaniki precyzyjnej i telekomunikacji światłowodowej.

Problem strat w obszarze termicznego łączenia może być traktowany jako zagadnienie rozpraszania fali elektromagnetycznej w miejscu czołowego styku włókien. Padająca z jednolitego, optycznego włókna fala jest tłumiona przez obszar połączenia. Część mocy jest tracona wskutek rozpraszania, a pozostała – przekazywana na drugą stronę połączenia. Do rozwiązania tego problemu można wykorzystać metody numeryczne, np. metodę elementów skończonych [101] czy pola zerowego [102]. Jeżeli jednak założyć gaussowski rozkład natężenia pola modu podstawowego w płaszczyźnie poprzecznej łączonych, z zachowaniem równoległości osi, światłowodów o słabym przewodzeniu, to obliczenia strat w miejscu styku ograniczają się do obliczeń współczynnika transmisji wynikającego z niedopasowania promieni pól modowych i niecentryczności połączenia [37]. Przy centrycznym łączeniu włókien o słabym przewodzeniu i identycznych promieniach pola modu, wprowadzona strata styku teoretycznie równa się zeru.

Przyjęcie gaussowskiego rozkładu pola modu podstawowego, niezależnie od profili współczynników załamania łączonych włókien oraz braku obszaru przejściowego w spoinie, jest uproszczeniem. Czysto gaussowski charakter ma rozkład pola modu tylko dla nieograniczonego parabolicznego współczynnika załamania [103]. Tym niemniej gaussowskie przybliżenie rozkładu pola jest szczególnie przydatne w tych przypadkach profilu współczynnika załamania, dla których nie istnieje analityczne rozwiązanie równania falowego, w tym dla gaussowskiego i skokowego [103]. Błędy gaussowskiego przybliżenia, w stosunku do liczonych numerycznie wartości parametrów dla profilu skokowego wynoszą: dla częstotliwości odcięcia V_c 7,2%, dla stałej propagacji – w zależności od częstotliwości znormalizowanej V – od 0,6 do 1,4%, a maksymalny błąd dla prędkości grupowej i rozszerzenia impulsu wynosi 9,4% [103, 104].

Koncepcja obszaru przejściowego termicznie rozdyfundowanej domieszki (TRD) o określonej rozciągłości i dyfuzyjnym rozkładzie współczynnika załamania, który można aproksymować rozkładem gaussowskim i w którym następuje dopasowanie promieni pól modowych termicznie łączonych włókien, jest podstawą optymalizacji tych połączeń przedstawioną w pracy. W konsekwencji założenia gaussowskiego obszaru TRD współczynniki transmisji pomiędzy spajanymi światłowodami mogą być liczone w sposób klasyczny (nienumerycznie), z zastosowaniem teorii pola, w tej pracy z zastosowaniem metody propagacji wiązki [105÷107].

Minimalizacja strat transmisyjnych w obszarze TRD jest podstawą problemu naukowego, jaki należało rozwiązać, aby efektywnie optymalizować termiczne połączenia światłowodów istotnie różniących się parametrami.

Koncepcja transformacji pól modowych metodą dyfuzji domieszki rdzeniowej jest znana od dawna i nadal rozwijana, przede wszystkim, eksperymentalnie [32÷36, 42÷45, 100]. Prace te dotyczyły spajania w temperaturze 1900÷2000°C. Analizę teoretyczną procesów dyfuzji podczas termicznego łączenia włókien w łuku elektrycznym utrudniała nieznaną nieznajomość współczynników dyfuzji domieszek rdzeniowych w temperaturze spajania 1900÷2000°C. Dodatkową trudnością był krótki, maksymalnie 30÷40-sekundowy proces spajania oraz fakt, że szkło krzemionkowe podczas tego procesu jest plastyczne.

Rozwiązanie problemu obliczania współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej w plastycznym szkłe krzemionkowym [63, 66] (temperatura spajania 1900÷2000°C) pozwoliło autorowi na wykonanie obliczeń dyfuzyjnych rozkładów domieszki rdzeniowej (współczynnika załamania) i stwierdzenie poprawności ich gaussowskiej aproksymacji – w konsekwencji określenie parametrów (m.in. wymiarów) obszaru przejściowego TRD. Znajomość wartości współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej umożliwiła teoretyczną optymalizację parametrów obszaru TRD tak, aby spoina wykazywała najmniejsze tłumienie, oraz przełożenie wyników teoretycznych obliczeń na parametry zgrzewania, tj. czas, temperaturę i długość obszaru grzania [83, 85÷87].

Transformacja promieni pól modowych metodą dyfuzji domieszek może być stosowana nie tylko przy łączeniu jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów. Wykorzystuje się ją przy sprzęganiu jednomodowych włókien telekomunikacyjnych, które standardowo mają małe promienie pola modu $\sim 5 \mu\text{m}$, ze światłowodami stosowanymi we wzmacniaczach czy laserach światłowodowych (promień pola modu $2 \div 3 \mu\text{m}$) [95÷100], z diodami laserowymi [108÷110] i innymi przyrządami optyki zintegrowanej, jak izolatory, filtry, przełączniki [111÷114], a nawet ze światłowodami wielomodowymi [115]. Nie bez znaczenia jest też większa tolerancja metody na niecentryczności, które mogą występować przy sprzęganiu tych przyrządów [114]. Zalecane powiększanie pola modu metodą dyfuzji jest pozostawianie jednomodowym obszaru TRD po dyfuzji [84, 116].

Światłowody telekomunikacyjne są światłowodami o słabym prowadzeniu, dlatego stałe propagacji, nawet istotnie różniących się aperturami numerycznymi włókien, można w przybliżeniu uznać za równe [1]. Proces dyfuzji w obszarze TRD niweluje te małe różnice, powodując, że ryzyko odbić (reflektancji) na spoinie spada do zera. Jest to istotne, gdyż wrażliwość laserów nadawczych na promieniowanie zwrotne zwiększa się w miarę wzrostu szybkości transmisji.

Profile domieszki rdzeniowej, a zatem profile współczynnika załamania, można termicznie przekształcić w rozkłady dyfuzyjne, więc odpowiednio zaprojektowane procesy termicznego łączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów mogą być uważane za metodę quasi-universálną.

Obszar przejściowy TRD można teoretycznie zaprojektować i praktycznie wykonać tak, aby wykazywał minimalne tłumienie [79÷87, 107] i dobre właściwości sprzęgania z innymi przyrządami [108÷115]. Przy łączeniu włókien powinien on wykazywać ciągłość strukturalną i wytrzymałość mechaniczną. Obserwacje mikroskopowe, rentgenowska mikroanaliza składu i badania wytrzymałości mechanicznej na zrywanie potwierdziły te wymagania [64, 68, 76], dowodząc, że przy odpowiedniej optymalizacji łączenia włókien (w tym w ekstremalnych warunkach klimatycznych) obszar przejściowy TRD wykazuje ciągłość strukturalną i wymaganą wytrzymałość mechaniczną.

Rozszerzona, zaproponowana w pracy, analiza jedno- i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych spoin pozwoliła określić stopień procesu dopasowania pól modowych oraz kiedy optymalizację termicznego łączenia zakończyć, aby nie doszło do degradacji spoiny [75, 78, 81]. Umożliwia również identyfikację typów, odległych od miejsca pomiaru, termicznie łączonych światłowodów [81]. Może być narzędziem używanym do obserwacji efektów starzeniowych w spoinach i światłowodach [74]. W kontekście pomiarów reflektometrycznych przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań spajania, potwierdzające, że obszar przejściowy TRD (spoinę) można praktycznie wy-

konać tak, aby wykazywał minimalne, dążące do zera tłumienie i zerową reflektancję niezależnie od typów łączonych włókien telekomunikacyjnych.

Spoiny wpływają na tłumienie tras optotelekomunikacyjnych, a źle wykonane na ich reflektancję. Teoretycznie powinny zmniejszać dyspersję polaryzacyjną linii światłowodowych [117] i nie wpływać na ich dyspersję chromatyczną [1]. Obydwa rodzaje dyspersji są niezwykle istotnymi parametrami transmisyjnymi, dlatego w pracy przedstawiono pomiary tych parametrów w rzeczywistych, spajanych liniach optotelekomunikacyjnych.

Głównym celem badań i analiz przedstawionych w rozprawie było kompleksowe, teoretyczne i praktyczne opracowanie termicznego łączenia i badań spoin jednomodowych włókien telekomunikacyjnych różnych typów, tak aby spoiny wykazywały minimalne tłumienie, ciągłość strukturalną i wymaganą wytrzymałość mechaniczną niezależnie od technologii wykonania i konstrukcji termicznie łączonych włókien oraz wykorzystanie otrzymanych wyników w zastosowaniach praktycznych.

Wybrane metody, procedury, badania i pomiary przedstawione w pracy znalazły zastosowanie przy implementacji systemów gęstej multipleksacji falowej DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) w trzech największych w Polsce światłowodowych sieciach szkieletowych: sieci TP S.A, TelEnergo i PKP.

W pracy przedstawiono:

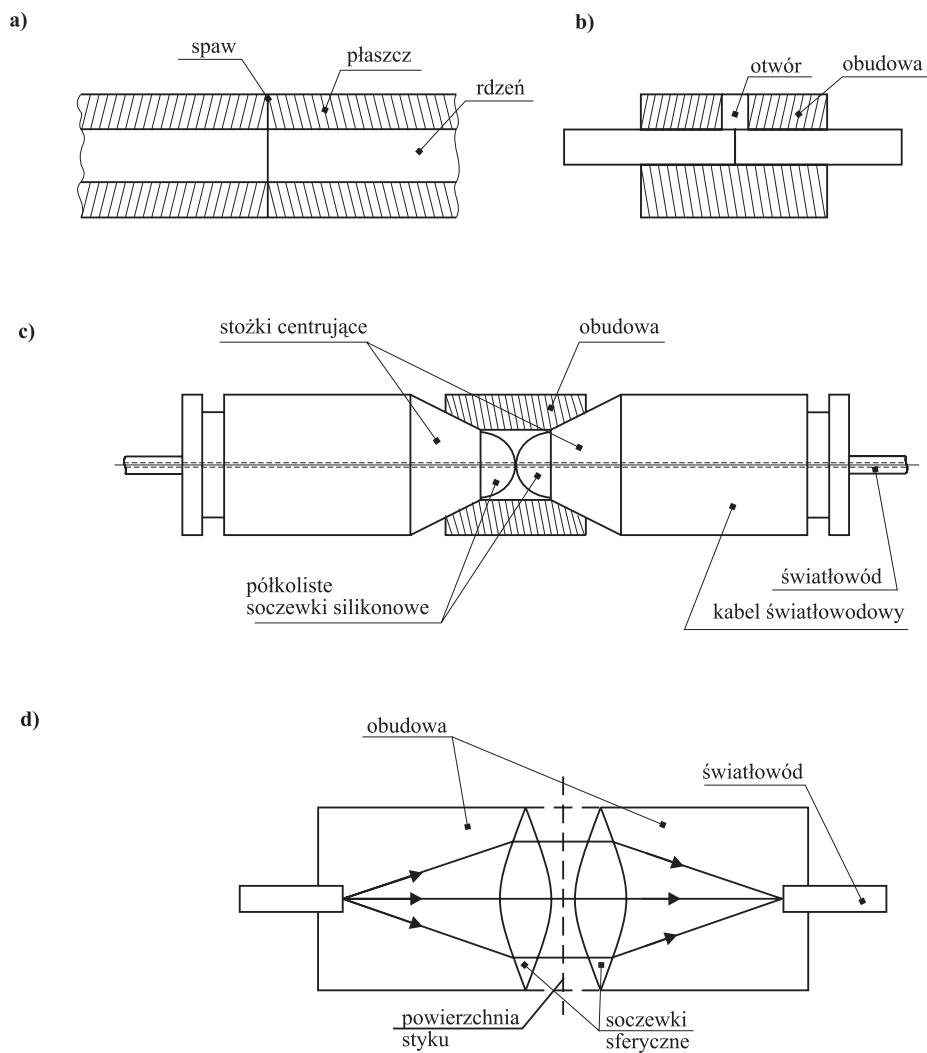
- metodę, opartą na analizie obrazów termoluminescencji, umożliwiającą obliczanie współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej w plastycznym szkłe krzemionkowym i określanie typów domieszki (węzłowa, międzywęzłowa),
- dyfuzyjną metodę minimalizacji strat w połączeniach zgrzewanych jednomodowych światłowodów włóknistych niezależnie od wartości i profili ich współczynników załamania,
- analizę tłumienia dyfuzyjnego obszaru przejściowego termicznie łączonych światłowodów telekomunikacyjnych, uwzględniającą dopasowanie promieni pól modowych i strat transmisyjnych wynikających z wymiarów tegoż obszaru,
- optymalizację tłumienia połączeń zgrzewanych włókien telekomunikacyjnych charakteryzujących się dużą powierzchnią efektywną,
- dowód jednomodowości dyfuzyjnego obszaru przejściowego termicznie łączonych włókien jednomodowych,
- optymalizację procesów zgrzewania jednomodowych światłowodów włóknistych różnych typów, w tym w ekstremalnych warunkach klimatycznych,
- badania i analizę tłumienia, reflektancji i wytrzymałości mechanicznej optymalizowanych spoin światłowodów różnych typów,
- badania i analizę obserwacji mikroskopowych, dyfrakcji rentgenowskiej i mikroanalizy rentgenowskiej optymalizowanych, w tym otrzymywanych w ekstremalnych warunkach klimatycznych, spoin jednomodowych światłowodów włóknistych istotnie różniących się parametrami,
- metodę bazującą na analizie jednokierunkowych pomiarów reflektometrycznych (OTDR) w poszerzonym zakresie długości fal pomiarowych, jednoznacznie stwierdzającą istnienie obszaru przejściowego w łączonych włóknach,
- metodę identyfikacji typów łączonych włókien na podstawie zależności jedno- i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych (OTDR), w poszerzonym zakre-

- się długości fal pomiarowych, od ilorazu promieni pól modowych i od przesunięcia osi tych włókien w funkcji długości fali pomiarowej,
- metodę korekcji błędów w reflektometrycznych pomiarach długości odcinków zgrzewanych włókien telekomunikacyjnych,
 - analizę strat mikro- i makrozgięciowych w pomiarach reflektometrycznych (OTDR) dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych,
 - pomiary i analizę parametrów tłumieniowych i dyspersji chromatycznej w około 50.000 km jednomodowych światłowodów pracujących w polskich sieciach światłowodowych oraz wpływ termicznych połączeń na te parametry,
 - analizę wpływu spoin na dyspersję polaryzacyjną w rzeczywistych liniach optotelekomunikacyjnych.

2. Termiczne łączenie metodą spajania w łuku elektrycznym

Sprężenie optyczne dwóch odcinków światłowodów wykonuje się, zbliżając czołowo końce światłowodów do uzyskania kontaktu optycznego.

Trwałość mechaniczną sprężenia otrzymuje się poprzez: a) trwałe fizyczne złączenie – spajanie (zgrzewanie) lub klejenie końcówek włókien – złącza trwałe, b) zbliżenie na odległość kontaktu optycznego rdzeni włókien i pozycjonowanie łączonych światłowodów za pomocą obudowy – złącza rozłączalne – rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Przykłady sprężeń optycznych rdzeni światłowodów: a) złącza trwałe spajane, b) złącza trwałe klejone (cementowane), c) złącza rozłączalne z centrowaniem stożkowym, d) złącza rozłączalne z kolimacją soczewkową

Złącze światłowodowe, poza małymi stratami, powinno być trwałe i wytrzymałe na oddziaływania mechaniczne oraz atmosferyczne (udary, wibracje, skoki temperatury i ciśnienia, wilgotność). Dopuszczalne straty zależą od przeznaczenia złączy. Z reguły straty złączy określa się z bilansu mocy optycznej łączy światłowodowych. Ich jakość w sensie wnoszonych strat jest pochodną jakości geometrii włókien optycznych światłowodów, a głównie centryczności rdzenia w płaszczu, symetrii kołowej przekroju poprzecznego i zachowania wymiarów w określonej tolerancji.

Termiczne łączenie światłowodów poprzez ich zgrzewanie (w łuku elektrycznym, laserem lub mikropalnikami gazowymi) jest obecnie techniką dającą najlepsze wyniki w osiąganych parametrach łączonego toru transmisyjnego. Metoda zapewnia najmniejsze, dla światłowodów telekomunikacyjnych, tłumienie połączenia ($< 0,08$ dB) oraz małą reflektancję (> 60 dB) [63].

W termicznie łączonych włóknach o słabym przewodzeniu straty, przy założeniu braku obszaru przejściowego, wynikają z niedopasowania promieni pól modowych lub/i przesunięcia osi. Bardzo rzadko przyczyną strat jest eliptyczność rdzeni – rozdział 4. Metoda wyklucza przerwy między włóknami lub ich pochylenia.

Zgrzewarki spajające łukiem elektrycznym wyposażone są zwykle w systemy automatycznego nadzoru nad procesem spajania. Wykonanie poprawnej spoiny nie wymaga więc wcześniejszej analizy, w przypadku kiedy warunki atmosferyczne są umiarkowane oraz kiedy łączone włókna są światłowodami tego samego typu, utrzymującymi założone parametry. Sytuacja wygląda nieco inaczej, gdy warunki atmosferyczne są niesprzyjające lub łączone światłowody są różnego typu, lub pochodzą od innych producentów, a co za tym idzie, były wykonane z różnych preform lub różną technologią.

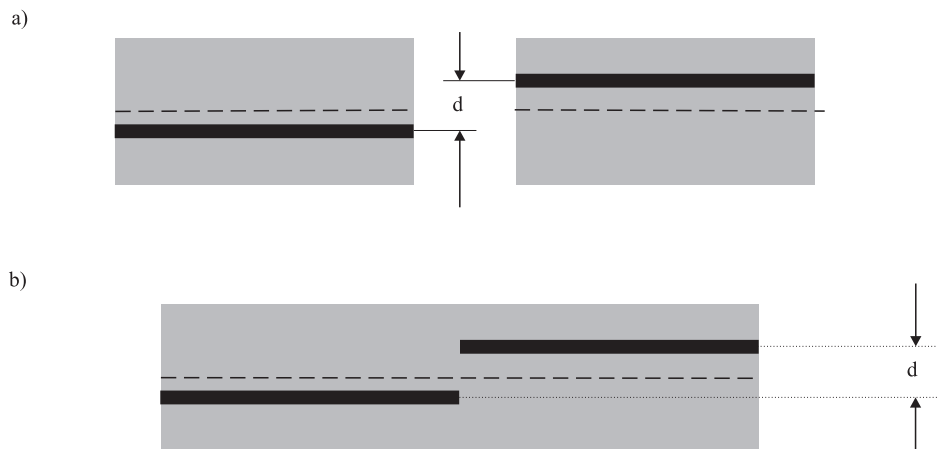
We wszystkich jednak przypadkach jednym z podstawowych warunków uzyskania połączenia o minimalnym tłumieniu jest precyzyjne ustawienie względem siebie odpowiednio przygotowanych czoł światłowodów.

2.1. Centrowanie włókien

W istniejących spawarkach światłowodowych stosuje się wiele różnych metod centrowania włókien światłowodowych do rdzenia lub płaszczu.

Centrowania do płaszczu jest najczęstszą metodą używaną w technice spajania włókien różnych typów [118, 119]. Nie wymaga stosowania dużego powiększenia oraz złożonych metod prowadzenia analizy geometrii obserwowanego obrazu włókien.

Napięcie powierzchniowe występujące w trakcie spajania powoduje redukowanie przesunięcia pomiędzy płaszczami spajanych włókien. Rdzenie znajdujące się wewnątrz światłowodu podążają za kierunkiem ruchu plastycznego szkła. Takie zjawisko powoduje przesunięcie niecentrycznych rdzeni względem siebie – rysunek 2.2, co skutkuje dużym tłumieniem spoiny. Przy centrowaniu do płaszczu siły napięcia powierzchniowego prawie nie oddziałują na spajane włókna. W trakcie wykonywania spoiny tą metodą rdzenie nie ulegają deformacji.

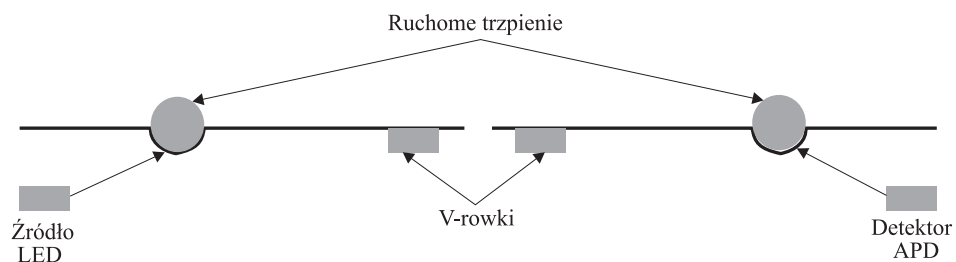


Rys. 2.2. Centrowanie do płaszczu: a) przed wykonaniem spoiny, b) po wykonaniu spoiny

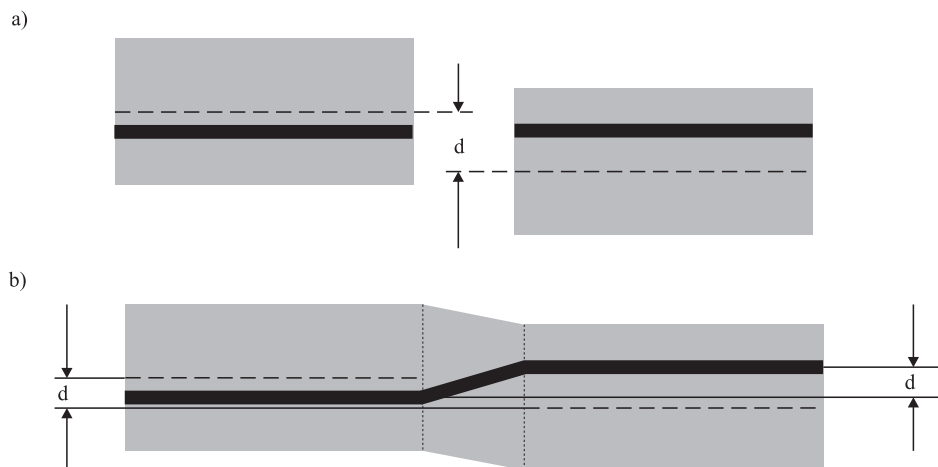
Centrowanie do rdzenia jest metodą alternatywną, wykorzystywaną wówczas, gdy metoda centrowania do płaszczu nie jest skuteczna. Centrowanie do płaszczu przebiega dużo sprawniej, jednakże specyfika metody wyklucza jej stosowanie w niektórych technikach centrowania włókien.

2.1.1. Metoda LID jako metoda centrowania do rdzenia

Transmisyjna metoda LID (*Local Injection and Detection*) jest często stosowana w technice centrowania włókien do rdzenia. Polega na wprowadzaniu światła do jednego z łączonych włókien i detekcji transmitowanego sygnału w drugim włóknie – rysunek 2.3. Wózki znajdujące się w spawarce w sposób automatyczny centrują włókno tak długo, aż zostanie uzyskany maksymalny sygnał na detektorze. Oznacza to, że rdzenie znajdują się w jednej osi. Sytuacja taka została przedstawiona na rysunku 2.4a.



Rys. 2.3. Schemat metody LID



Rys. 2.4. Centrowanie do rdzenia metodą LID: a) przed wykonaniem spoiny, b) po wykonaniu spoiny

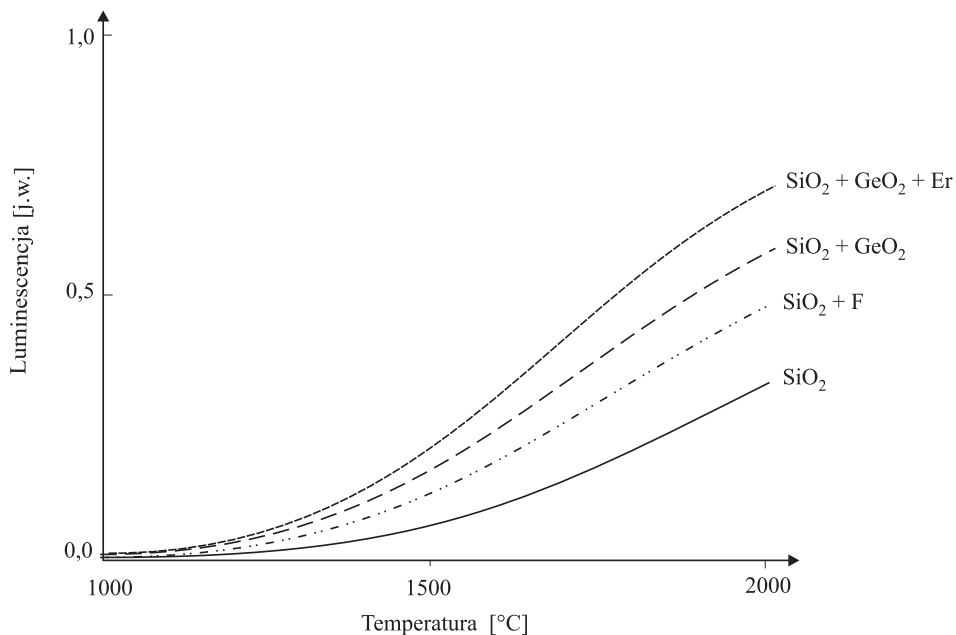
W przypadku włókien centrycznych, rdzenie i osie symetrii obu spajanych odcinków będą praktycznie leżały w jednej linii. W tej sytuacji zostanie wykonana poprawna spoina. Niestety, gdy włókna są niecentryczne, występujące siły napięcia powierzchniowego będą dążyły do wycentrowania włókien w odniesieniu do obydwu płaszczy. Po wykonaniu spoiny rdzenie znajdą się w różnych osiach – rysunek 2.4b. Jest to podstawowa wada tej metody; można ją wykluczyć, wykonując kontrolę właściwości tłumieniowych połączenia podczas samego spajania.

2.2. Analiza gorącego obrazu włókna w obszarze spoiny

Analiza gorącego obrazu włókna w obszarze spoiny jest stosowana w małej grupie spawarek (FSU 925 RTC i FSU 975 – Ericsson – używane przez autora) wyposażonych w złożony system optyki oraz zestaw programów podejmujących analizę obrazów zdjętych poprzez kamerę.

W technice analizy gorącego obrazu wykorzystano fakt, że intensywność termoluminescencji zależy od temperatury i rodzaju grzanego materiału. Na przykład intensywność termoluminescencji czystego SiO_2 (najczęściej płaszcz włókna) jest mniejsza niż SiO_2 domieszkowanego erbem, germanem lub fluorem – przykładowe krzywe intensywności termoluminescencji przedstawiono na rysunku 2.5 [96].

W temperaturze spajania – spawarka FSU 925 RTC – ok. 2000°C [96], dla każdego przekroju wzdłuż i prostopadle do długości włókna zbierane są tzw. profile intensywności termoluminescencji, które pozwalają na wyznaczenie położenia rdzenia w światłowodzie. Ponieważ krzywe intensywności świecenia w funkcji temperatury są charakterystyczne dla każdego materiału, możliwe jest określenie z analizy gorącego obrazu typu włókna, położenia zanieczyszczeń oraz wtrąceń wewnątrz włókna.

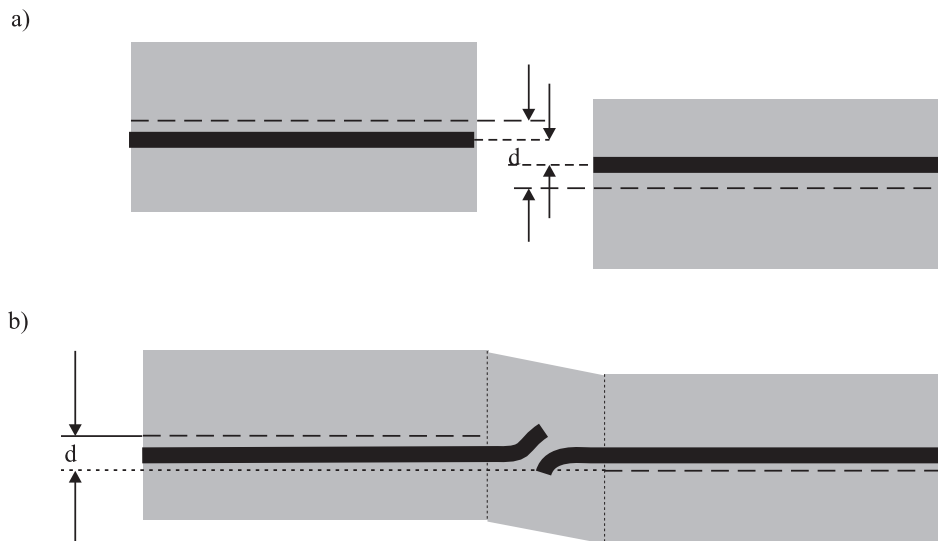


Rys. 2.5. Krzywe termoluminescencji płaszczu SiO₂ i rdzenia światłowodu domieszkowanego F, GeO₂ oraz GeO₂ + Er [96]

Dodatkowo, w trakcie wykonywania spajania z analizą gorącego obrazu istnieje możliwość utrzymania kontroli nad zjawiskiem napięć powierzchniowych panujących w obszarze spoiny. Dzięki temu istnieje możliwość korekcji w trakcie spajania zjawisk, których nie da się skorygować w przypadku metody LID. Sposób ten polega na wprowadzeniu korekcyjnego przesunięcia rdzeni, które ma za zadanie dokonanie kompensacji sił napięcia powierzchniowego. W trakcie spajania włókna będą się przesuwaly dążąc do scentrowania do płaszczu. Odległość między rdzeniami będzie się zmniejszała. Po odpowiednim czasie powinna przyjąć wartość zerową.

Przedwczesna korekcja przeciwdziałająca napięciom powierzchniowym może spowodować cofnięcie się oraz ominięcie rdzeni – rysunek 2.6. Wskazane jest więc, aby tego typu operacji dokonywać w czasie samego spajania.

W przypadku metody bazującej na analizie zimnego obrazu (w temperaturach pokojowych lub otoczenia) – ze względu na brak luminescencji płaszczu i rdzenia – włókno oświetlane jest zewnętrznym światłem z żarówek lub diod LED. Promienie przechodzące przez włókno podlegają prawom załamania i na kamerze powstają strefy cieni oraz półcieni. Stosując powiększenie optyczne, co najmniej 25-krotne, otrzymuje się obraz, który pozwala na określenie położenia rdzenia we włóknie oraz częściową ocenę jego właściwości. Odpowiednio przygotowany program analizujący oraz pewna wprawa operatora przyrządu daje możliwość określenia typu światłowodu przeznaczonego do spajania. Metoda ta stosowana jest w spawarkach Siemens, Fujikury i Furukawy.



Rys. 2.6. Wstępna korekcja przesunięcia rdzeni w odniesieniu do napięcia powierzchniowego:
a) przed wykonaniem spoiny, b) po wykonaniu spoiny

2.3. Typy spawarek użytych do badań

Do badań termicznego łączenia autor używał czterech typów spawarek:

- FSU 925 RTC – Ericsson,
- FSU 975 – Ericsson,
- FSM 30S – Fujikura,
- S-175 – Furukawa.

Spawarki te można podzielić na dwie grupy. W pierwszej znajdują się spawarki Ericsson – FSU 925 RTC i FSU 975, które charakteryzują się trzyetapowym procesem spajania i możliwością analizy gorących obrazów – obrazów termoluminescencji spoin łączonych światłowodów. W drugiej grupie znajdują się spawarki: FSM 30S – Fujikura i S-175 – Furukawa, charakteryzujące się dwuetapowym procesem spajania. W obydwóch typach przyrządów głównym etapem spajania, zapewniającym najwyższą temperaturę zgrzewania, jest etap drugi.

Podstawowym narzędziem autora była spawarka FSU 925 RTC. Urządzenie pozwala na analizę gorącego oraz zimnego obrazu zgrzewanych włókien. Metoda analizy zimnego obrazu, ze względu na zbyt małe powiększenie optyczne, została zastosowana wyłącznie w celu centrowania włókien do płaszczka. Zgrzewarka umożliwia skorzystanie z trzech trybów centrowania włókien: ręcznego, automatycznego (centrowanie do płaszczka) oraz RTC (*Real Time Control*) (centrowanie do rdzenia na gorącym obrazie w czasie rzeczywistym). Procedura spajania zależy od wyboru trybu centrowania włókien. Przykładowe parametry programów spajania światłowodów jednomodowych, dla trybu standardowego, przedstawiono w tabeli 2.1. Programy te nie dotyczą spajania konkretnych typów włókien. Stanowią zbiór możliwości do wyboru przez operatora. Różnice dotyczą tylko drugiego, zasadniczego etapu spajania – tabela 2.1. Do spajania światłowodów standardowych G.652 zaleca się wykorzystanie programu pierwszego –

tabela 2.1. Należy podkreślić, że prąd łuku, utrzymujący temperaturę spajania $\approx 2000^{\circ}\text{C}$, wynosi dla FSU 925 RTC I = $16 \div 17$ mA [96, 118, 119].

Tabela 2.1. Parametry programów spajania włókien jednomodowych – FSU 925RTC

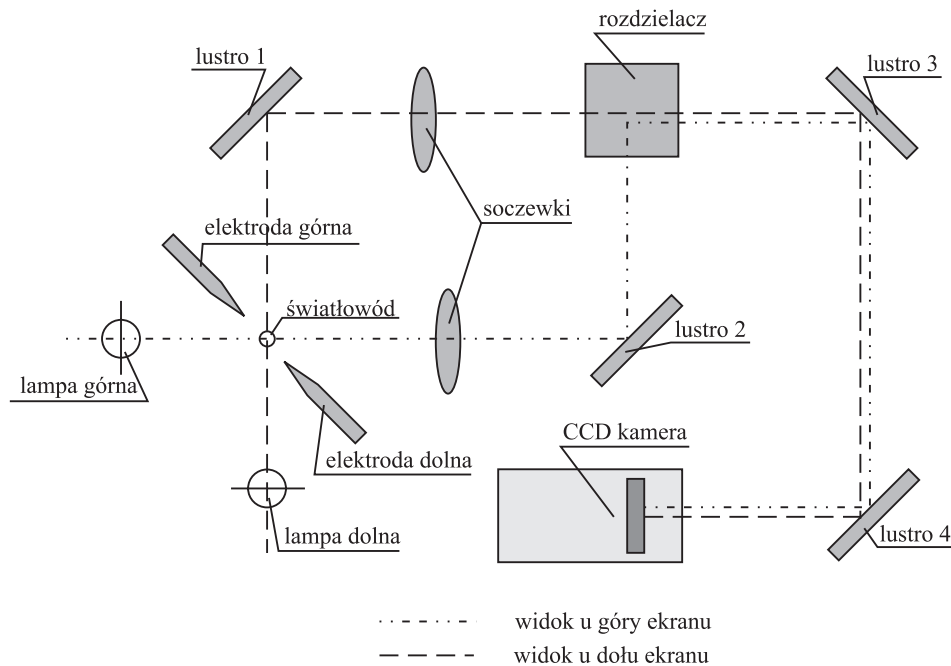
| Program | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| Czas pre-spoiny [s] | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Prąd pre-spoiny [mA] | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Odstęp [μm] | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 |
| Nałożenie [μm] | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 |
| Czas 1. etapu [s] | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Prąd 1. etapu [mA] | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| Czas 2. etapu [s] | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,0 |
| Prąd 2. etapu [mA] | 16,3 | 15,0 | 15,5 | 16,0 | 16,5 |
| Czas 3. etapu [s] | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| Prąd 3. etapu [mA] | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |

Oprócz standardowych procedur (programów) zgrzewania spawarka FSU 925 RTC umożliwia ręczne zmiany czasów i prądów spajania w tzw. trybie serwisowym, a tym samym czasów i temperatur dyfuzji, tj. kształtowanie obszaru przejściowego TRD – rozdział 3. Z tej unikatowej, w stosunku do innych spawarek, możliwości korzystał autor w pracach eksperymentalnych nad optymalizacją spajania światłowodów różnych typów.

Możliwości pomiarowe tego przyrządu (obrazy termoluminescencji) i jego elastyczność w programowaniu czasu spajania pozwoliły autorowi na określenie współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej łączonych włókien, w temperaturze 2000°C , oraz teoretyczne obliczenia strat obszarów przejściowych TRD – rozdział 3. Dało to możliwość szybkiego ustalania, za pomocą włókien testowanych na FSU 925 RTC w temperaturze 2000°C , warunków optymalizacji (czasów i temperatury zgrzewania) dla innych spawarek.

Spawarka FSU 925 RTC wyposażona jest w układ optyczny pozwalający na dostarczenie pionowego oraz poziomego obrazu włókien do kamery – rysunek 2.7. Widziany przez kamerę CCD obraz podlega komputerowej obróbce zarówno przed, jak i w trakcie spajania. Część z gorących obrazów zostaje zapamiętana, dzięki czemu jest możliwa późniejsza analiza wizualna właściwości wykonanej spoiny oraz łączonych światłowodów.

Współczesne metody spajania dają duże możliwości optymalizacji procesu łączenia włókien. Przy spajaniu włókien o małych niecentrycznościach i niekołowościach rdzeni i płaszczy oraz włókien tych samych typów proces spajania ogranicza się do odpowiedniego przygotowania światłowodów. Jednak spajanie włókien o istotnie różnych promieniach rdzeni i aperturach numerycznych wymaga procesu optymalizowania warunków spajania, tj. zmiany parametrów w etapach termicznego łączenia.



Rys. 2.7. Schemat części optycznej spawarki FSU 925 RTC

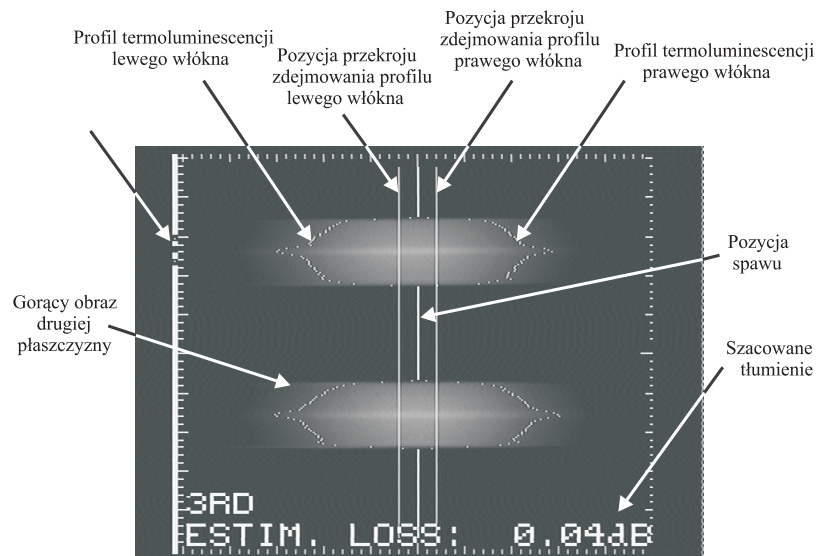
2.4. Obrazy termoluminescencji gorących spoin

Uzyskanie obrazów termoluminescencji gorących spoin w trakcie spajania umożliwiają spawarki firmy Ericsson typu FSU 925 RTC i FSU 975 RTC. Umiejętność analizy obrazów termoluminescencji spajanych światłowódów pozwala stwierdzić z jakimi światłowodami mamy do czynienia, gdyż w praktyce badawczej jak i połączeń spajanych w sieciach optotelekomunikacyjnych nie zawsze jest oczywiste, jakiego typu światłowody są łączone. Analiza obrazów termoluminescencji umożliwia weryfikację prowadzonych eksperymentów. Autor użył również obrazów termoluminescencji do obliczeń współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej oraz długości obszaru TRD – podrozdział 3.5.

Podczas procesu spajania intensywność luminescencji gorącego włókna jest różna w zależności od koncentracji domieszek. Koncentracje domieszek przekładają się na takie parametry, jak apertura numeryczna czy pole modu, w efekcie na telekomunikacyjny typ włókna klasyfikowany ze względu na dyspersję, tj. G.652, G.653 i G.655. Pozwala to na natychmiastową wstępną analizę typów łączonych włókien.

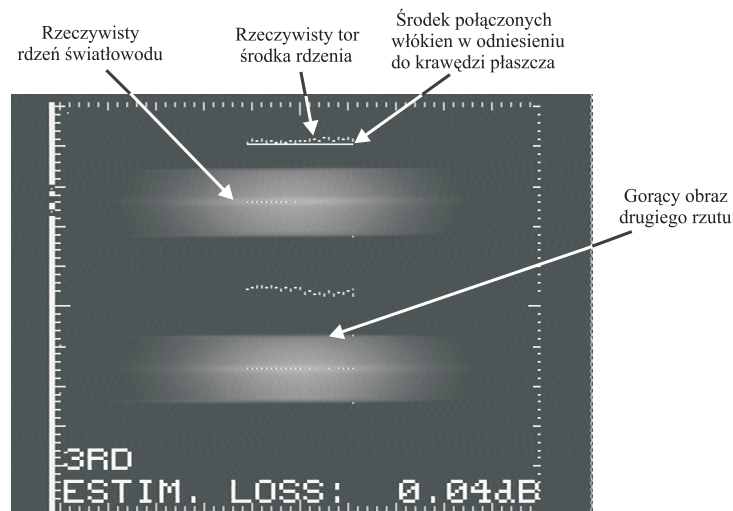
2.4.1. Analiza obrazów gorących spoin – krzywe termoluminescencji

Na rysunku 2.8 przedstawiono gorący obraz spoiny oraz profile termoluminescencji standardowych MC-SMF włókien jednomodowych prawego i lewego w dwóch rzutach. Charakterystyka profilu termoluminescencji jest parametrem wskazującym typy łączonych światłowódów. Dopiero na gorącym obrazie można dostrzec rdzeń, który ze względu na domieszkowanie świeci jaśniej niż płaszcz – rysunek 2.8.



Rys. 2.8. Gorący obraz z wyświetlonymi profilami termoluminescencji włókien w obrębie spoiny [wyniki własne]

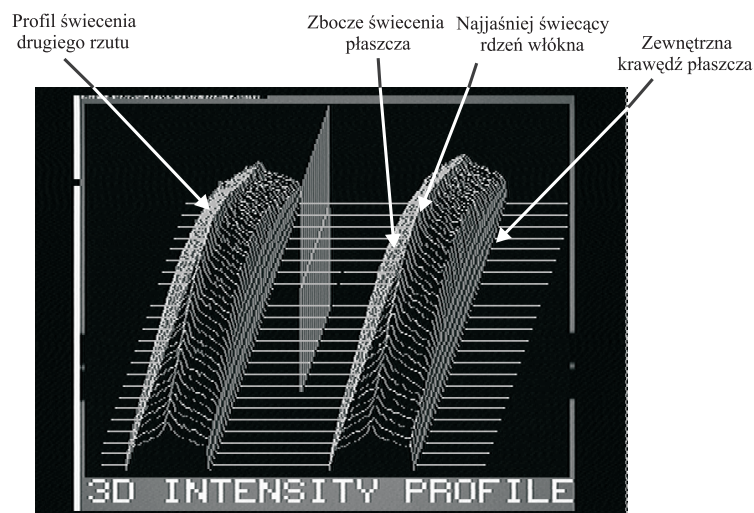
W przypadku zaistnienia deformacji w obszarze spoiny jest możliwość wglądu w charakterystykę połączenia – rysunek 2.9. Ciągła linia obrazuje środek światłowodu odniesiony do wyodrębnionych krawędzi płaszczowych światłowodu. Gdy punkty rzeczywistego toru środka rdzenia znacznie odbiegają od linii ciągłej, świadczy to o dużym przesunięciu rdzeni w łączonych włóknach. Metoda RTC umożliwia zaobserwowanie braku ciągłości linii środka światłowodu w odniesieniu do ciągłości linii środka rzeczywistego rdzenia.



Rys. 2.9. Gorący obraz spoiny z charakterystyką liniowości połączenia rdzeni [wyniki własne]

Analiza gorącego obrazu wraz z charakterystyką liniowości rdzeni pozwala na określenie typów i właściwości łączonych włókien oraz ewentualną korektę sposobu połączenia nietypowych światłowodów. W przypadku dużego tłumienia spoiny na podstawie obrazu można stwierdzić, czy powodem tego jest brak centryczności połączenia rdzeni czy inne przyczyny, np. zanieczyszczenia.

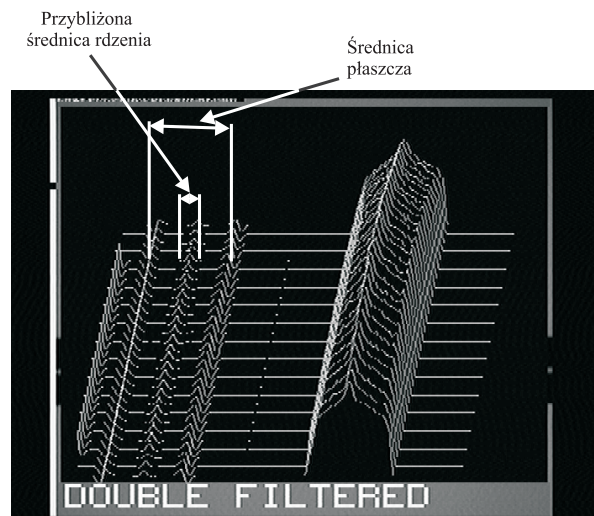
Dodatkowym obrazem służącym do analizy charakterystyk profili termoluminescencji oraz do obserwacji deformacji w obszarze spoiny jest obraz trójwymiarowy. Przedstawia zbiór profili termoluminescencji na całym odcinku świecącego światłowodu, gdzie najwyższe punkty wykresu stanowią luminescencję miejsca styku włókien – rysunek 2.10.



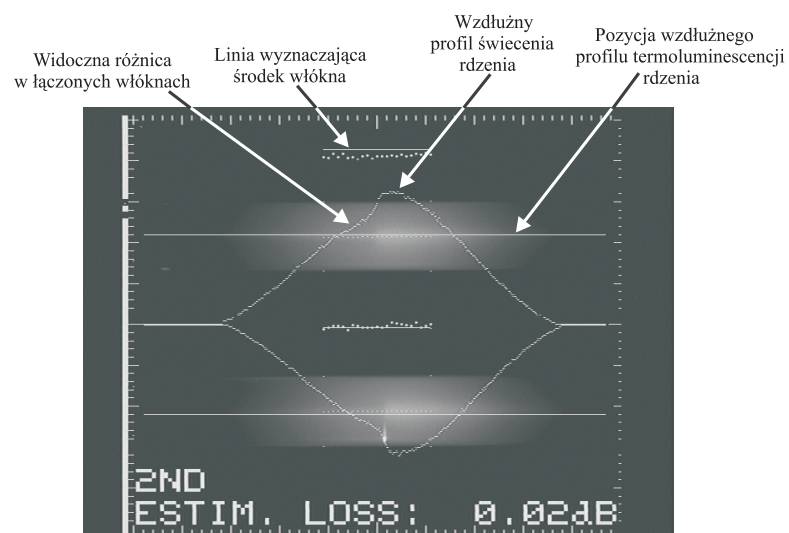
Rys. 2.10. Trójwymiarowy profil intensywności termoluminescencji obszaru spoiny [wyniki własne]

W trybie wyświetlania trójwymiarowego profilu termoluminescencji włókien dostępnych jest kilka typów filtracji. Na rysunku 2.11 przedstawiono możliwość oceny średnicy rdzenia z wykorzystaniem podwójnej filtracji, która redukuje promieniowanie emitowane przez płaszcz. Daje to możliwość wydzielenia krawędzi rdzenia.

Na rysunku 2.12 przedstawiono obraz umożliwiający identyfikację łączonych włókien. W przypadku braku symetrii w wyświetlanej charakterystyce można wywnioskować, że łączone włókna nie są tego samego typu. Widać to na zapamiętanym gorącym obrazie – rysunek 2.12, gdzie prawy światłowod w obszarze rdzenia wykazuje wyższą intensywność termoluminescencji niż lewy.



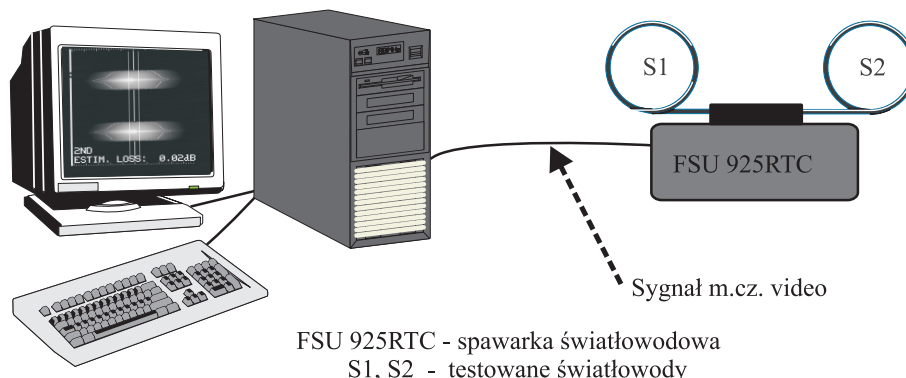
Rys. 2.11. Profile termoluminescencji włókien w trybie podwójnej filtracji [wyniki własne]



Rys. 2.12. Gorący obraz z charakterystyką wzdłużnej termoluminescencji rdzeni [wyniki własne]

Obraz intensywności termoluminescencji spoiny jest obserwowany przez kamerę CCD i zapisywany do pamięci. W ramach pracy stworzono stanowisko do wizualizacji i analizy termoluminescencji zgrzewanych światłowodów.

Stanowisko składa się z zestawu komputerowego wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie oraz spawarki FSU 925 RTC – rysunek 2.13.



Rys. 2.13. Stanowisko do wizualizacji obrazów termoluminescencji gorących spoin

Elementami systemu komputerowego są: procesor Pentium MMX 166, płyta główna HOT-555A SHUTTLE, pamięci 32 Mb EDO, napęd 1,44 Mb, napęd CD-ROM 24x, dysk twardy 2 Gb, Sound card 16 bit full duplex AA-1815B, SVGA miroCRYSTAL VR2000/miroCRYSTAL VR 4000, karta do wizualizacji miroVIDEO DC10 (Matrox Mystique 220 4 Mb SGRAM), monitor 15" ADIVA, klawiatura CHICONY, obudowa mini tower.

Do wizualizacji wykorzystano następujące oprogramowanie: pakiet MediaStudio VE 2,5, oprogramowanie karty do wizualizacji miroVIDEO DC10 v.1,21.

Spawarka FSU 925 umożliwia wyprowadzenia obrazów termoluminescencji w postaci sygnału video małej częstotliwości. Sygnał ten doprowadzony jest za pomocą kabla do karty miroVIDEO DC10 znajdującej się w zestawie komputerowym. Sygnał m. cz. video jest doprowadzany na odpowiednie wejście karty.

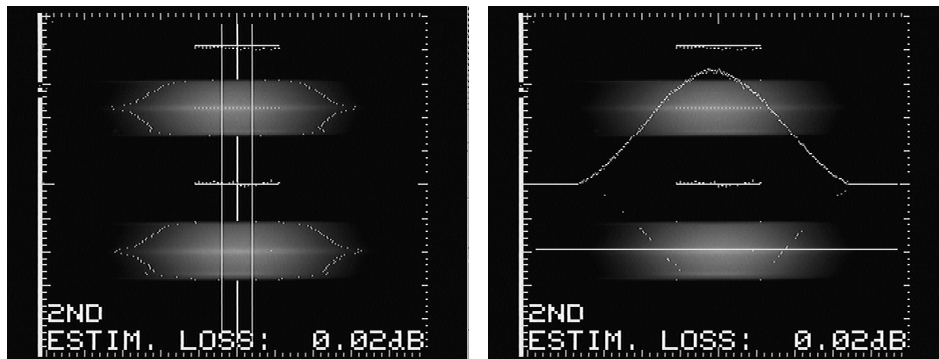
Oprogramowanie karty oraz pakiet MediaStudio VE 2,5 pozwalają nie tylko na utrwalanie pojedynczych obrazów, ale także rejestrację sekwencji filmów w formatach komputerowych (*.AVI, *.MJPEG) – rysunek 2.14. Dzięki rozbudowanemu pakietowi możliwa jest obróbka wtórna zarejestrowanych zdjęć i filmów.



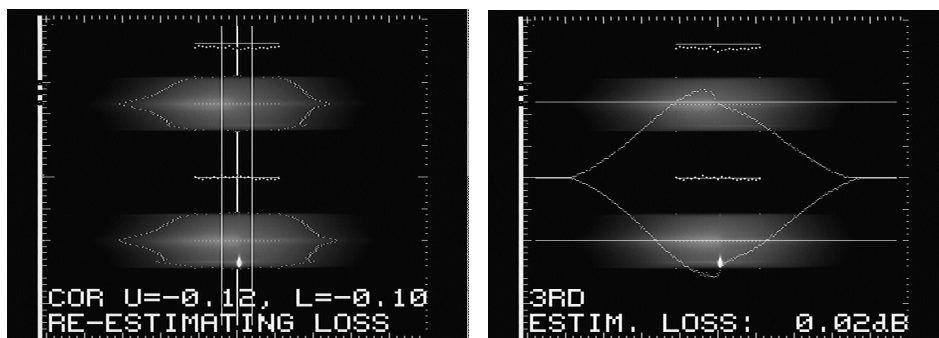
Rys. 2.14. Software do przechwytywania obrazów video [wyniki własne]

2.5. Obrazy termoluminescencji gorących spoin badanych światłowodów

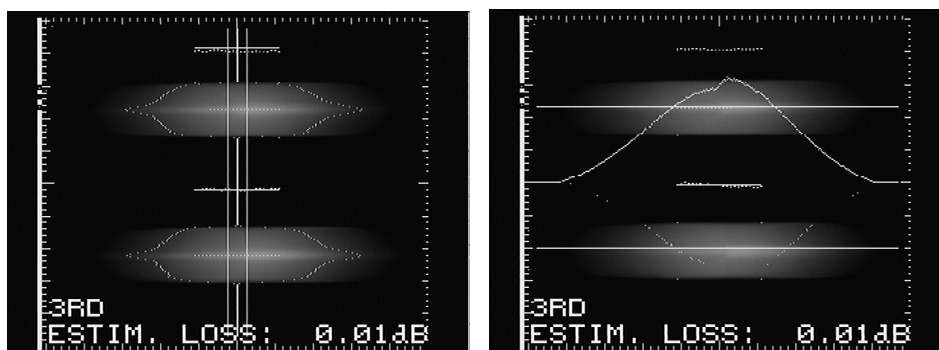
Przykładowe obrazy termoluminescencji spoin badanych światłowodów, dla standardowych parametrów zgrzewania (drugi etap: $I = 16,3 \text{ mA}$, $t = 2 \text{ s}$ – tabela 2.1) i parametrów umożliwiających powstanie obszaru przejściowego TRD (drugi etap: $I = 17 \text{ mA}$, $t = 3\div 5 \text{ s}$, pozostałe bez zmian) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2.15÷2.21 i 2.22÷2.25.



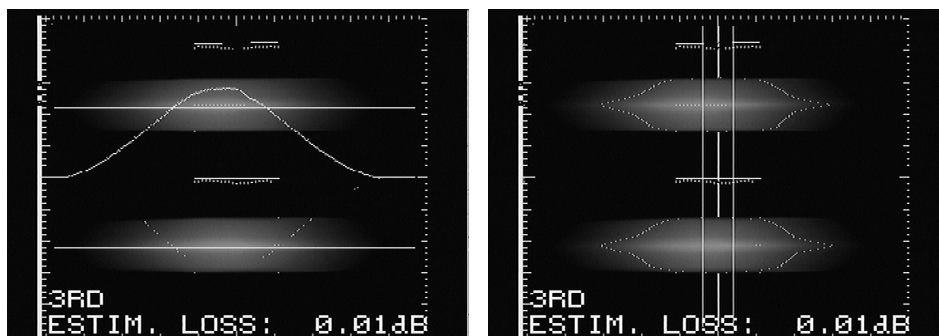
Rys. 2.15. Lewy: MC-SMF (Siecor OVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD) [wyniki własne]



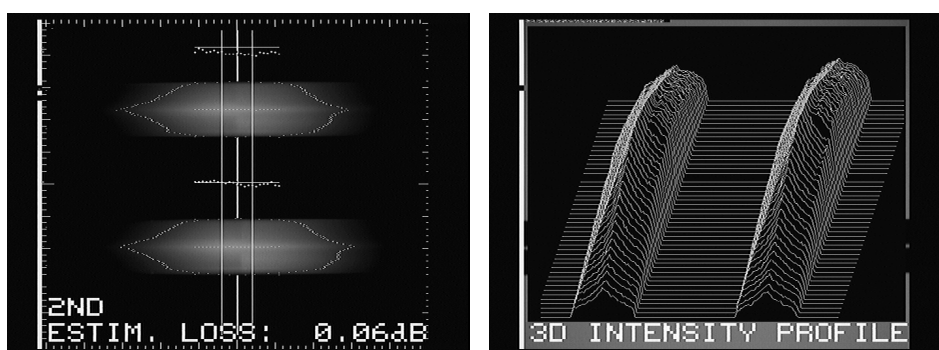
Rys. 2.16. Lewy: NZDS-SMF TrueWave® (Lucent MCVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD) [wyniki własne]



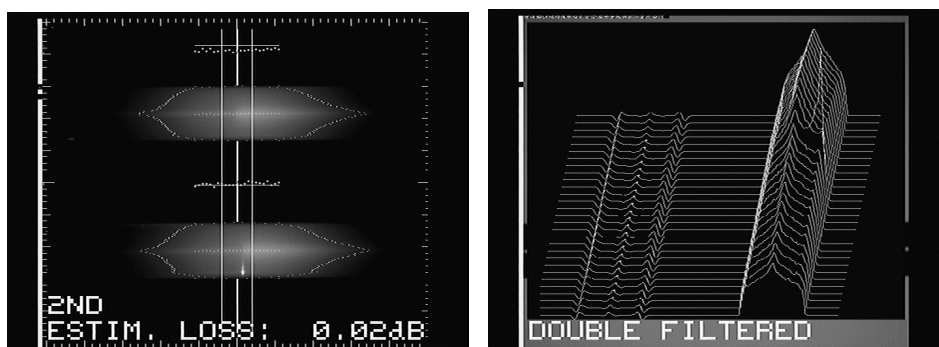
Rys. 2.17. Lewy: MC-SMF (Lycom MCVD) – prawy: NZDS-SMF TrueWave® (Lucent MCVD) [wyniki własne]



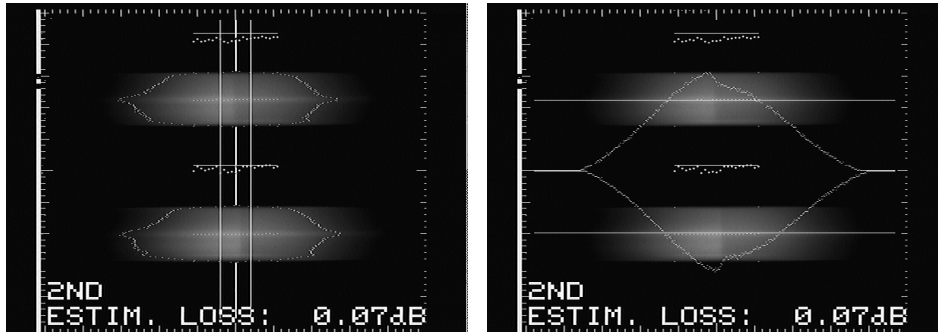
Rys. 2.18. Lewy: NZDS-SMF TrueWave® (Lucent MCVD) – prawy: DS-SMF (Lycom MCVD) [wyniki własne]



Rys. 2.19. Lewy: DS-SMF (Lycom MCVD) – prawy: DC-SMF (Lycom MCVD) [wyniki własne]

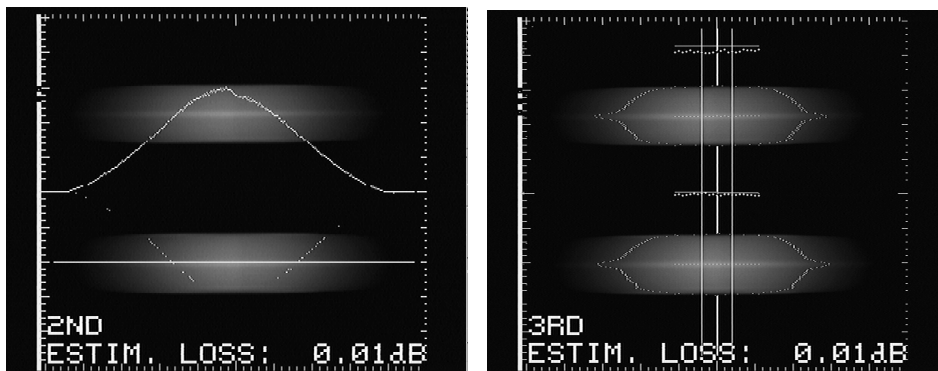


Rys. 2.20. Lewy: MC-SMF (Siecor OVD) – prawy: DS-SMF (Lycom MCVD) [wyniki własne]

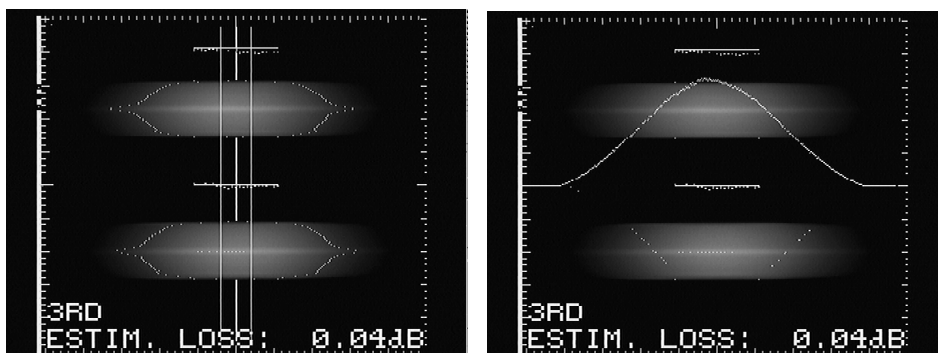


Rys. 2.21. Lewy: DC-SMF (Lycom MCVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD) [wyniki własne]

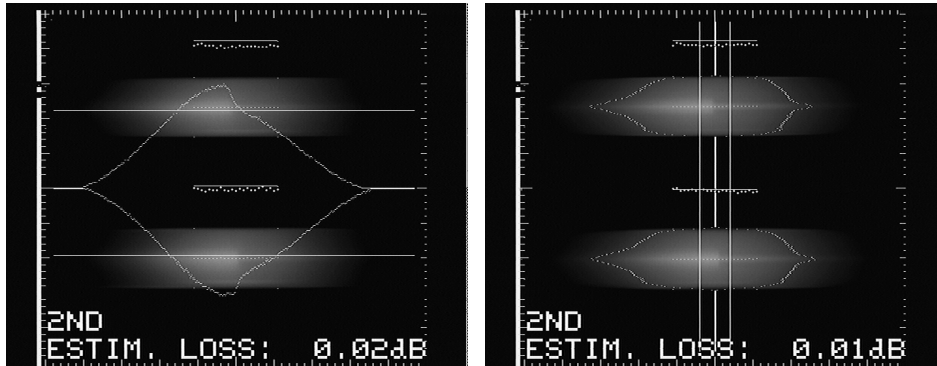
Poniżej przedstawiono obrazy termoluminescencji gorących spoin wykonywanych zgodnie z procedurami optymalizowanymi: zmiana parametrów drugiego etapu na $I = 17 \text{ mA}$ i $t = 3\div 5 \text{ s}$ – rozdział 3.



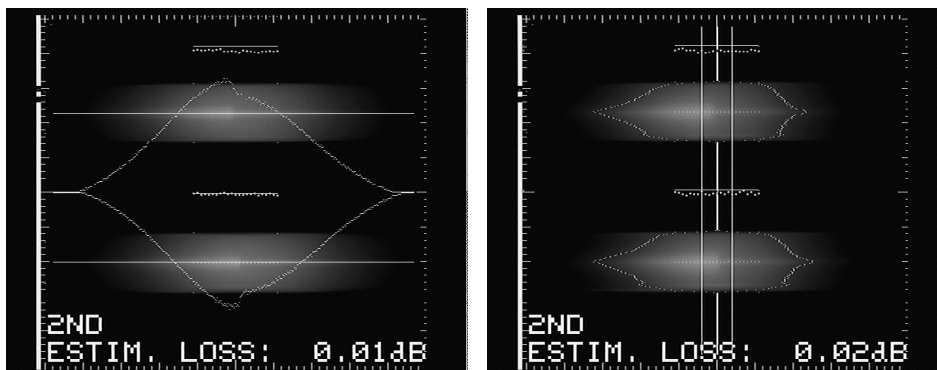
Rys. 2.22. Lewy: MC-SMF (Fujikura VAD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD), $t = 3 \text{ s}$ [wyniki własne]



Rys. 2.23. Lewy: MC-SMF (Siecor OVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD), $t = 3 \text{ s}$ [wyniki własne]



Rys. 2.24. Lewy: DS-SMF (Lycom MCVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD), $t = 3$ s [wyniki własne]



Rys. 2.25. Lewy: NZDS-SMF TrueWave® (Lucent MCVD) – prawy: MC-SMF (Optical Fibers OVD), $t = 5$ s [wyniki własne]

Analiza obrazów termoluminescencji daje możliwość określenia typów łączonych włókien. Jeżeli łączy się włókna tego samego typu, np. standardowe SMF, wykonane tymi samymi lub różnymi technologiami, obrazy termoluminescencji są praktycznie symetryczne względem płaszczyzny spoiny zarówno dla standardowych programów zgrzewania, jak i tzw. optymalizowanych procedur mających na celu odpowiednie rozdyfundowanie domieszki w obrębie spoiny – rysunki 2.15, 2.22÷23. Taki sam wniosek dotyczy światłowodów DC-SMF, DS-SMF i NZDS-SMF, gdy łączy się je w swoich grupach. Przy łączeniu włókien różniących się parametrami, szczególnie koncentracją domieszki w rdzeniu lub płaszczu (DC-SMF), obrazy termoluminescencji są asymetryczne względem płaszczyzny spoiny – rysunki 2.16÷17, 2.19÷20, 2.24÷25. Trudniej analizować obrazy termoluminescencji gorących spoin światłowodów różnych typów, ale mało różniących się koncentracją domieszek (aperturą numeryczną NA) w rdzeniu, np. połączenia DS-SMF i NZDS-SMF – rysunek 2.18 lub różniących się koncentracją domieszek w płaszczu, np. połączenia DC-SMF (W – podobny profil współczynnika załamania) i MC-SMF – rysunek 2.21. W przypadku połączeń DS-SMF i NZDS SMF obrazy termoluminescencji można interpretować jako połączenie dwóch identycznych włókien o zwiększonej koncentracji domieszki w rdzeniu. W przypadku

połączeń DC-SMF z MC-SMF, DS-SMF i NZDS-SMF zaburzona intensywność termoluminescencji płaszcza pozwala zidentyfikować włókno z depresyjnym płaszczem, tj. DC-SMF – rysunki 2.19, 2.21.

Dla optymalizowanych procedur (zwiększone czasy i prądy zgrzewania) mających na celu rozdyfundowanie domieszki w obrębie spoiny łączonych światłowodów istotnie różniących się parametrami, występuje – w porównaniu z tzw. procedurami standardowymi – zmniejszenie nachylenia krzywej termoluminescencji w obrębie spoiny – rysunki 2.24÷2.25. Zostało to wykorzystane do obliczeń współczynników dyfuzji GeO_2 w SiO_2 w temperaturze $\approx 2000^\circ\text{C}$, punkt 3.5.1, co w konsekwencji umożliwiło określenie optymalnych warunków zgrzewania światłowodów telekomunikacyjnych istotnie różniących się parametrami.

Analizy obrazów termoluminescencji gorących spoin są ważnym i niedocenianym (praktycznie brak danych literaturowych) narzędziem do charakteryzacji i optymalizacji strat wtrąconych, jakimi są spoiny, w światłowodowych sieciach telekomunikacyjnych.

3. Straty w termicznych połączeniach jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych

3.1. Propagacja fali świetlnej w dielektrycznych światłowodach włóknistych – równania Maxwella

W bezstratnym, izotropowym ośrodku dielektrycznym pozbawionym ładunków elektrycznych i prądów związki między wektorami natężenia pola elektrycznego \vec{E} i indukcji elektrycznej \vec{D} oraz natężenia pola magnetycznego \vec{H} i indukcji magnetycznej \vec{B} określają równania Maxwella:

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Dla ośrodka dielektrycznego izotropowego:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna ośrodka,

ε – przenikalność elektryczna ośrodka.

Można przyjąć, że względna przenikalność elektryczna szkła $\varepsilon_r = n^2$ [1] (n – współczynnik załamania światła w ośrodku), czyli $\varepsilon = n^2 \varepsilon_0$ i $\mu = \mu_0$, gdyż szkło krzemionkowe nie wykazuje właściwości magnetycznych.

Tutaj:

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

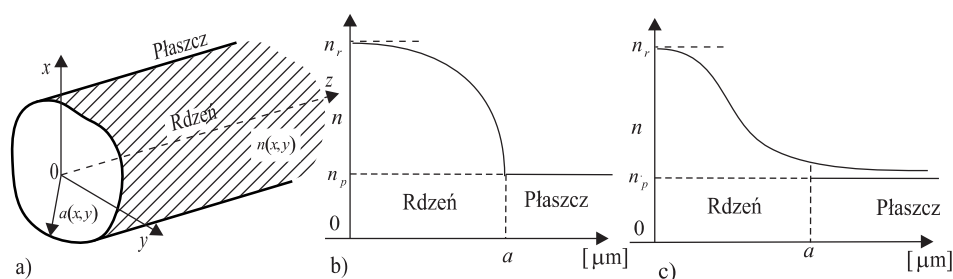
ε_0 – przenikalność elektryczna próżni.

Dla szkielek izotropowych można zapisać:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 n^2 \vec{E} \quad (3.7)$$

3.1.2. Propagacja w strukturach włóknistych – równanie falowe

W światłowodzie włóknistym o poprzecznym przekroju dowolnej formy – rysunek 3.1 rdzeń jest otoczony płaszczem, który jest nieograniczony. Powierzchnia rozdziału rdzenia i płaszczka jest w odległości $a(x, y)$ od osi światłowodu, która pokrywa się z osią z . Zmiany współczynnika załamania opisane są jego profilem $n(x, y)$, gdyż zakłada się, że współczynnik załamania nie zmienia się wzdłuż osi z . Profile współczynnika załamania można podzielić na dwie grupy [103]; do pierwszej należą profile mające w płaszczu współczynnik załamania o stałej wartości i dowolnie zmieniający się w rdzeniu – rysunek 3.1b. Tutaj zmiany współczynnika załamania na granicy rdzeń – płaszcz mają charakter skokowy. Do drugiej grupy można zaliczyć profile o płynnej zmianie współczynnika załamania w całym nieograniczonym przekroju światłowodu – rysunek 3.1c.



Rys. 3.1. Geometria światłowodu włóknistego o poprzecznym przekroju dowolnej formy – a); przykład włókna, w którym współczynnik załamania zmienia się w rdzeniu i pozostaje stały w płaszczu – b); przykład włókna, w którym współczynnik załamania zmienia się płynnie w rdzeniu i w płaszczu – c) [103]

Symetria struktury cylindrycznej – rysunek 3.2 i powyższe założenia dotyczące ośrodka pozwalają na przyjęcie rozkładów pól elektrycznego i magnetycznego, których moduły zależą wyłącznie od współrzędnych poprzecznych, natomiast zależności wektorów pola modu od współrzędnej z są następujące (przyjęto, że ośrodek jest bezstratny, tj. posiada współczynnik tłumienia $\alpha = 0$) [103, 118]:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, y, z) &= \vec{E}(x, y) \exp(-j\beta z) = \\ &= [E_x(x, y)\hat{x} + E_y(x, y)\hat{y} + E_z(x, y)\hat{z}] \exp(-j\beta z) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}(x, y, z) &= \vec{H}(x, y) \exp(-j\beta z) = \\ &= [H_x(x, y)\hat{x} + H_y(x, y)\hat{y} + H_z(x, y)\hat{z}] \exp(-j\beta z) \end{aligned} \quad (3.9)$$

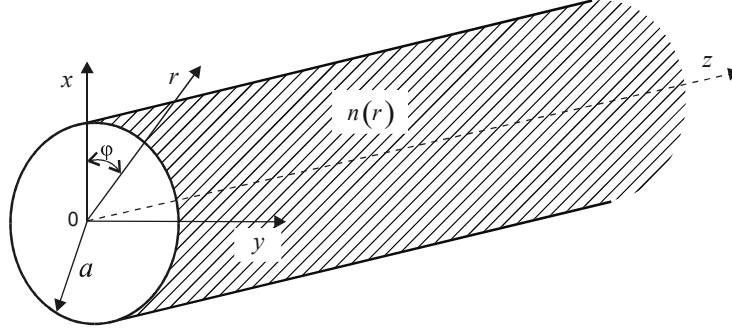
gdzie:

β – stała propagacji; $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ wersory odpowiednio wzdłuż osi x, y, z .

Powyższe wyrażenia we współrzędnych cylindrycznych mają postać:

$$\vec{E}(r, \varphi, z) = \vec{E}(r, \varphi) \exp(-j\beta z) \quad (3.10)$$

$$\vec{H}(r, \varphi, z) = \vec{H}(r, \varphi) \exp(-j\beta z) \quad (3.11)$$



Rys. 3.2. Przekrój światłowodu włóknistego z symetrią kołową: rozmiary włókna w kierunkach r i z są nieograniczone, promień rdzenia – a , profil współczynnika załamania $n(r)$, oś z pokrywa się z osią symetrii [103]

Jeżeli rozłożyć natężenia pól na składowe poprzeczne (oznaczone t) i wzdłużne (oznaczone z), tj. prostopadłe i równoległe do osi światłowodu, to otrzymuje się:

$$\vec{E} = (\vec{E}_t + E_z \hat{z}) \exp(-j\beta z) \quad (3.12)$$

$$\vec{H} = (\vec{H}_t + H_z \hat{z}) \exp(-j\beta z) \quad (3.13)$$

Domyślnie, w wyrażeniach (3.8÷3.13) czasowa zależność rozkładów pól wyraża się mnożnikiem $\exp(j\omega t)$. Po uwzględnieniu tej czasowej zależności rozkłady pól zmieniają się jak $\exp(j\omega t - j\beta z)$; $\omega = 2\pi f$ oznacza pulsację (częstotliwość kołową) fali świetlnej.

Jeżeli na obie strony równania (3.3) podzielić wektorowo operatorem ∇ , przy założeniu zależności od czasu jako $\exp(j\omega t)$ [1], to za pomocą (3.4÷3.8) i tożsamości wektorowej [2, 103]:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$$

otrzymuje się równanie falowe:

$$\nabla^2 \vec{E} + \nabla(\vec{E} \cdot \nabla \ln \varepsilon) + k^2 n^2 \vec{E} = 0 \quad (3.14)$$

gdzie:

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \omega / c - \text{liczba falowa.}$$

Dla ośrodków jednorodnych i izotropowych wstawienie rozwiązań (3.8) i (3.9) do równań Maxwella (3.3) i (3.4) wiąże amplitudy E i H [120]:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\mu_0 \omega H_x \quad (3.15)$$

$$-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\mu_0 \omega H_y \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\mu_0 \omega H_z \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\varepsilon_0 \varepsilon_r \omega E_x \quad (3.18)$$

$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\varepsilon_0 \varepsilon_r \omega E_y \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\varepsilon_0 \varepsilon_r \omega E_z \quad (3.20)$$

Z równań (3.16), (3.17), (3.19), (3.20) otrzymuje się, że składowe H_x , H_y , H_z , E_z określane są przez składowe E_x i E_y [120]:

$$H_x = -\frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\beta} E_y - \frac{1}{\beta \mu_0 \omega} \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.21)$$

$$H_y = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\beta} E_x - \frac{1}{\beta \mu_0 \omega} \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} \right) \quad (3.22)$$

$$H_z = \frac{j}{\mu_0 \omega} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad (3.23)$$

$$E_z = \frac{1}{j\beta} \left(\frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_x}{\partial x} \right) \quad (3.24)$$

3.1.3. Jednomodowe światłowody włókniste o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym

Światłowody włókniste nieznacznie różniące się współczynnikami załamania rdzenia n_r i płaszczu n_p nazywa się światłowodami włóknistymi o słabym przewodzeniu. Należą do nich światłowody telekomunikacyjne, przeznaczone do przekazu informacji na dalekie odległości.

Przyjmując, że $n_r \approx n_p$, otrzymuje się dla parametru Δ :

$$\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2} \approx \frac{n_r - n_p}{n_r} \ll 1 \quad (3.25)$$

wówczas profil współczynnika załamania dogodnie jest zapisywać w postaci $n^2(x, y) = n_r^2[1 - 2\Delta f(x, y)]$ [103]; $f = 0$ dla maksymalnej wartości współczynnika załamania w rdzeniu i $f = 1$ dla stałego współczynnika załamania w płaszczu.

Słabe prowadzenie nie oznacza braku dostatecznej kierunkowości fal i odpowiedniej gęstości mocy promieniowania w rdzeniu [1, 103].

W światłowodach o słabym prowadzeniu, dla wszystkich modów, można założyć:

$$\beta \approx kn_r \approx kn_p \quad (3.26)$$

Ze względu na to, że $n_r \approx n_p$, składowe wzdłużne pola E_z i H_z są znacznie mniejsze niż poprzeczne $E_t = E_x, E_y$ i $H_t = H_x, H_y$ [1, 103] można przyjąć, że $E_z \approx 0$ i $H_z \approx 0$. Taki ośrodek jest prawie jednorodny i każda kartezjańska składowa wektorów \vec{E}_t i \vec{H}_t jest rozwiązaniem skalarnego równania falowego. Jeżeli oznaczyć:

$$\vec{E}_t(x, y) = E_x(x, y)\hat{x} + E_y(x, y)\hat{y} \quad (3.27)$$

i uwzględnić niewielkie zmiany współczynnika załamania przy odległościach rzędu długości fali, co pozwala zaniedbać składnik zawierający gradient ε w równaniu (3.14), oraz zakładając, że $E_z = 0$ i $H_z = 0$, równanie falowe (3.14) można zapisać w postaci skalarnego równania falowego [103]:

$$[\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta^2]\Psi = 0 \quad (3.28)$$

gdzie:

$$\Psi \text{ oznacza } E_x(x, y) \text{ lub } E_y(x, y), \text{ a } \nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}.$$

Chociaż kartezjańskie składowe wektora $\vec{E}_t(x, y)$ spełniają skalarnie równanie falowe (3.28), ich przestrzenna zależność może być przedstawiona w dowolnym cylindrycznym układzie współrzędnych [103].

W jednomodowych światłowodach włóknistych z przekrojem kołowym mod podstawowy HE_{11} znajduje się z rozwiązania skalarnego równania falowego nie zawierającego zmiennej azymutalnej [103]. Dlatego też Ψ w równaniu (3.28) zależy tylko od współrzędnej radialnej r . Ponieważ przekrój kołowy nie posiada dominującej osi symetrii, składowa elektryczna pola może być ukierunkowana wzdłuż dowolnej pary ortogonalnych kierunków. Jeżeli tę parę kierunków oznaczyć osiami x i y – rysunek 3.2, to istnieją dwa podstawowe mody HE_{11} . Poprzeczne elektryczne pole jednego modu jest równoległe do kierunku x , a drugiego do kierunku y . Z symetrii struktury wynika, że stałe propagacji tych modów są równe.

Zatem, w przybliżeniu słabego prowadzenia mod HE_{11} jest modem liniowo spolaryzowanym LP (*Linear Polarization*), konkretnie modem najniższego rzędu, tzw. modem podstawowym LP_{01} [1].

Dla modu polaryzowanego wzdłuż osi x (przybliżenie słabego prowadzenia) otrzymuje się [103]:

$$E_x = F_0(r) \exp(-j\beta z) \quad (3.29)$$

$$H_y = (\varepsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_r E_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_x \quad (3.30)$$

a dla modu polaryzowanego wzdłuż osi y :

$$E_y = F_0(r) \exp(-j\beta z) \quad (3.31)$$

$$H_x = -(\varepsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_r E_y = \frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \quad (3.32)$$

gdzie:

$F_0(r)$ – osiowo symetryczne rozwiązanie równania (3.28).

Przybliżenie światłowodu o słabym prowadzeniu znacznie upraszcza określenie rozkładów pól modów, ponieważ opiera się na rozwiązaniu nie wektorowego, a skalarne równania falowego (3.28).

Poprzeczne składowe pola modu podstawowego są określone wyrażeniami (3.29÷3.32). Przestrzenny rozkład pola modu podstawowego $F_0(r)$ jest rozwiązaniem skalarne równania falowego – dla przekroju kołowego [103]:

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + k^2 n^2(r) - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right] F_0(r) = 0 \quad (3.33)$$

przy czym dla światłowodu jednomodowego azymutalna liczba falowa $l = 0$.

3.1.4. Przybliżenie Gaussa dla jednomodowych światłowodów włóknistych o przekroju kołowym i słabym prowadzeniu

Rozkład pola $F_0(r)$ zależy od rozkładu współczynnika załamania. W ogólnym przypadku światłowodów włóknistych o przekroju kołowym i słabym prowadzeniu, z dowolnym rozkładem współczynnika załamania, skalarne równanie falowe (3.33) może być rozwiązane wyłącznie numerycznie. Tylko dla nieograniczonego parabolicznego rozkładu współczynnika załamania rozkład pola modu podstawowego ma czysto gaussowski charakter. Wyjątkami są również skokowy i gradientowy (ograniczone do rdzenia) rozkłady współczynników załamania, gdzie rozkład pola jest prawie funkcją Gaussa i wówczas $F_0(r)$ można aproksymować wyrażeniem:

$$F_0(r) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{W} \right)^2 \right] \quad (3.34)$$

gdzie:

W – promień pola modu MFR (*Mode Field Radius*), który generalnie zależy od formy współczynnika załamania.

Dla gaussowskiego rozkładu pola modu MFR jest taką odległością od osi optycznego włókna, gdzie powierzchniowa gęstość mocy modu podstawowego maleje e^2 [121].

Zatem (3.29) i (3.31) można zapisać:

$$E_x = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{W}\right)^2\right] \exp(-j\beta z) \quad (3.35)$$

$$E_y = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{W}\right)^2\right] \exp(-j\beta z) \quad (3.36)$$

Znane są również próby opisanie funkcją Gaussa rozkładów pól dla światłowodów z dowolnym profilem współczynnika załamania [37, 103, 104, 122]. Okazuje się, że gaussowskie przybliżenie rozkładów pola jest szczególnie przydatne w tych przypadkach profili współczynnika załamania, dla których nie istnieje analityczne rozwiązanie skalarnego równania falowego. Takim przykładem jest gaussowski profil współczynnika załamania opisany wyrażeniem:

$$n^2(R) = n_r^2 \left\{1 - 2\Delta[1 - \exp(-R^2)]\right\} \quad (3.37)$$

gdzie:

$$R = \frac{r}{a}, \quad a - \text{promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu, } 0 \leq R < \infty.$$

Ze wzrostem R od 0 do ∞ $n(R)$ zmienia się płynnie od n_r do n_p . W tym przypadku nie ma jednoznacznej granicy między rdzeniem a płaszczem, więc formę profilu określa wymiar rdzenia a . Przy $a \rightarrow 0$ profil jest wyostrowiony w obszarze $R = 0$ i staje się prawie płaski przy $a \rightarrow \infty$.

Taka forma profilu ma duże znaczenie praktyczne, gdyż po pierwsze odzwierciedla procesy dyfuzji domieszek między rdzeniem a płaszczem w procesie produkcji i termicznego łączenia włókien [2, 66, 86, 87], a po drugie takim profilem można aproksymować rozkłady współczynników załamania w obszarze przejściowym łączonych metodami termicznymi światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów. W tak łączonych włóknach można, dzięki odpowiedniemu rozdyfundowaniu domieszek, uzyskać obszar przejściowy i łączyć prawie bezstratnie światłowody o różnych wartościach i profilach współczynnika załamania [66, 86, 87], a rozkład natężenia pola, dla modu podstawowego, można aproksymować funkcją Gaussa.

Dla gaussowskiego rozkładu współczynnika załamania promień pola modu można przedstawić następującym wyrażeniem [103]:

$$W = a/(V-1)^{1/2} \quad (3.38)$$

gdzie:

V – częstotliwość znormalizowana.

Wyrażenie (3.38) ma sens, jeżeli $V > 1$, nie zmienia to jednak jego praktycznej przydatności, gdyż oznacza tylko, że w pobliżu osi światłowodu propaguje tylko mała część mocy modu podstawowego.

Jedynym parametrem, którego nie można określić w ramach gaussowskiego przybliżenia, jest wartość częstotliwości odcięcia V_c [103]. W podrozdziale 3.6 pokazano, że V_c zależy od tzw. objętości profilu Ω i jest mało czuła na formę profilu. Ponieważ gaussowski i np. skokowy profile rozkładów współczynnika załamania mają jednakową objętość Ω , to V_c dla tych profili powinna być jednakowa i wynosić 2,405. Stosując metody numeryczne [104], dla profilu gaussowskiego otrzymuje się $V_c = 2,592$. Tak więc błąd przybliżenia wynosi 7,2%. Błąd przybliżenia, w stosunku do profilu skokowego, dla stałej propagacji zmniejsza się od 1,4% dla $V = 1$ do 0,6% dla $V = V_c = 2,592$, a maksymalny błąd dla prędkości grupowej i rozszerzenia impulsu wynosi 9,4% [103, 104].

Rozkład powierzchniowej gęstości mocy modu podstawowego $S(R)$ ma również charakter gaussowski [103]:

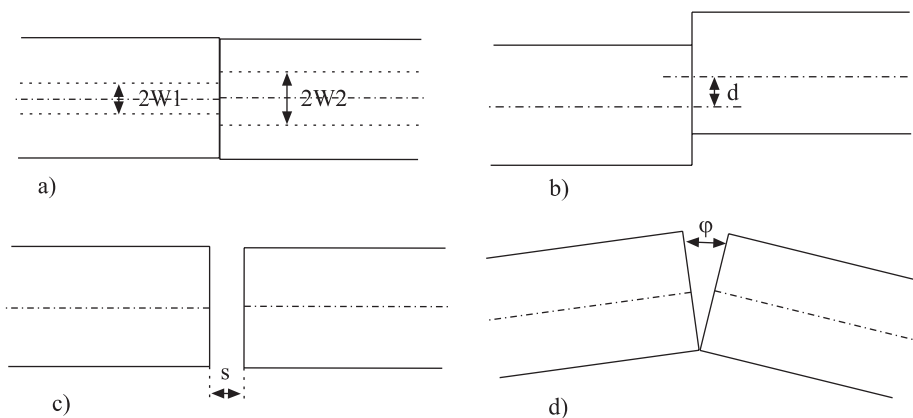
$$S(R) = (V - 1) \exp[-R^2 (V - 1)] \quad (3.39)$$

Można zauważyć, że ze zmniejszaniem się V moc koncentruje się na większej powierzchni przekroju światłowodu. Przy $W = a$ i $V = 2$ rozkład intensywności (3.39) dokładnie powtarza profil współczynnika załamania i zabezpiecza maksymalną koncentrację mocy modu podstawowego w pobliżu osi światłowodu i wtedy: $a = \lambda / [\pi(n_r^2 - n_p^2)^{1/2}]$ [103].

3.2. Łączenie światłowodów włóknistych – model uproszczony

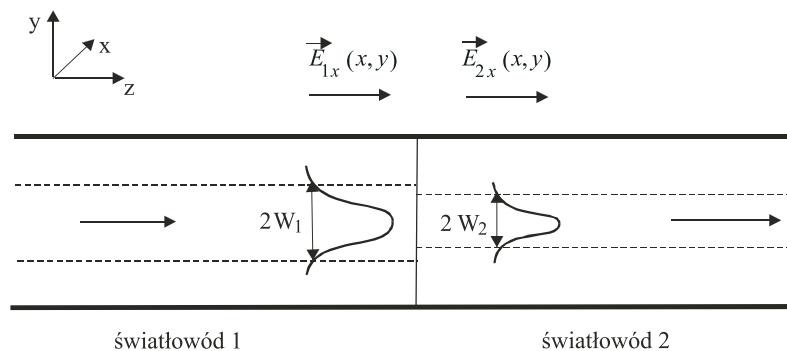
Podczas łączenia światłowodów telekomunikacyjnych (włóknistych), przy założeniu braku obszaru przejściowego pomiędzy włóknami, mogą wystąpić: niedopasowanie promieni pól modowych, przesunięcia osi, przerwy lub pochylenia – rysunek 3.3 – co jest źródłem strat [1].

Termiczne łączenie (spajanie) wyklucza przerwy lub pochylenia. W termicznie łączonych włóknach o słabym przewodzeniu straty, przy złożeniu braku obszaru przejściowego, wynikają jedynie z niedopasowania promieni pól modowych lub/i przesunięcia osi. Poniższe rozważania dotyczą takich właśnie przypadków.



Rys. 3.3. Źródła strat w łączonych światłowodach: a) niedopasowanie promieni pól modowych, b) przesunięcie osi światłowodów, c) przerwa między światłowodami, d) pochylenie włókien

Gaussowskie przybliżenie rozkładu pola modu pozwala w prosty sposób otrzymać dostatecznie dokładne wyrażenie opisujące straty mocy optycznej w łączonych jednomodowych światłowodach włóknistych. Załóżmy, że łączymy centrycznie (bez przesunięcia osi) dwa różne światłowody włókniste o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym – rysunek 3.4.



Rys. 3.4. Centryczne łączenie dwóch różnych światłowodów włóknistych o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym

Niech wiązka (fala) optyczna porusza się w kierunku osi z – rysunek 3.4, a natężenie pola elektrycznego \vec{E} jest spolaryzowane w kierunku x ; wtedy $\vec{E}_{1x}(x,y) = E_{1x}(x,y)\hat{x}$ i $\vec{E}_{2x}(x,y) = E_{2x}(x,y)\hat{x}$ są rozkładami pola w falowodach 1 i 2 – rysunek 3.4.

Z warunku ciągłości pola \vec{E} na granicy dwóch ośrodków oraz z faktu, że są to światłowody o słabym przewodzeniu, co odpowiada warunkom propagacji w jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych i pozwala pominąć mody radiacyjne, można zapisać:

$$E_{1x}(x, y)\hat{x} + r_r E_{1x}(x, y)\hat{x} = t_t E_{2x}(x, y)\hat{x} \quad (3.40)$$

gdzie:

r_r – współczynnik odbicia,

t_t – współczynnik transmisji na granicy dwóch ośrodków.

Podobnie można postąpić, z uwzględnieniem zmiany znaku [1], dla odbitego pola \vec{H} :

$$H_{1y}(x, y)\hat{y} - r_r H_{1y}(x, y)\hat{y} = t_t H_{2y}(x, y)\hat{y} \quad (3.41)$$

Korzystając z zależności (3.30) oraz wykorzystując równanie (3.41) otrzymuje się:

$$\beta_1(1 - r_r)E_{1x}(x, y)\hat{x} = t_t \beta_2 E_{2x}(x, y)\hat{x} \quad (3.42)$$

gdzie:

β_1 i β_2 – stałe propagacji odpowiednio w światłowodach 1 i 2.

Mnożąc obie strony równania (3.40) przez $\vec{E}_{2x}^*(x, y)$ (* – oznacza sprzężenie zespolone) i całkując w całym zakresie x i y , otrzymuje się:

$$(1 + r_r) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{1x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy = t_t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{2x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy \quad (3.43)$$

Czyniąc to samo dla równania (3.42), otrzymuje się:

$$\beta_1(1 - r_r) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{1x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy = \beta_2 t_t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{2x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy \quad (3.44)$$

Znajduje się niewiadome r_r i t_t . Dzielimy zależność (3.44) przez (3.43), eliminuje się t_t :

$$\frac{\beta_1(1 - r_r)}{1 + r_r} = \beta_2 \quad (3.45)$$

i otrzymuje wyrażenie na współczynnik odbicia r_r :

$$r_r = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \quad (3.46)$$

Podstawiając (3.46) do (3.43), otrzymuje się wyrażenie na współczynnik transmisji:

$$t_t = \frac{2\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{1x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{2x}(x, y)E_{2x}^*(x, y)dxdy} \right) \quad (3.47)$$

Moc optyczna propagująca światłowodami 1 i 2 dana jest wyrażeniami [103, 120]:

$$P_1 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{E}_{1x} \times \vec{H}_{1y}^* dx dy = \frac{\beta_1}{2\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{1x}(x, y) E_{1x}^*(x, y) dx dy \quad (3.48)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t_t \vec{E}_{2x} \times t_t^* \vec{H}_{2y}^* dx dy = \frac{\beta_2}{2\omega\mu_0} t_t t_t^* \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{2x}(x, y) E_{2x}^*(x, y) dx dy \quad (3.49)$$

Stąd otrzymuje się współczynnik sprzężenia mocy optycznej η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(x, y) E_2^*(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y) E_1^*(x, y) dx dy} t_t t_t^* \quad \text{i uwzględniając (3.47):}$$

$$\eta = \frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_1 + \beta_2)^2} \left(\frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y) E_2^*(x, y) dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(x, y) E_2^*(x, y) dx dy \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y) E_1^*(x, y) dx dy} \right) \quad (3.50)$$

Dla światłowodów o przekroju kołowym wygodnie jest przedstawić wyrażenie (3.50) we współrzędnych cylindrycznych:

$$\eta = \frac{4\beta_1\beta_2}{(\beta_1 + \beta_2)^2} \left(\frac{\left| \int_0^{+\infty} \left(\int_0^{2\pi} E_1 E_2^* r d\varphi \right) dr \right|^2}{\int_0^{+\infty} \left(\int_0^{2\pi} E_2 E_2^* r d\varphi \right) dr \int_0^{+\infty} \left(\int_0^{2\pi} E_1 E_1^* r d\varphi \right) dr} \right) \quad (3.51)$$

Zakładając gaussowski rozkład pola (3.34÷3.36), który jest dobrym przybliżeniem dla jednomodowych światłowodów włóknistych o słabym przewodzeniu, przekroju kołowym i gaussowskim rozkładzie współczynnika załamania, otrzymuje się:

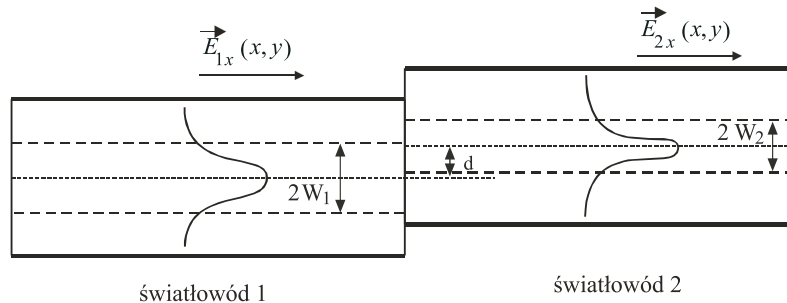
$$\eta = \frac{16\beta_1\beta_2}{(\beta_1 + \beta_2)^2} \frac{W_1^2 W_2^2}{(W_1^2 + W_2^2)^2} \quad (3.52)$$

Dla słabego przewodzenia można przyjąć $\beta_1 \approx \beta_2$ i zależność (3.52) upraszcza się do postaci:

$$\eta = 4 \frac{W_1^2 W_2^2}{(W_1^2 + W_2^2)^2} \quad (3.53)$$

W przypadku przesunięcia osi łączonych włókien o wielkość d – rysunek 3.5 – współczynnik sprzężenia mocy dany jest wyrażeniem [1]:

$$\eta = 4 \frac{W_1^2 W_2^2}{(W_1^2 + W_2^2)^2} \exp\left(-\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2}\right) \quad (3.54)$$



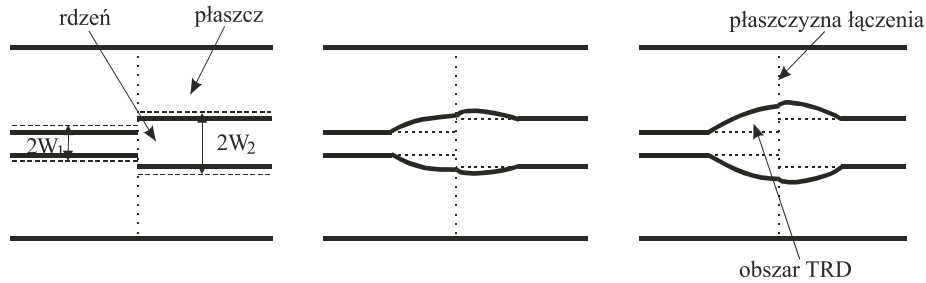
Rys. 3.5. Łączenie, z przesunięciem osiowym d , dwóch różnych światłowodów włóknistych o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym

3.3. Termiczne łączenie światłowodów – analiza tłumienia obszaru przejściowego

Jeżeli podczas łączenia nie występują: niedopasowanie promieni pól modowych, przesunięcia osi, przerwy lub pochylenia, zgodnie z zależnością (3.53) nie ma powodu, aby wystąpiły straty łączenia.

Najczęstszą przyczyną strat jest niedopasowanie promieni pól modowych. W wyżej przedstawionym uproszczonym modelu, aby uniknąć tych strat, należy dopasować promienie pól modowych W_1 i W_2 łączonych włókien (3.53). Aby tego dokonać, trzeba wytworzyć obszar przejściowy w łączonych włóknach, w którym nastąpi wyrównanie (dopasowanie) promieni modowych. W tym celu można np. stosować pracochłonne metody wspawywania kawałków włókien, o sukcesywnie zwiększających się lub zmniejszających promieniach pola modu, pomiędzy łączone włókna [123]. Lepiej jednak w jednym procesie termicznego łączenia (np. spajania w łuku elektrycznym) wytworzyć, metodą kontrolowanej dyfuzji domieszki rdzeniowej, obszar termicznego rozdyfundowania domieszki, w którym następuje dopasowanie pól modowych [59, 98, 106] – rysunek 3.6.

Optymalizacja procesu termicznego łączenia światłowodów włóknistych (telekomunikacyjnych), różniących się parametrami, polega więc na dopasowaniu pól modowych łączonych włókien metodą rozdyfundowania domieszki rdzeniowej [66, 124÷126] i minimalizacji tłumienia obszaru przejściowego termicznie rozdyfundowanej domieszki TRD [85÷87, 106, 107] – rysunki 3.6 i 3.7.



Rys. 3.6. Schematyczna ilustracja powstawania obszaru termicznego rozdyfundowania domieszki – TRD

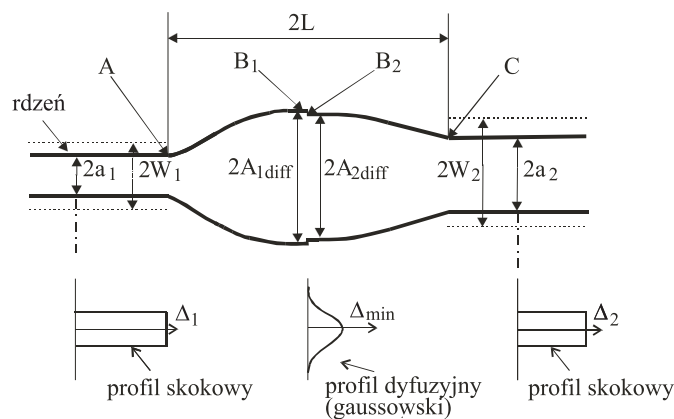
Na rysunku 3.7 przedstawiono schemat optymalizacji, kiedy to rozdyfundowanie domieszki w obszarze spoiny doprowadziło do wyrównania koncentracji domieszki i średnicy rdzeni w miejscu połączenia, a więc wyrównania pól modowych. Jest to możliwe w tej samej temperaturze i czasie zgrzewania, gdyż przy większej koncentracji domieszki (mniejsza średnica rdzenia) współczynniki dyfuzji mają większą wartość [127, 128].

Jeżeli pola modu łączonych włókien nie są do końca wyrównane, wtedy oprócz strat transmisyjnych obszaru TRD pojawiają się straty wynikające z niedopasowania pól modowych (3.55) – na podstawie zależności (3.53). Przy założeniu, że rozkład pola modu podstawowego LP_{01} (który jest modem HE_{11} i przy założeniu słabego przewodzenia może być uznany za rzeczywisty [1]) można aproksymować rozkładem Gaussa, co można uczynić dla skokowego i gaussowskiego profili współczynnika załamania [103, 104], otrzymujemy wartość strat wynikłych z niedopasowania pól modowych jako:

$$A_{\alpha} = -10 \log \left[\left(2W_{diff1}W_{diff2} / (W_{diff1}^2 + W_{diff2}^2) \right)^2 \right] \quad (3.55)$$

gdzie:

W_{diff1}, W_{diff2} – promienie pól modowych łączonych włókien w miejscu styku (tutaj po dyfuzji, choć oczywiście wzór ma ogólny charakter), w TRD.

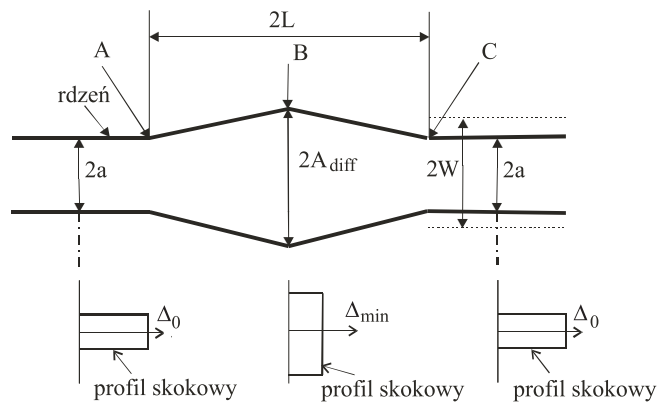


Rys. 3.7. Schematyczna ilustracja termicznie rozdyfundowanego obszaru spoiny łączonych włókien o skokowych profilach współczynnika załamania

3.3.1. Analiza właściwości transmisyjnych dyfuzyjnego obszaru przejściowego

Transmisyjne straty obszaru TRD występują nawet przy założeniu idealnego dopasowania W_{diff1} i W_{diff2} [107, 116, 126].

Metoda propagacji wiązki jest wykorzystywana do analizy propagacji w strukturach, w których właściwości transmisyjne zmieniają się wraz z kierunkiem propagacji (wzdłuż osi z) – tak jak ma to miejsce w obszarach TRD [107]. W kilkunastu pracach, m.in. [33, 107, 109, 116, 126], analizowano właściwości transmisyjne obszarów TRD powstałych wskutek długotrwałego grzania, w temperaturze $1300\div 1600^\circ\text{C}$, litych jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych. Powstawał w ten sposób dyfuzyjny obszar TRD, który po poprzecznym przecięciu (punkt B – rysunek 3.8) mógł służyć np. do sprzęgania z przyrządami o większych polach modu [109, 116]. W teoretycznej analizie zakładano liniowość zmian średnicy rdzenia wzdłuż obszaru TRD – rysunek 3.8.



Rys. 3.8. Liniowy obszar TRD ze skokowym profilem współczynnika załamania – łączenie światłowodów tego samego typu

Nie analizowano teoretycznie tłumienia obszaru TRD powstałego z szybkiego termicznego łączenia włókien w temperaturze $1900\div 2000^\circ\text{C}$, a w szczególności łączenia światłowodów różnych typów – rysunek 3.7. Jednakże analogie, przy założeniu ciągłości struktury w obszarze TRD termicznie łączonych włókien, do badań obszaru TRD powstałego w wyniku grzania litej struktury światłowodu są oczywiste.

Współczynnik transmisji mocy obszaru TRD, dla ogólnego modelu propagacji wiązki, dany jest wyrażeniem [107]:

$$T_p = \frac{\left| \int_0^\infty E_o(r) E_i^*(r) r dr \right|^2}{\left[\int_0^\infty |E_i(r)|^2 r dr \right]^2} \quad (3.56)$$

gdzie:

$E_i(r)$ – składowa elektryczna pola na wejściu TRD,

$E_o(r)$ – składowa elektryczna pola na wyjściu TRD.

Krzywe zależności $T_p(L, \gamma_{\max})$ (gdzie: L – połowa długości obszaru TRD, a $\gamma_{\max} = A_{diff} / a$ jest stosunkiem promienia rdzenia po dyfuzji do promienia rdzenia przed dyfuzją – rysunek 3.8) wykazują minimum (maksimum tłumienia) dla charakterystycznej długości obszaru TRD L_c [107]:

$$L_c = [\gamma_{\max} (\gamma_{\max} - 1)]^{1/2} \frac{\pi n_r W}{\lambda} \quad (3.57)$$

Założono tutaj łączenie światłowodów ze skokowym rozkładem współczynnika załamania tego samego typu, tj. z takim samym n_r i W (parametry przed dyfuzją) – rysunek 3.8.

Tłumienie obszaru przejściowego jest oczywiście mniejsze od maksymalnego, jeżeli jego długość $L > L_c$ lub $L < L_c$ i znacznie mniejsze od maksymalnego, jeżeli $L \gg L_c$ lub $L \ll L_c$ [107]. Gdy długość obszaru TRD jest $L \ll L_c$ lub $L \gg L_c$, wtedy tłumienie transmisji jest nieznaczająco małe, co jest najbardziej pożądanym przypadkiem przy optymalizacji procesów termicznego łączenia światłowodów, np. spajania w łuku elektrycznym. Dobór temperatury i czasów termicznego łączenia, tak aby nastąpiło dopasowanie promieni pól modowych i równocześnie wystąpiły jak najmniejsze straty związane z wymiarami TRD, kończy proces optymalizacji termicznego łączenia.

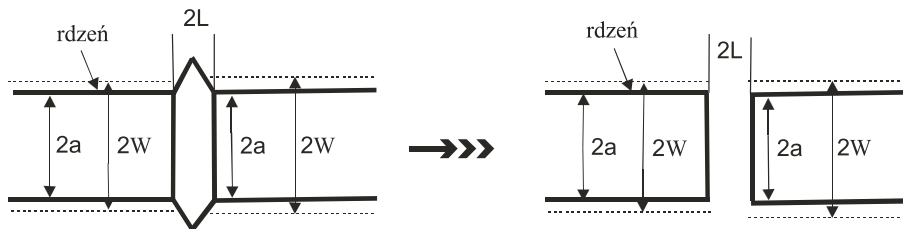
Tłumienie jest małe, jeżeli $L \ll L_c$ lub $L \gg L_c$; powoduje to, że straty transmisyjne w obszarze TRD można opisać dwoma różnymi procesami – modelami transmisji stosowanymi w analizie stożkowych przewężeń w światłowodach jednomodowych [107].

Gdy $L \ll L_c$, obszar przejściowy jest ekwiwalentem szczeliny opisanym przez model przedstawiony w podpunkcie 3.3.1.1 na podstawie literatury [37, 107], natomiast przy $L \gg L_c$ stosuje się model transformacji fazy [107, 126] omówiony w podpunkcie 3.3.1.2.

3.3.1.1. Model szczeliny

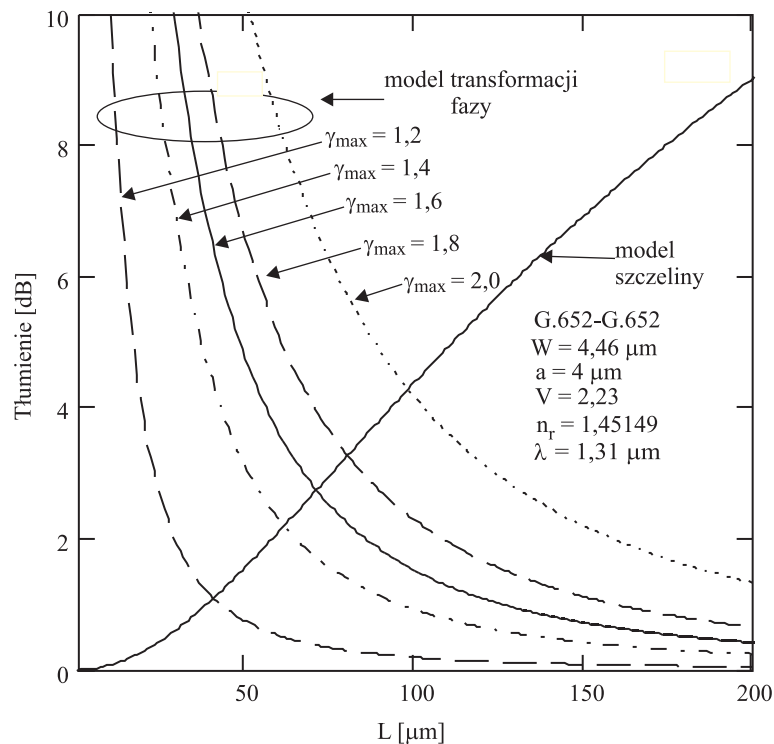
Przy łączeniu ze sobą światłowodów tego samego typu oraz założeniu, że obszar przejściowy TRD jest bardzo krótki – rysunek 3.9, można przyjąć [37, 107], że stanowi on wolną przestrzeń – szczelinę. Na podstawie modelu szczeliny [37, 107] współczynnik transmisji mocy obszaru TRD można przedstawić wyrażeniem:

$$T_g = \left[1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi n_r W^2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.58)$$



Rys. 3.9. Krótki obszar TRD i jego ekwiwalentny model

Tłumienie: $-10 \log T_g$ obszaru TRD w funkcji L dla modelu szczeliny i połączeń standardowych światłowodów telekomunikacyjnych z zerem dyspersji w II oknie optycznym, tj. włókien G.652-G.652 [8], przedstawiono na rysunku 3.10, gdzie również zaprezentowano parametry łączonych włókien użytych do obliczeń.



Rys. 3.10. Tłumienia obszarów TRD w funkcji długości L przy łączeniu światłowodów tego samego typu dla modelu szczeliny i modelu transformacji fazy – $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Tłumienie w tym modelu nie zależy od γ_{\max} . Oznacza to, że nie zależy od czasu i temperatury dyfuzji podczas termicznego łączenia włókien. Jeżeli założyć, że $L \rightarrow 0$, tj. $T_g \rightarrow 1$, to przy połączeniu włókien o różnych W wystąpią, niezależnie od dyfuzji, duże straty niedopasowania $A_\alpha = -10 \log[(2 W_1 W_2 / (W_1^2 + W_2^2))^2]$ – światłowody „widzą się” bez obszaru TRD – rysunek 3.9. Nie jest możliwa zatem optymalizacja strat wynikająca z różnych W , co nie jest zgodne z danymi eksperymentalnymi [81, 96]. Model ten jest nieprzydatny w przypadku optymalizacji metodą termicznej dyfuzji. Należy więc tak prowadzić proces dyfuzji, aby długość obszaru TRD była $L \gg L_c$.

3.3.1.2. Model transformacji fazy

Przy założeniach identycznych jak przyjęte dla poprzedniego modelu współczynnik transmisji obszaru TRD według modelu transformacji fazy [107, 126] można przedstawić według wyrażenia:

$$T_f = T_A T_B T_C \quad (3.59)$$

tutaj:

$$T_A = T_C = \left[1 + \left\{ \frac{1}{2} (\gamma_{\max} - 1) \frac{\pi n_r W^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.60)$$

$$T_B = \left[1 + \left\{ \gamma_{\max} (\gamma_{\max} - 1) \frac{\pi n_r W^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.61)$$

gdzie:

T_A , T_B i T_C – współczynniki transmisji mocy w punktach A, B i C – rysunek 3.8.

Tłumienie: $-10 \log T_f$ (3.59) obszaru TRD w funkcji L dla modelu transformacji fazy i połączeń standardowych światłowodów telekomunikacyjnych z zerem dyspersji w II oknie optycznym, tj. włókien G.652-G.652 [8] oraz pięciu wartości $\gamma_{\max} = 1,2, 1,4, 1,6, 1,8$ i $2,0$ przedstawiono na rysunku 3.10, gdzie również zaprezentowano parametry łączonych włókien użyte do obliczeń. Z przecięcia się krzywych $-10 \log T_f(L)$ i $-10 \log T_g(L)$ można oszacować długość L_c – rysunek 3.10.

W przypadku łączenia światłowodów różnych typów proces dyfuzji domieszki rdzeniowej należy przeprowadzić tak, aby nastąpiło wyrównanie promieni pól modowych, a współczynnik transmisji T_f był jak największy.

Dla wyrównanych, w miejscu styku włókien, promieni pól modowych oraz ich liniowej zmiany w obszarze przejściowym – rysunek 3.11, największe tłumienie tego obszaru (najgorszy przypadek) otrzymuje się przy minimalnej wartości współczynnika transmisji T_f określanego jako [87]:

$$T_f = T_A T_{B1} T_{B2} T_C \quad (3.62)$$

gdzie:

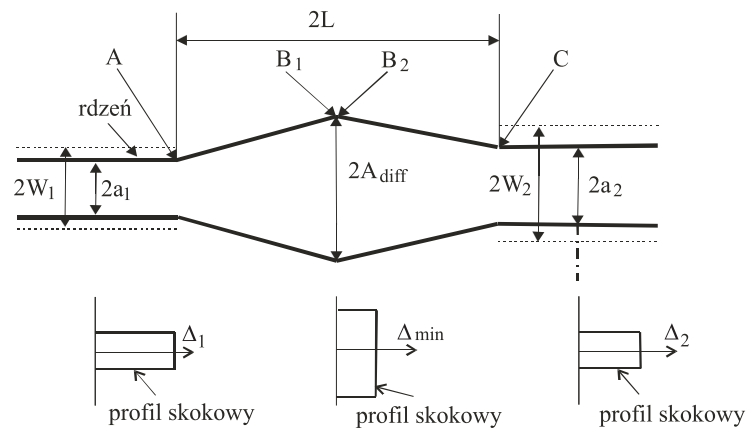
$$T_A = \left[1 + \left\{ \frac{1}{2} (\gamma_{\max 1} - 1) \frac{\pi n_{r1} W_1^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.63)$$

$$T_C = \left[1 + \left\{ \frac{1}{2} (\gamma_{\max 2} - 1) \frac{\pi n_{r2} W_2^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.64)$$

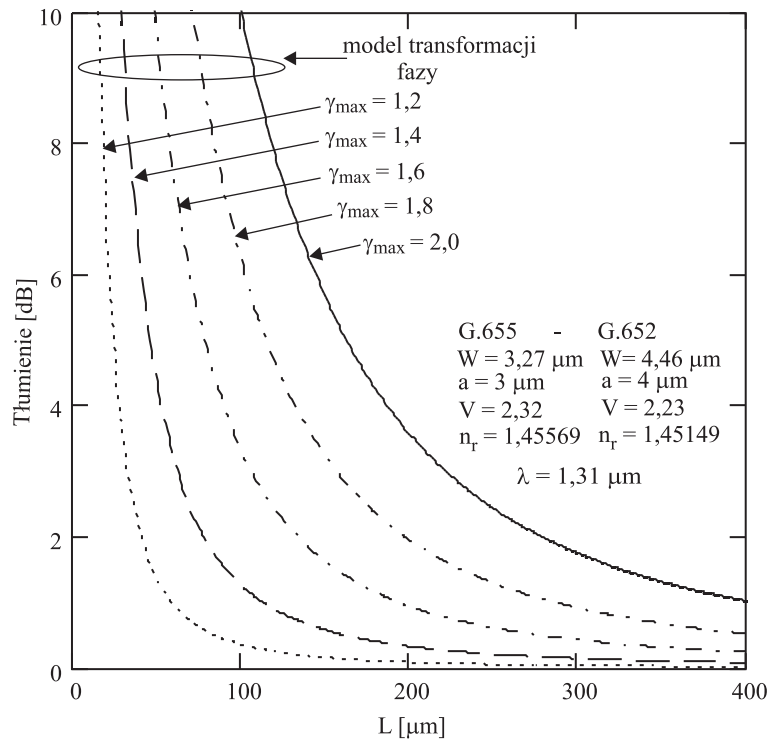
$$T_{B1} = \left[1 + \left\{ \gamma_{\max 1} (\gamma_{\max 1} - 1) \frac{\pi n_{r1} W_1^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.65)$$

$$T_{B2} = \left[1 + \left\{ \gamma_{\max 2} (\gamma_{\max 2} - 1) \frac{\pi n_{r2} W_2^2}{\lambda L} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3.66)$$

W równaniach (3.62)÷(3.66) indeks 1 oznacza parametry światłowodu wejściowego (np. typu G.655), a indeks 2 wyjściowego (np. typu G.652) – rysunek 3.11. Na rysunku 3.12 przedstawiono zależności tłumienia obszarów TRD w funkcji długości L przy łączeniu światłowodów typu G.652 i G.655(G.653) dla pięciu wartości $\gamma_{\max} = 1, 2, 1, 4, 1, 6, 1, 8$ i $2, 0$. Założono liniową zmianę obszaru TRD i skokowe profile współczynników załamania – rysunek 3.11. Parametry łączonych włókien podano na rysunku 3.12.



Rys. 3.11. Liniowy obszar TRD ze skokowym profilem współczynnika załamania – łączenie światłowodów różnych typów



Rys. 3.12. Tłumienia obszarów TRD w funkcji długości L przy łączeniu światłowodów typu G.652 i G.655(G.653) – model transformacji fazy $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Wyniki przedstawione na rysunku 3.12 wskazują, że przy pominięciu dopasowania pól modowych, im mniejsze są temperatura i czas dyfuzji, tj. im mniejszy γ_{\max} , oraz większa długość L , tym mniejsze jest tłumienie obszarów TRD.

Całkowite straty obszaru TRD są sumą strat wynikających z niedopasowania promieni pól modowych i strat transmisyjnych T_f :

$$\Sigma = -10 \log \left[\left(2W_{diff1}W_{diff2} / (W_{diff1}^2 + W_{diff2}^2) \right)^2 \right] - 10 \log T_f \quad (3.67)$$

Optymalizacja termicznego łączenia polega więc na takim zaprojektowaniu procesu dyfuzji domieszki rdzeniowej, aby suma strat wynikająca ze strat niedopasowania promieni pól modowych i strat transmisyjnych obszaru TRD była najmniejsza. Wniosek ten ma charakter ogólny i nie dotyczy tylko włókien telekomunikacyjnych.

Podobne rozważania dotyczące światłowodów ze skokowymi profilami współczynników załamania i liniowymi obszarami TRD przeprowadzono metodą propagacji wiązki dla włókien z gaussowskimi rozkładami współczynników załamania w rdzeniu i z gaussowskim rozkładem współczynnika załamania w obszarze TRD [107]. Założenie gaussowskiego rozkładu prowadzi jedynie do nieco mniejszych tłumień $-10 \log T_f(L)$ obszaru TRD i nie zmienia wyżej przedstawionych wniosków.

3.4. Dyfuzja domieszki w procesie zgrzewania – warunki brzegowe

W przypadku dyfuzji izotropowej [129, 130] strumień dyfuzyjny atomów domieszki opisuje tzw. pierwsze prawo Ficka w postaci:

$$J = -D \text{ grad } N \quad (3.68)$$

gdzie:

- J – strumień dyfundujących atomów domieszki,
- N – koncentracja atomów domieszki,
- D – współczynnik dyfuzji.

Stosując równanie ciągłości do zależności (3.68), otrzymuje się tzw. drugie prawo Ficka:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } N) \quad (3.69)$$

gdzie:

- t – czas.

Równanie dyfuzji (3.69) dla płasko-równoległych, jednowymiarowych struktur przyjmuje postać:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (3.70)$$

Jeżeli $\frac{\partial D}{\partial r} = 0$, tj. współczynnik dyfuzji D nie zależy od położenia, to:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (3.70')$$

Dla struktur cylindrycznych równanie dyfuzji (3.69) przyjmuje postać:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial N}{\partial r} \right) \quad (3.71)$$

Jeżeli $\frac{\partial D}{\partial r} = 0$, tj. współczynnik dyfuzji D nie zależy od położenia, to:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial N}{\partial r} \right) \quad (3.71')$$

Równania (3.70) i (3.71) opisują zmianę koncentracji domieszki w różnych obszarach materiału w funkcji czasu. Postać rozwiązania równań zależy od warunków brzegowych i początkowych.

3.4.1. Dyfuzja z nieograniczonego i ograniczonego źródła domieszki – struktury płasko-równoległe

Jeżeli spełnione są następujące warunki [130]:

- koncentracja domieszki w rdzeniu jest przyjęta za stałą (nieograniczone źródło domieszki) w czasie trwania procesu dyfuzji (spajania), tj.

$$N(0, t) = N_0 \quad (3.72)$$

- koncentracja początkowa domieszki w płaszczu jest mała w porównaniu z N_0 , tj.

$$N(x > a, 0) = 0 \quad (3.73)$$

gdzie:

a – promień rdzenia przed dyfuzją,

to rozkład koncentracji domieszki w płaszczu, otrzymany z rozwiązania (3.70'), jest opisany poniższym wyrażeniem [129, 130]:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.74)$$

gdzie:

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ jest dopełnieniem funkcji błędu, a $\operatorname{erf}(x)$ funkcją błędu [130].

Średnica rdzenia ma wymiar ograniczony (w światłowodach telekomunikacyjnych do ok. 10 μm), więc rdzeń jest ograniczonym źródłem domieszki.

Dla modelu dyfuzji z ograniczonego źródła domieszki, w chwili $t = 0$, rozkład koncentracji domieszki jest opisany:

$$N(x, 0) = N_0 \quad \text{dla} \quad -a < x < a \quad (3.75)$$

$$N(x, 0) = 0 \quad \text{dla} \quad -a > x > a \quad (3.75')$$

natomiast po upływie czasu t rozkład koncentracji domieszki będzie dany wyrażeniem [129, 130]:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x+a}{2\sqrt{Dt}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (3.76)$$

gdzie:

x – odległość od środka rdzenia traktowanego jako płasko-równoległa warstwa w płasko-równoległym płaszczu.

Wyrażenie (3.76) można stosować do obliczeń dyfuzyjnych rozkładów domieszki z płasko-równoległej warstwy skończonej, tj. potraktować rdzeń jako skończoną warstwę $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$ w płasko-równoległym, nieskończonym płaszczu SiO_2 .

Dla rzeczywistej, cylindrycznej struktury włókna będą to jednak obliczenia przybliżone.

3.4.2. Dyfuzja z ograniczonego źródła domieszki – struktury cylindryczne

Rozkład koncentracji domieszki rdzeniowej $N(r,t)$ w światłowodzie cylindrycznym dla ograniczonego (do rdzenia) źródła domieszki otrzymuje się z równania (3.71') [126, 131]:

$$N(r,t) = \frac{2}{b^2} \left(\int_0^b r f(r) dr + \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D\alpha_n^2 t) \times \frac{J_0(r\alpha_n)}{J_1^2(b\alpha_n)} \int_0^b r f(r) J_0(r\alpha_n) dr \right) \quad (3.77)$$

gdzie:

J_0 – funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu zerowego,

J_1 – funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu pierwszego,

α_n – reprezentuje n-te miejsce zerowe otrzymane z $J_0(br) = 0$,

b – promień płaszczka.

Zakłada się następujące warunki początkowe w chwili $t = 0$:

$$\begin{aligned} f(r) &= N_0 & \text{dla} & \quad 0 \leq r < a \\ f(r) &= 0 & \text{dla} & \quad a \leq r < b \end{aligned} \quad (3.78)$$

gdzie:

a – promień rdzenia.

Podstawiając (3.78) do (3.77) i wykorzystując własność $\int z J_0(az) dz = \frac{z}{a} J_1(az)$

[131] otrzymuje się:

$$N(r,t) = N_0 \frac{a^2}{b^2} + N_0 \frac{2a}{b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D\alpha_n^2 t) \times \frac{J_0(r\alpha_n)}{\alpha_n J_1^2(b\alpha_n)} J_1(a\alpha_n) \quad (3.79)$$

Wyrażenie (3.79) opisuje rozkłady domieszki powstające podczas dyfuzji z cylindrycznego rdzenia (np. $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$) o promieniu a do cylindrycznego płaszczka (np. SiO_2) o promieniu b .

3.5. Termiczne łączenie – symulacja strat

Powstanie obszaru przejściowego o odpowiedniej długości L , z optymalnie dopasowanymi promieniami pól modowych ($W_{diff1}, W_{diff2}, \gamma_{max}$) i aperturami numerycznymi NA w obrębie TRD łączonych światłowodów, wiąże się z procesami wyrównywania koncentracji domieszki (najczęściej GeO_2) w tym obszarze. Optymalizację obszaru przejściowego, jako funkcję czasu i prądu spajania (temperatury), można przeprowadzić, znając zarówno współczynniki dyfuzji GeO_2 w SiO_2 dla temperatur termicznego łączenia, jak i parametry światłowodów, takie jak N_0 i a .

Dane literaturowe, dotyczące szczególnie telekomunikacyjnych włókien światłowodowych, nie zawierają informacji o koncentracjach GeO_2 w rdzeniach. Należało zatem przyporządkować współczynnikom załamania i aperturom numerycznym NA (parametrom często udostępnianym) odpowiadające im koncentracje domieszki.

Wartości współczynników załamania w rdzeniu określa się, wykorzystując wzór Sellmeiera [1]:

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \quad (3.80)$$

gdzie:

a_i i b_i – stałe wyznaczone eksperymentalnie dla różnych domieszek i poziomów domieszkowania (w mikrometrach).

Dla niedomieszkowanego SiO₂ przyjęto $n = 1,4468$ dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $n = 1,4440$ dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [1]. Obliczono, że 1% $\frac{\text{mol}}{\text{mol}}$ GeO₂ w SiO₂ odpowiada koncentracji

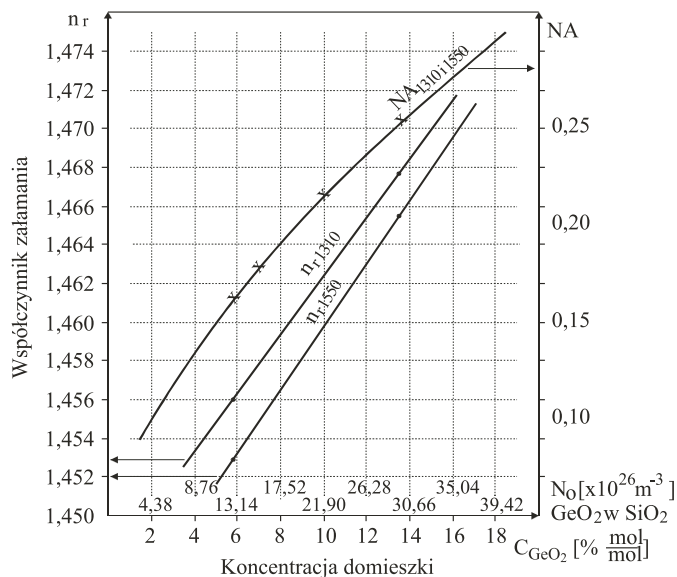
domieszki GeO₂ równej $N_0 = 2,19 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$ i odpowiednio 10% $\frac{\text{mol}}{\text{mol}}$ GeO₂ w SiO₂ to $N_0 = 2,19 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$. Wartość apertury numerycznej NA liczono z wyrażenia [103]:

$$NA = n_r \sqrt{2\Delta} \quad (3.81)$$

gdzie:

$$\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2}.$$

Wyniki tego przyporządkowania przedstawiono na rysunku 3.13.



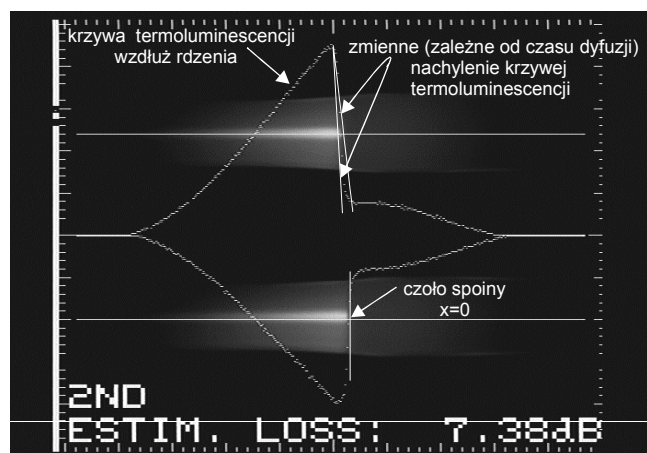
Rys. 3.13. Zależności współczynników załamania n i apertury numerycznej NA od koncentracji GeO₂ w SiO₂ [wyniki własne]

Wyniki przedstawione na rysunku 3.13 pozwalają na bezpośrednią ocenę koncentracji domieszki GeO₂ w łączonych światłowodach istotnie różniących się parametrami.

3.5.1. Obliczenia współczynników dyfuzji GeO_2 w SiO_2

Do oceny procesów dyfuzji GeO_2 użyto światłowodu jednomodowego o $NA = 0,217$ i zawartości germanu w rdzeniu $C_{\text{GeO}_2} = 10,4\% \frac{\text{mol}}{\text{mol}}$ [16] oraz niedomieszkowanego pręta ze szkła krzemionkowego o średnicy $\approx 130 \mu\text{m}$.

Współczynniki dyfuzji liczone na podstawie zmian, wzdłuż spoiny, profili intensywności termoluminescencji zgrzewanych ww. włókien – rysunek 3.14. Obrazy termoluminescencji połączeń zgrzewanych omówiono w rozdziale 2.



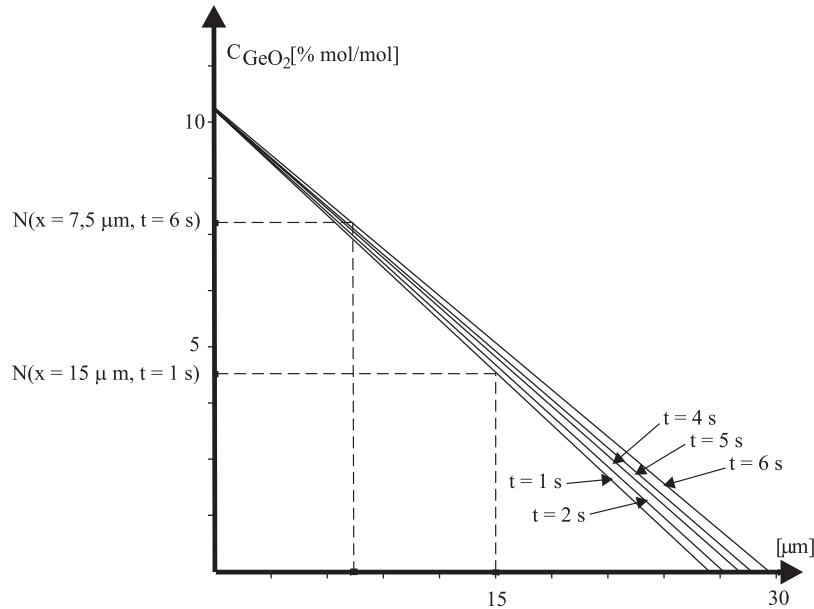
Rys. 3.14. Przykładowy profil intensywności termoluminescencji dla $t = 6 \text{ s}$ [wynik własny]

Prąd spajania podczas głównego II etapu spajania wynosił $16,3 \text{ mA}$ (spawarka lutowa FSU 925 RTC), a temperatura spoiny $\approx 2000^\circ\text{C}$ [96, 118]. Zmieniano czas II etapu spajania od 1 do 6 sekund.

Założono liniową zależność intensywności termoluminescencji od molowej koncentracji GeO_2 w SiO_2 [96, 118, 119]. Krzywe zmian intensywności świecenia dla różnych czasów spajania w funkcji odległości od czoła spoiny przedstawiono na rysunku 3.15. Eksperyment powtarzano pięciokrotnie dla każdego czasu zgrzewania, uzyskując powtarzalne wyniki nachylenia krzywych termoluminescencji – rysunki 3.14 i 3.15.

Obliczenia współczynników dyfuzji wykonano przyjmując poniżej przedstawione warunki i parametry:

- założono strukturę płasko-równoległą – płaski styk dwóch włókien – rysunek 3.14,
- dyfuzja odbywa się z nieograniczonego źródła domieszki, tj. $N(0,t) = N_0$, gdzie $N(0,t)$ nie zmieniająca się w czasie koncentracja domieszki na czoło spoiny ($x = 0$), a N_0 jest koncentracją domieszki w rdzeniu światłowodu o $NA = 0,217$, przyjęto dyfuzję z nieograniczonego źródła domieszki, gdyż przebiega ona tutaj wzdłuż rdzenia w kierunku czoła łączenia,
- koncentracja początkowa domieszki we wnętrzu pręta kwarcowego jest mała w porównaniu z N_0 .



Rys. 3.15. Zmiany intensywności termoluminescencji i przyporządkowana im koncentracja GeO_2 w SiO_2 dla różnych czasów spajania w funkcji odległości od czoła spoiny [wyniki własne]

Koncentrację GeO_2 w przecie kwarcowym można więc wyrazić poniższym wyrażeniem [129, 130]:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.82)$$

Przyjęto gęstość SiO_2 $\rho = 2,20 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Zawartość $C_{\text{GeO}_2} = 10,4\% \frac{\text{mol}}{\text{mol}}$ odpowiada koncentracji GeO_2 w SiO_2 – $N_0 = 2,27 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$. Znając N_0 , x , t i określając $N(x, t)$ na podstawie zmian intensywności termoluminescencji – rysunek 3.15, obliczono wartości współczynników dyfuzji D GeO_2 w SiO_2 w temperaturze $\approx 2000^\circ\text{C}$.

Współczynniki dyfuzji w zakresie liniowego spadku krzywej termoluminescencji liczone dla odległości $x = 7,5 \mu\text{m}$ i $x = 15 \mu\text{m}$ od czoła spoiny – rysunek 3.14.

3.5.2. Wartości współczynników dyfuzji i ich interpretacja

Uzyskano wartości współczynników dyfuzji zmieniające się w zakresie $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$. Wyższe wartości współczynników uzyskano dla krótszych czasów spajania ($t = 1 \text{ s}$ i $t = 2 \text{ s}$) i mniejszej odległości od czoła spoiny ($x = 7,5 \mu\text{m}$). Rzeczywiste wartości współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej GeO_2 w stosowanych światłowodach telekomunikacyjnych mogą być nieco niższe, gdyż obliczenia przeprowadzone przez autora dotyczyły światłowodu o dużej koncentracji GeO_2 w rdzeniu, a generalnie przy wyższych koncentracjach domieszek obserwuje się zwiększenie ich współczynników dyfuzji [127, 128, 130]. Wykorzystanie światłowodu o dużej koncen-

tracji domieszki GeO_2 , a zatem dużej aperturze numerycznej ($NA = 0,217$) wynikało z tego, że zmiany koncentracji domieszki podczas opisanego wyżej eksperymentu – rysunki 3.14, 3.15, dogodnie jest obserwować kiedy jest ona duża.

W literaturze brak danych dotyczących wartości współczynników dyfuzji GeO_2 w SiO_2 w temperaturze $\approx 2000^\circ\text{C}$. Wykonana przez autora ekstrapolacja, przedstawionej w pracy Yamady i Hanafusy [132], temperaturowej zależności współczynników dyfuzji D GeO_2 w SiO_2 z zakresu temperatur $1200\div 1600^\circ\text{C}$ do temperatur $1900\div 2000^\circ\text{C}$ dała wartości w zakresie: $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ i jest to wynik zgodny z otrzymanym w tej pracy.

Wartości współczynników dyfuzji domieszki można przedstawić następującym wyrażeniem (przekształconym wzorem Arrheniusa) [106, 132]:

$$D = D_\infty \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (3.83)$$

gdzie:

- D_∞ – współczynnik dyfuzji dla temperatury $\rightarrow \infty$,
- T – temperatura w skali Kelwina,
- E_a – energia aktywacji dyfundującej domieszki,
- k – stała Boltzmanna.

Przyjmując teoretyczne wartości E_a dla domieszek międzywęzłowych $E_{al} \approx 1 \text{ eV}$ i domieszek dyfundujących przez podstawienie $E_{as} \approx 3,2 \text{ eV}$ w SiO_2 [129, 132], oraz wykorzystując wartości $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ obliczono wartości D_∞ .

Otrzymano dla E_{as} : $D_\infty = 1,47 \cdot 10^{-6} \div 1,47 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$, dla E_{al} :

$$D_\infty = 1,74 \cdot 10^{-11} \div 1,74 \cdot 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}.$$

Obliczone wartości D_∞ dla E_{as} są zbliżone do wartości teoretycznych:

$D_\infty = 1,7 \cdot 10^{-7} \div 2,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ [129, 130, 132]. Oznacza to, że GeO_2 jest w SiO_2 , dla temperatury $\approx 2000^\circ\text{C}$, domieszką dyfundującą przez podstawienie.

Podstawiając do wyrażenia (3.83) dane teoretyczne dla domieszki dyfundującej przez podstawienie w temperaturze 2000°C , otrzymuje się wartości współczynnika dyfuzji GeO_2 w SiO_2 z zakresu: $D = 1,2 \cdot 10^{-14} \div 1,6 \cdot 10^{-13} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ i są to wartości nieco niższe od obliczonych, na podstawie eksperymentu, w pracy. Należy jednak wziąć pod uwagę wyżej przedstawione wnioski dotyczące dyfuzji przy dużej koncentracji domieszek oraz fakt, że w temperaturze $\approx 2000^\circ\text{C}$ w krótkim czasie spajania SiO_2 jest plastyczny i ruchy termiczne sieci SiO_2 mogą zmieniać współczynniki dyfuzji domieszek w SiO_2 .

3.5.3. Rozkłady dyfuzyjne domieszki rdzeniowej i ich gaussowska aproksymacja – struktura cylindryczna

Rozkłady dyfuzyjne liczone, korzystając z powtózonego poniżej wyrażenia (3.79) na dyfuzję domieszki z cylindrycznego rdzenia o promieniu a do cylindrycznego płaszcza o promieniu b :

$$N(r,t) = N_0 \frac{a^2}{b^2} + N_0 \frac{2a}{b^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-D\alpha_n^2 t) \times \frac{J_0(r\alpha_n)}{\alpha_n J_1(b\alpha_n)} J_1(a\alpha_n)$$

gdzie:

- N_0 – koncentracja domieszki w rdzeniu przed dyfuzją,
- a – promień rdzenia,
- b – promień płaszcza (62,5 μm),
- D – współczynnik dyfuzji,
- t – czas dyfuzji,
- r – odległość od środka rdzenia.

Do obliczeń rozkładów dyfuzyjnych wykorzystano pierwszych 20 miejsc zerowych α_n otrzymanych z $J_0(b\alpha_n) = 0$.

Rozkłady gaussowskie liczone, korzystając z wyrażenia:

$$N(r,t) = N_0(0,t) \exp\left(\frac{-r^2}{A_{diff}^2}\right) \quad (3.84)$$

gdzie:

- $N_0(0,t)$ – malejąca z czasem koncentracja w środku rdzenia, za [106] i [107] zdefiniowano $A_{diff}^2 = a^2 + 4Dt$; A_{diff} promień rdzenia, gdzie koncentracja domieszki zmniejsza się e razy.

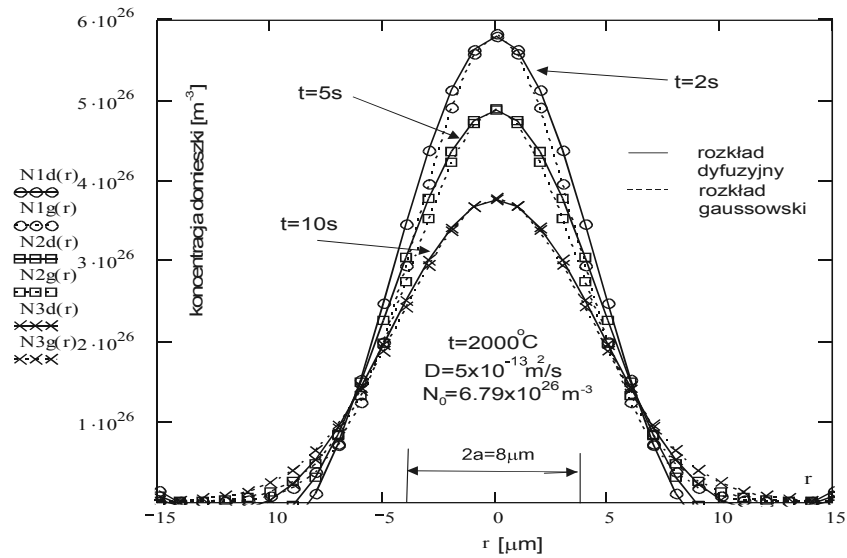
Do obliczeń dyfuzyjnych rozkładów domieszki rdzeniowej GeO_2 w SiO_2 , zgodnie z wartościami współczynników dyfuzji obliczonymi w podrozdziale poprzednim, przyjęto: $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$.

Na rysunkach 3.16÷3.19 przedstawiono obliczenia dyfuzyjnych rozkładów koncentracji GeO_2 w SiO_2 i ich gaussowską aproksymację dla czasów spajania $t = 2 \div 30 \text{s}$, w temperaturze termicznego łączenia w łuku elektrycznym $t \approx 2000^\circ\text{C}$.

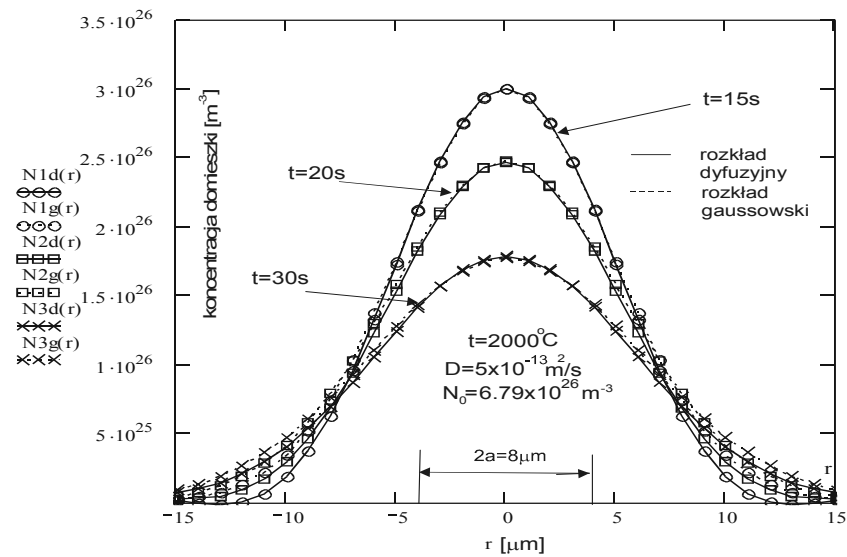
Dla rozkładów z rysunków 3.16 i 3.17 założono dyfuzję z rdzenia o średnicy $2a = 8 \mu\text{m}$. Koncentracja domieszki (przed dyfuzją) wynosiła $N_0 = 6,79 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$ (3.1 at%), co odpowiada współczynnikowi załamania w rdzeniu $n_r = 1,45149$. Wartość współczynnika załamania płaszcza (niedomieszkowanego SiO_2) wynosiła $n_p = 1,44680$. Współczynniki załamania n_r i n_p liczone, wykorzystując wzór (3.80). Wyżej przedstawione parametry odpowiadają standardowemu telekomunikacyjnemu światłowodowi o skokowym rozkładzie współczynnika załamania typu G.652 [8]

o $\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2} = 0,0032$ i aperturze numerycznej $NA = 0,116$ (wyżej przedstawione

parametry liczone były dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$). Obliczenia przeprowadzono dla $D = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$.



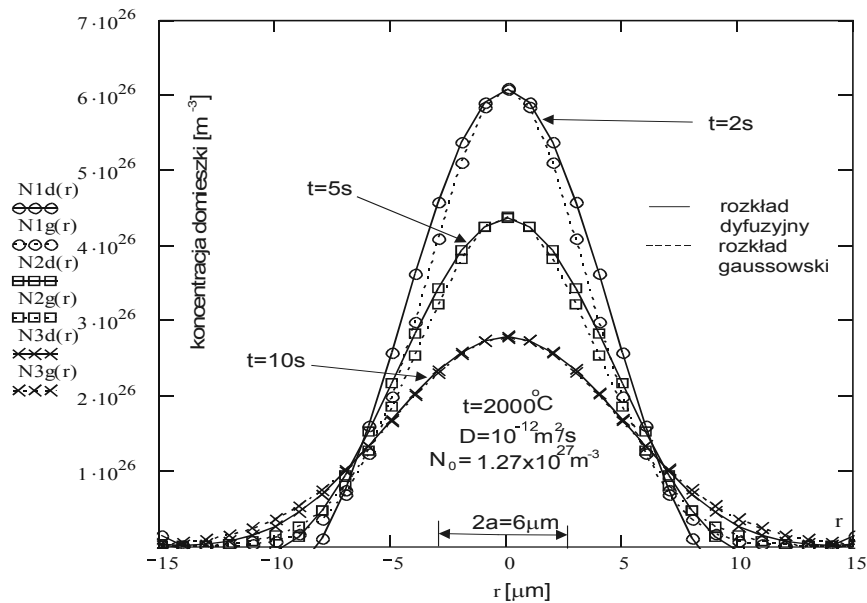
Rys. 3.16. Dyfuzyjne rozkłady domieszki (N_d) i ich gaussowska aproksymacja (N_g) dla SI SMF typu G.652 – małe czasy dyfuzji [wyniki własne]



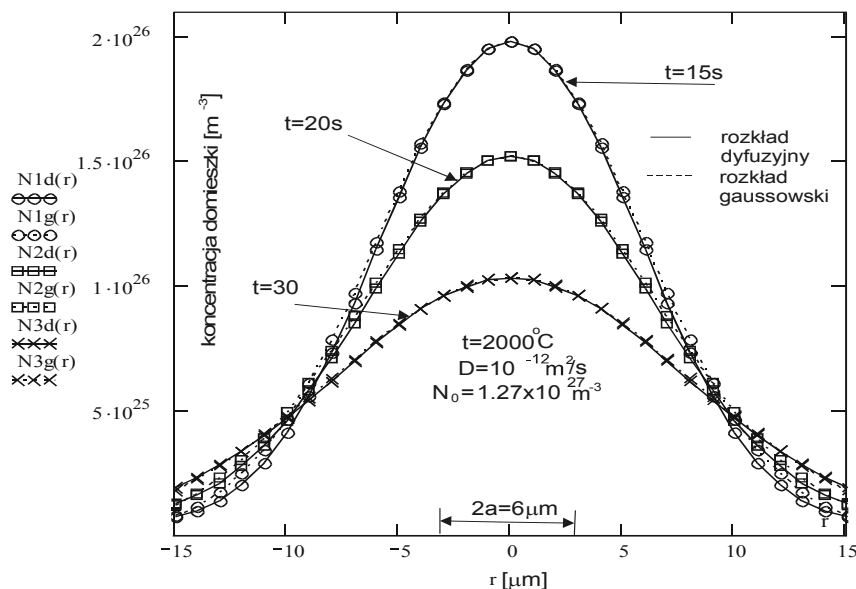
Rys. 3.17. Dyfuzyjne rozkłady domieszki (N_d) i ich gaussowska aproksymacja (N_g) dla SI SMF typu G.652 – duże czasy dyfuzji [wyniki własne]

Dla rozkładów z rysunków 3.18 i 3.19 założono dyfuzję z rdzenia o średnicy $2a = 6 \mu\text{m}$. Koncentracja domieszki (przed dyfuzją) wynosiła $N_0 = 1,27 \times 10^{27} \text{m}^{-3}$, co odpowiada współczynnikowi załamania w rdzeniu $n_r = 1,45569$. Wartość współczynnika załamania płaszczu (niedomieszkowany SiO_2) wynosiła $n_p = 1,44680$. Współczynniki załamania n_r i n_p liczono, wykorzystując wzór Sellmeiera (3.80).

Wyżej przedstawione parametry mogą odpowiadać telekomunikacyjnym światłowodom o skokowym rozkładzie współczynnika załamania typu G.653 lub G.655 [10, 14] o $\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2} = 0,0061$ i aperturze numerycznej $NA = 0,161$ (wyżej przedstawione parametry liczone były dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$). Do obliczeń, w tym przypadku, przyjęto współczynnik dyfuzji $D = 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, gdyż przy wyższych koncentracjach domieszki obserwowane jest zwiększenie współczynników dyfuzji [127, 128, 130].



Rys. 3.18. Dyfuzyjne rozkłady domieszki (N_d) i ich gaussowska aproksymacja (N_g) dla SI SMF typu G.653 lub G.655 – małe czasy dyfuzji [wyniki własne]



Rys. 3.19. Dyfuzyjne rozkłady domieszki (N_d) i ich gaussowska aproksymacja (N_g) dla SI SMF typu G.653 lub G.655 – duże czasy dyfuzji [wyniki własne]

Stwierdzono dobrą zgodność rozkładów dyfuzyjnych i gaussowskich, tym lepszą im dłuższy był czas dyfuzji i większe wartości (z obliczonego zakresu) współczynników dyfuzji – rysunki 3.17 i 3.19. Maksymalna różnica względna między dyfuzyjnymi a gaussowskimi szerokościami połówkowymi rdzeni definiowanymi na wysokości $1/e$ od maksimum koncentracji domieszki (odczytywana z rysunków 3.16÷3.19) – dla bardzo rzadko stosowanego w praktyce optymalizacji termicznego łączenia i najkrótszego z praktycznie możliwych [59, 66, 81, 87] czasu dyfuzji $t = 2$ s, wynosiła 8% – rysunek 3.18.

Zatem uproszczenia – wyrażenia (3.53÷3.54) – wynikające z gaussowskiej aproksymacji rozkładu współczynnika załamania można stosować dla dyfuzyjnych rozkładów domieszki rdzeniowej.

3.5.4. Rozkłady współczynników załamania

Profile współczynników załamania odzwierciedlają rozkłady domieszki. W związku z tym, wykorzystując wzór Sellmeiera (3.80), wartościom koncentracji GeO_2 przyporządkowano odpowiadające im wartości współczynników załamania.

Przykładowe wartości poziomów domieszkowania GeO_2 i odpowiadające im wartości współczynników załamania w rdzeniu przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Poziomy domieszkowania GeO_2 rdzenia i odpowiadające im wartości współczynników załamania dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$.

| | | | | | |
|-----------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| at% | 0 | 3,1 | 5,8 | 7,9 | 13,5 |
| m^{-3} | 0 | $6,79 \times 10^{26}$ | $1,27 \times 10^{27}$ | $1,73 \times 10^{27}$ | $2,95 \times 10^{27}$ |
| n_r | 1,44680 | 1,45149 | 1,45568 | 1,45904 | 1,46807 |

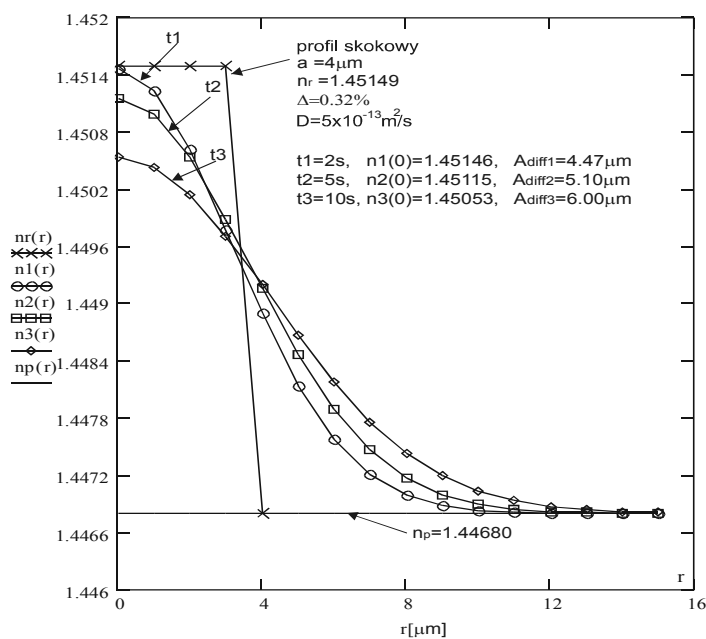
Rozkład domieszki po dyfuzji jest zgodny z rozkładem gaussowskim, co prowadzi do gaussowskiego rozkładu współczynnika załamania:

$$n^2(r) = n_p^2 + (n_r^2 - n_p^2) \exp\left(\frac{-r^2}{A_{diff}^2}\right) \quad (3.85)$$

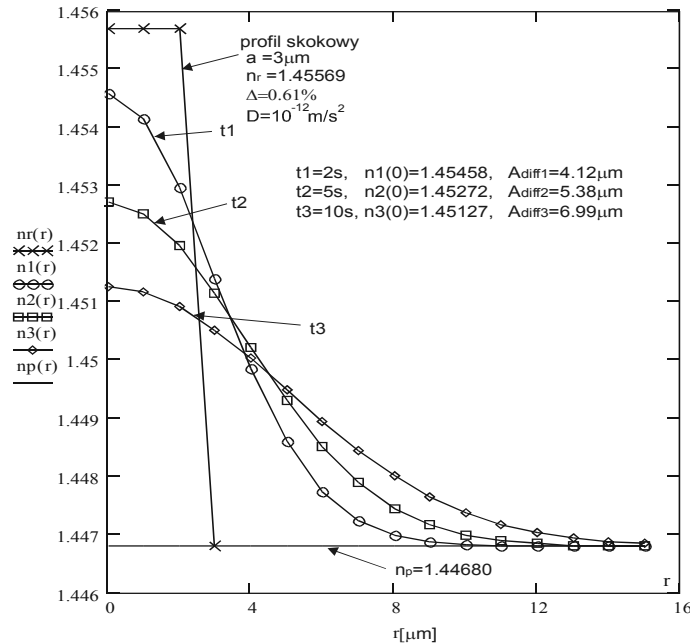
gdzie:

- n_r – wartość współczynnika załamania w centrum rdzenia ($r = 0$) po dyfuzji,
- A_{diff} – promień rdzenia liczony jako szerokość połowkowa na wysokości $1/e$ od maksimum koncentracji domieszki $A_{diff} = \sqrt{a^2 + 4Dt}$.

Przykładowe rozkłady współczynników załamania odpowiadające dyfuzyjnym rozkładom domieszki – rysunki 3.16 i 3.18, dla trzech czasów dyfuzji (spajania), liczone zgodnie z wyrażeniem (3.85) i przedstawiono na rysunkach 3.20 i 3.21.



Rys. 3.20. Rozkłady współczynników załamania rdzenia w SI SMF typu G.652, dla trzech czasów dyfuzji (spajania), odpowiadające dyfuzyjnym rozkładom domieszki z rysunku 3.16, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



Rys. 3.21. Rozkłady współczynników załamania rdzenia w SI SMF typu G.653 lub G.655, dla trzech czasów dyfuzji (spajania), odpowiadające dyfuzyjnym rozkładom domieszki z rysunku 3.18, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

3.5.5. Dopasowanie promieni pól modowych

Z uwagi na fakt, że rozkład pola modu podstawowego LP_{01} można aproksymować rozkładem Gaussa – co można założyć dla rozkładów profili współczynnika załamania skokowego i gaussowskiego (dyfuzyjnego) – punkty 3.1.4 i 3.5.3, straty wynikające z niedopasowania promieni pól modowych można wyrazić poprzez wyrażenie (3.55).

Praktyka połączeń spajanych światłowodów istotnie różniących się parametrami, np. G.652 i G.655, wskazuje, że można otrzymać tłumienie połączenia tych włókien mniejsze od 0,1 dB [59], wykorzystując dyfuzję domieszki w obrębie spoiny – obszar TRD.

Optymalnie jest jednak zacząć badania od odpowiednich obliczeń, tj. przy danych współczynnikach dyfuzji i temperaturze termicznego łączenia należy, na podstawie wartości promieni rdzeni, promieni pól modowych oraz parametrów transmisyjnych TRD po dyfuzji, dobrać optymalne czasy spajania (dyfuzji).

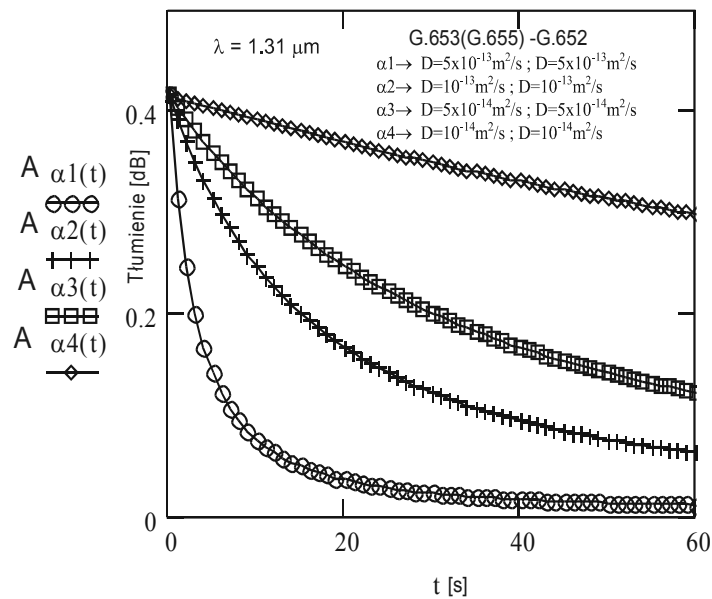
Dla gaussowskiego rozkładu pola modu LP_{01} mamy [96, 133]: $W = \frac{a}{\sqrt{\ln V}}$, gdzie:

a i W są promieniami rdzenia i pola modu przed dyfuzją. Ponieważ obszar spoiny (TRD) pozostaje po dyfuzji jednomodowy, co zostało dowiedzione w podrozdziale 3.6,

częstotliwość znormalizowana $V = \frac{2\pi}{\lambda} aNA$ po dyfuzji pozostaje bez zmian, to

$W_{diff} / A_{diff} = \frac{1}{\sqrt{\ln V}}$. Dla przyjętych parametrów światłowodów G.652 ($NA = 0,116$, $a = 4 \mu\text{m}$) – dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ $V = 2,23$, a dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ $V = 1,88$. Natomiast dla G.655 ($NA = 0,161$, $a = 3 \mu\text{m}$) – dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ $V = 2,32$, a dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ $V = 1,96$. Promienie rdzeni i pól modowych przed dyfuzją wynoszą dla G.652: $a = 4 \mu\text{m}$, $W = 4,46 \mu\text{m}$ dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $W = 5,03 \mu\text{m}$ dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, a dla G.655: $a = 3 \mu\text{m}$, $W = 3,27 \mu\text{m}$ dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $W = 3,73 \mu\text{m}$ dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

Na rysunkach 3.22÷3.24 przedstawiono zależności tłumienia A_z (3.55) od czasów dyfuzji, dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ i dwóch długości fal $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Ponieważ w praktyce temperatura termicznego łączenia może być niższa od $t \approx 2000^\circ\text{C}$, zakres współczynników załamania rozszerzono do wyżej podanych wartości. Zakres wartości współczynników dyfuzji: $D = 10^{-14} \div 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ jest bliższy temperaturze $t \approx 1900^\circ\text{C}$ – ekstrapolacja wyników Yamady i Hanafusy [132].

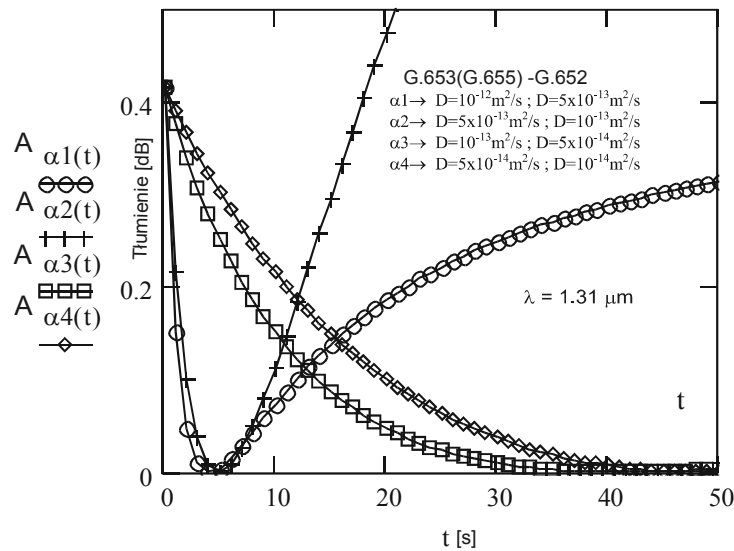


Rys. 3.22. Zależność tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji wynikająca z niedopasowania promieni pól modowych dla równych współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej łączonych włókien, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

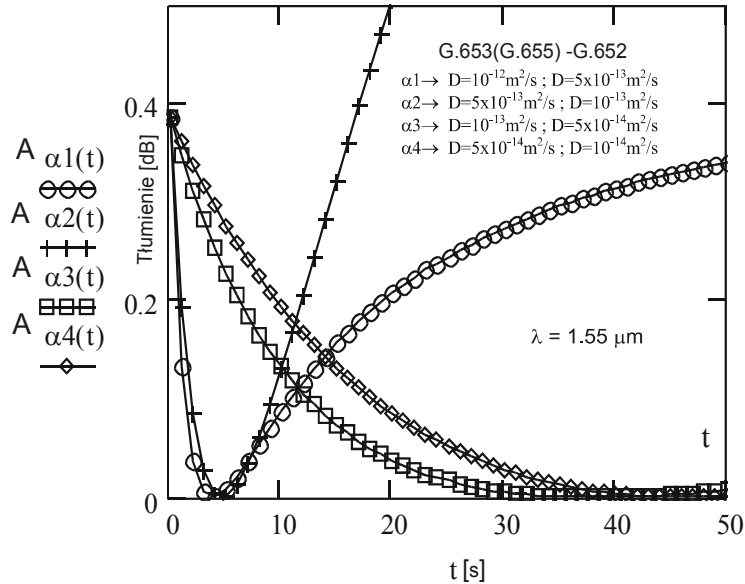
Przy założeniu równości współczynników dyfuzji w łączonych włóknach różnego typu nie obserwuje się minimum tłumienia w zależności $A_z(t)$ – rysunek 3.22. Tłumienie to maleje wraz z wydłużeniem czasu dyfuzji i wzrostem współczynnika dyfuzji. Przeczy to wynikom eksperymentów, np. [63, 95], zatem zasadnym jest przyjęcie różnych współczynników dyfuzji dla różnych typów włókien tj. dla różnych poziomów koncentracji domieszki rdzeniowej [127, 128, 130]. Dla omawianego przypadku, ale dla

$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ tłumienie $A_\alpha(t)$ jest mniejsze o kilka setnych decybelów w porównaniu z wynikami przedstawionymi na rysunku 3.22.

Wyniki zaprezentowane na rysunkach 3.23 i 3.24 wskazują, że przy różnych współczynnikach dyfuzji tłumienie $A_\alpha(t)$ wykazuje minima. Dla współczynników dyfuzji z obliczonego w punkcie 3.5.2 zakresu $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (temperatura $t \approx 2000^\circ\text{C}$) minimum tłumienia wypada dla czasów $t = 3 \div 5$ sekund. Dla zakresu $D = 10^{-13} \div 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ (niższe temperatury łączenia) minimum tłumienia, wynikające z niedopasowania promieni pól modowych, przesuwa się do czasu łączenia powyżej 30 sekund. Tłumienie wynikające z niedopasowania promieni pól modowych łączonych włókien można zredukować do zera – rysunki 3.23 i 3.24, podczas gdy bez dyfuzji (pomijając straty fresnelowskie) łączenie analizowanych włókien (G.652-G.653,655) daje duże tłumienie $A_\alpha = 0,415 \text{ dB}$ dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $A_\alpha = 0,385 \text{ dB}$ dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ – wyrażenie (3.55) oraz rysunki 3.23 i 3.24.



Rys. 3.23. Zależność tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji wynikająca z niedopasowania promieni pól modowych dla różnych współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej łączonych włókien, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



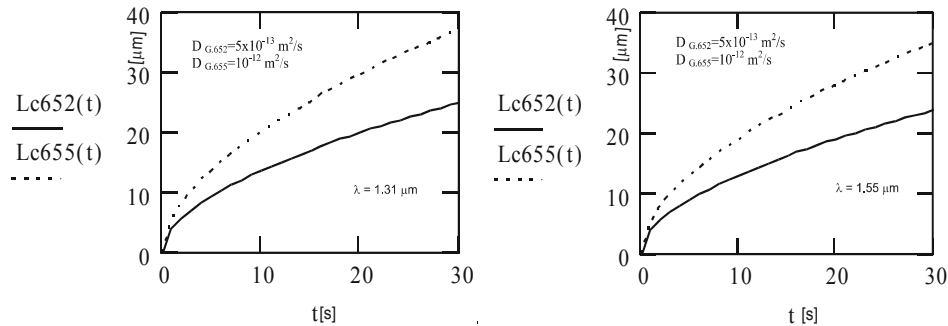
Rys. 3.24. Zależność tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji wynikająca z niedopasowania promieni pól modowych dla różnych współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej łączonych włókien, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

3.5.6. Straty w obszarze przejściowym termicznie łączonych włókien

Całkowite straty mocy optycznej w obszarze TRD są sumą strat wynikających z niedopasowania promieni pól modowych i wielkości obszaru przejściowego, tj. przede wszystkim z jego długości $2L$ i γ_{\max} – (3.62)÷(3.66). Analiza tych dwóch zmiennych pozwala dobrać optymalny czas termicznego łączenia.

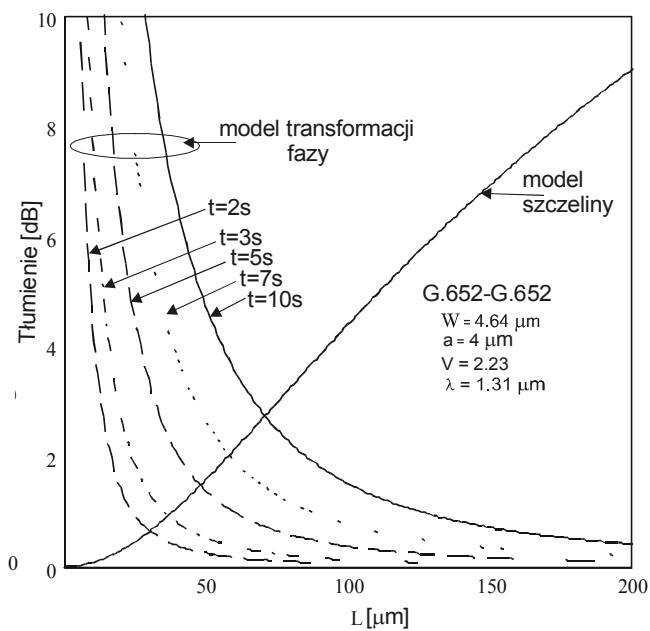
W punkcie zaprezentowano wyniki obliczeń parametrów i strat transmisyjnych oraz strat sumarycznych obszarów przejściowych termicznie łączonych włókien typu G.652, G.655 (G.653) w funkcji czasu dyfuzji.

Długości L_c , określone na podstawie zależności (3.57), w funkcji czasu dyfuzji ($\gamma_{\max} = A_{diff} / a$) dla światłowodów G.652 oraz G.655 i przyporządkowanych im współczynników dyfuzji przedstawiono na rysunku 3.25.



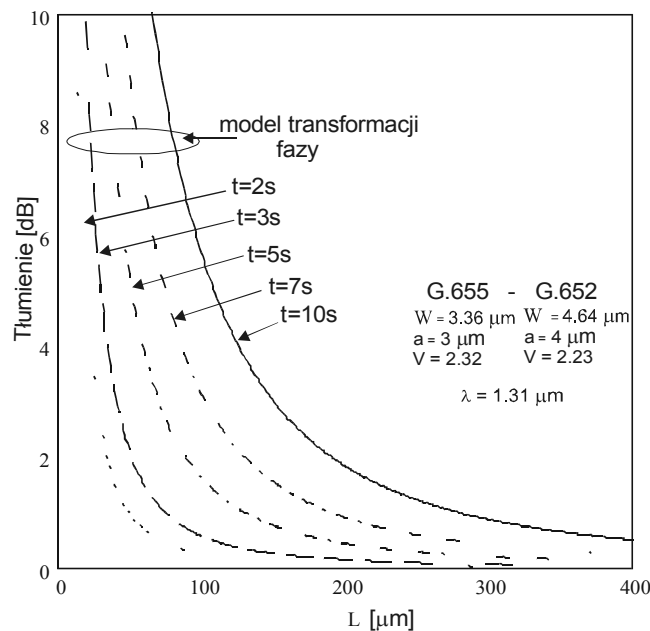
Rys. 3.25. Długość L_c w funkcji czasu dyfuzji dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Tłumienia: $-10 \log T_g$ (3.58) oraz $-10 \log T_f$ (3.59) obszarów TRD w funkcji L dla modelu połączeń G.652-G.652 i pięciu czasów termicznego łączenia przedstawiono na rysunku 3.26.



Rys. 3.26. Tłumienia obszarów TRD w funkcji długości L przy łączeniu światłowodów tego samego typu (G.652-G.652) dla modelu szczeliny i modelu transformacji fazy – $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$, $D = 5 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ [wyniki własne]

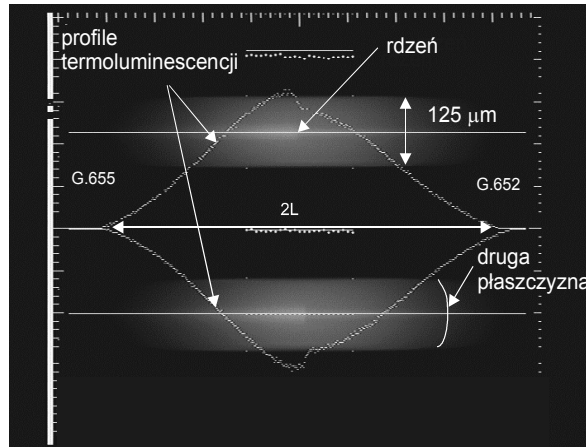
Natomiast na rysunku 3.27 przedstawiono tłumienie $-10 \log T_f$ (3.62) obszarów TRD przy połączeniu światłowodów typu G.652 i G.655 dla pięciu czasów termicznego łączenia, w tym zapewniających dopasowanie pól modowych, tj. 3÷5 sekund.



Rys. 3.27. Tłumienia obszarów TRD w funkcji długości L przy łączeniu światłowodów typu G.652 – $D = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ i G.655 (G.653) – $D = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ – model transformacji fazy $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Wyniki zaprezentowane na rysunku 3.27 wskazują, że przy pominięciu dopasowania pól modowych, im krótszy jest czas dyfuzji, tj. im mniejsze $\gamma_{\text{max}} = A_{\text{diff}} / a$ oraz większe L , tym tłumienie obszarów TRD jest mniejsze.

Długość $2L$ obszaru TRD, którą można utożsamiać z długością obszaru grzania (brak danych literaturowych dla spawarek łukowych), podczas optymalizacji procesu spajania (spawarka Ericsson FSU 925 RTC) oceniono na podstawie obrazów termoluminescencji spajanych włókien. Na rysunku 3.28 przedstawiono obraz intensywności termoluminescencji, wzdłuż rdzeni, włókien G.652 i G.655 łączonych metodą spajania w łuku elektrycznym. Temperatura łączenia w centrum wynosiła $t \approx 2000^\circ\text{C}$, czas spajania $t_2 = 3 \text{ s}$. Od centrum spoiny temperatura zmniejszała się aż do temperatury pokojowej; linia termoluminescencji przechodzi z lewej i prawej strony spoiny w linię poziomą – rysunek 3.28. Odległość, którą można zidentyfikować jako $2L$, wynosi około $700 \mu\text{m}$ i jest znacznie większa od $2L_c$ liczonego dla dużych wartości współczynników dyfuzji. Zatem model transformacji fazy jest w tym przypadku zasadny.



Rys. 3.28. Przykładowy obraz profilu intensywności termoluminescencji łączonych termicznie w łuku elektrycznym włókien G.652 i G.655 [wyniki własne]

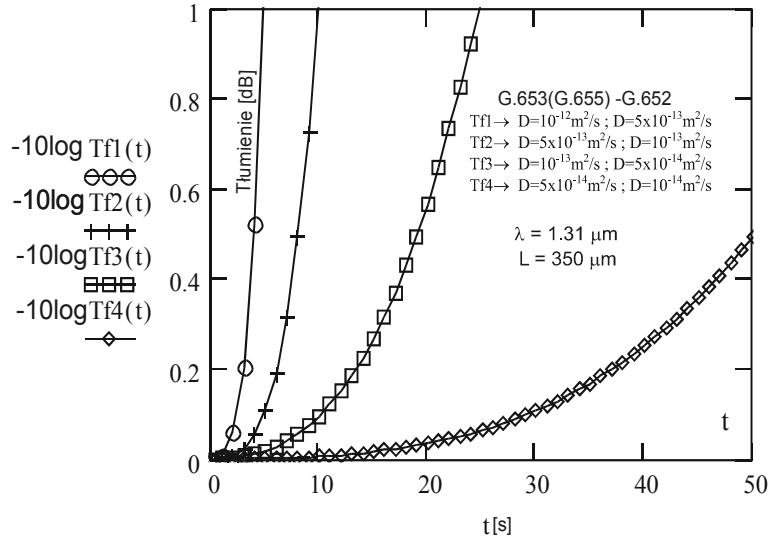
Większość eksperymentalnych wyników (rozdział 5 i 6) autor uzyskał używając spawarki FSU 925 RTC, więc część poniższych teoretycznych rozważań przeprowadzono dla długości obszaru przejściowego $2L = 700 \mu\text{m}$. Natomiast bardzo dobra zgodność teoretycznych wyników optymalizacji tłumienia spoin (dla $2L = 700 \mu\text{m}$, $t \approx 1900^\circ\text{C}$) i eksperymentalnych wyników optymalizacji zgrzewania spawarką Furukawa S175 ($t \approx 1900^\circ\text{C}$) przedstawionych w punkcie 6.2.1 – tabela 6.4 świadczy o tym, że dla spawarek łukowych długość obszaru grzania $2L \approx 700 \mu\text{m}$ jest wielkością typową.

Dla długości $L = 350 \mu\text{m}$ na rysunkach 3.29 i 3.30 przedstawiono zależności tłumienia: $-10 \log T_f$ od czasów termicznego łączenia dla $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ i $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

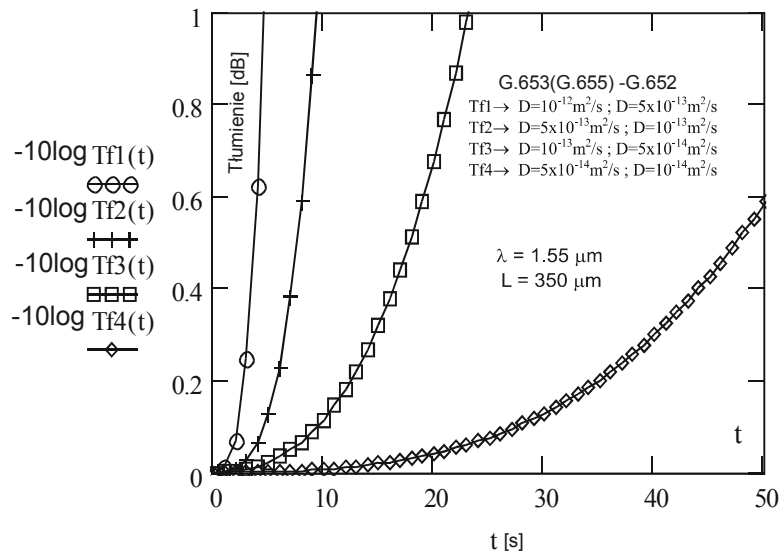
Jak można zauważyć, tłumienie obszaru TRD wynikające z jego wymiarów można zmniejszać dla określonego czasu dyfuzji zmniejszając wartości współczynników dyfuzji – rysunki 3.29 i 3.30 – oznacza to zmniejszenie temperatury łączenia.

Całkowite straty obszaru TRD są sumą strat wynikających z niedopasowania promieni pól modowych i ze strat transmisyjnych T_f (3.67).

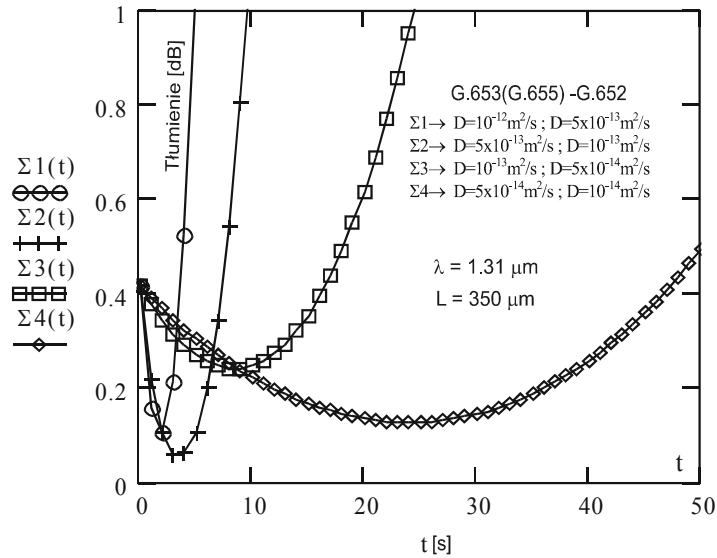
Na rysunkach 3.31 i 3.32 zaprezentowano zależność sumarycznych strat od czasu dyfuzji: $\Sigma(t) = A_\alpha(t) - 10 \log T_f(t)$ dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ i długości obszaru TRD: $2L = 700 \mu\text{m}$. Wyniki przedstawione na rysunku 3.31 są sumą strat określonych na rysunkach 3.23 i 3.29, a na rysunku 3.32 są sumą strat wskazanych na rysunkach 3.24 i 3.30.



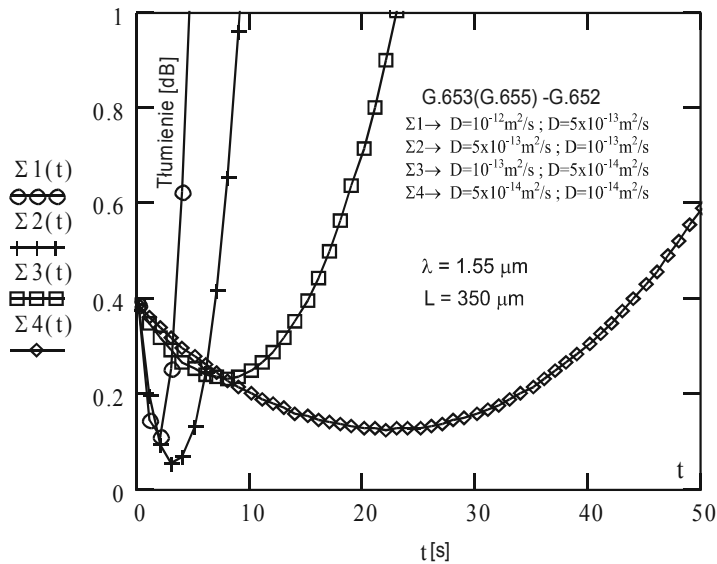
Rys. 3.29. Zależność tłumienia: $-10 \log T_f(t)$ dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $L = 350 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



Rys. 3.30. Zależność tłumienia: $-10 \log T_f(t)$ dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $L = 350 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



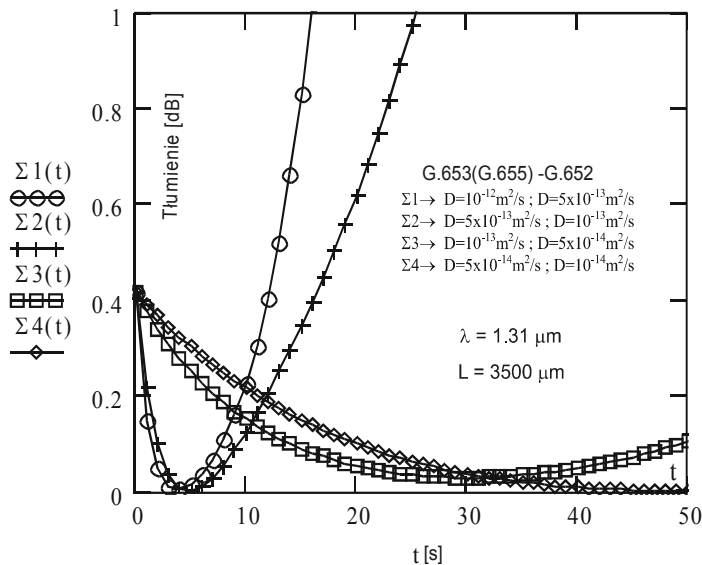
Rys. 3.31. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $L = 350 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



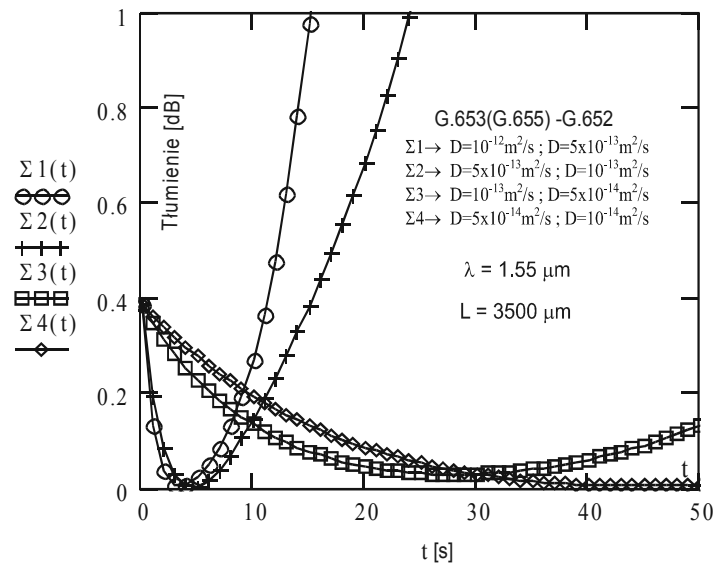
Rys. 3.32. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, $L = 350 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Teoretyczne obliczenia przedstawione na rysunkach 3.31 i 3.32 są zgodne z wynikami prac autora [51÷59, 63, 81], w których czasy dyfuzji dobierano eksperymentalnie, a optymalnymi czasami łączenia, w $t \approx 2000^\circ\text{C}$, włókien o parametrach jak włókna typu G.652 i G.655 są czasy z przedziału 3÷5 sekund – krzywe $\Sigma 1$ i $\Sigma 2$, a dla $t \approx 1900^\circ\text{C}$ czasy z zakresu 20÷25 sekund – krzywa $\Sigma 4$. Teoretyczne obliczenia wskazują również, że metodą termicznego łączenia w łuku elektrycznym można otrzymać połączenia światłowodów istotnie różniących się parametrami, takich jak G.653(G.655)-G.652, wykazujące tłumienie poniżej 0,08 dB. Minimalnie mniejsze wartości całkowitego tłumienia termicznych połączeń powyższych włókien uzyskuje się dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Szczegółową analizę tego zjawiska przedstawiono w rozdziale 5.

Równocześnie należy zauważyć, że wzrost tłumienia termicznego połączenia z wydłużeniem czasu dyfuzji (w racjonalnych granicach) wynika przede wszystkim z właściwości transmisyjnych obszaru TRD, tj. jego wymiarów, a nie z niedopasowania promieni pól modowych łączonych włókien. Przykładowe zależności całkowitego tłumienia obszarów TRD od czasu dyfuzji, ale dla $L = 3500 \mu\text{m}$, przedstawiono na rysunkach 3.33 i 3.34. Taki długi obszar TRD można uzyskać wykonując termiczne łączenie włókien mikropalnikami gazowymi. Wyniki przedstawione na rysunkach 3.33 i 3.34 wskazują, że zwiększając długość obszaru TRD, przy zachowaniu pozostałych parametrów optymalizacji, można uzyskać praktycznie zerowe tłumienie termicznego połączenia światłowodów telekomunikacyjnych istotnie różniących się parametrami.



Rys. 3.33. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 3500 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ [wyniki własne]



Rys. 3.34. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.653(G.655)-G.652 i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 3500 \text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ [wyniki własne]

3.5.7. Termiczne łączenie światłowodów telekomunikacyjnych z dużą powierzchnią efektywną

Zwiększanie długości łączy, jak i wzrost liczby kanałów w światłowodach telekomunikacyjnych – systemy WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) – ma jednakowy wpływ na sygnał prowadzony we włóknie: zwiększa się natężenie transmitowanego światła. W tej sytuacji zjawiska, które były do tej pory zaniechane, stają się istotne: nieliniowe własności optyczne szkła mogą w znacznym stopniu pogorszyć transmisję.

Nieliniowość optyczną typu Kerra opisuje tzw. nieliniowy współczynnik załamania n_2 , zwany też stałą Kerra. Szkło krzemionkowe, z jakiego wykonane są włókna telekomunikacyjne, wykazuje słabą nieliniowość typu Kerra: $n_2 = 3,18 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ [11], ale właśnie ze względu na ciągle zwiększanie się długości łączy i transmitowanych mocy optycznych wpływ nieliniowości szkła na transmisję może być znaczący [13].

Współczynnik n_2 jest powiązany ze współczynnikiem załamania n przez :

$$n = n(\omega) + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (3.86)$$

gdzie:

- $n(\omega)$ – wartość współczynnika załamania zależna od częstotliwości fali świetlnej przy natężeniu światła bliskim zeru,
- n_2 – nieliniowy współczynnik załamania (stała Kerra),

$$\frac{P}{A_{eff}} = I \quad - \quad \text{efektywna gęstość mocy promieniowana w światłowodzie (intensywność promieniowania),}$$

$$A_{eff} \quad - \quad \text{tzw. powierzchnia efektywna (efektywne pole powierzchni) światłowodu.}$$

Nie wszystkie włókna są tak samo podatne na działanie efektu Kerra. Tendencja ta jest wyrażana za pomocą współczynnika nieliniowego n_2/A_{eff} . Im jest on mniejszy, czyli im większa powierzchnia efektywna tym lepiej.

W światłowodach telekomunikacyjnych występują cztery rodzaje efektów nieliniowych: wymuszone rozpraszanie Ramana, wymuszone rozpraszanie Brillouina, mieszanie czterofalowe FWM (*Four Wave Mixing*) oraz wspomniany wyżej efekt Kerra [11, 19]. Wpływ wszystkich czterech efektów na transmisję sygnałów optycznych zmniejsza się przy zwiększaniu powierzchni efektywnej światłowodu [11, 13, 19]. Konieczność zmniejszenia efektów nieliniowych w stosowanych, przede wszystkim w transmisji wielofalowej, światłowodach doprowadziła do powstania światłowodów o dużej powierzchni efektywnej.

Efektywne pole powierzchni światłowodu A_{eff} jest zdefiniowane przez zależność [134]:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left(\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} |E(r)|^4 r dr} = \frac{2\pi \left(\int_0^{\infty} I(r) r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} I^2(r) r dr} \quad (3.87)$$

gdzie:

$E(r)$ i $I(r)$ – rozkłady amplitudy i natężenia pola modu podstawowego LP_{01} w funkcji promienia światłowodu.

Przy założeniu, że rozkład natężenia pola modu jest rozkładem Gaussa:

$$I(r) = \exp(-2r^2/W^2) \quad (3.88)$$

gdzie W jest promieniem pola modu, równanie (3.87) można rozwiązać analitycznie otrzymując:

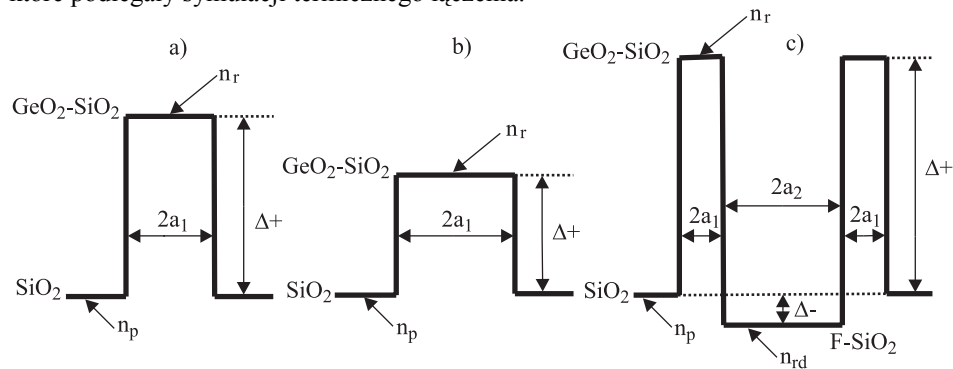
$$A_{eff} = \pi W^2 \quad (3.89)$$

Wyrażenie (3.89) jest dokładne dla światłowodów o skokowym profilu współczynnika załamania, np. standardowego G.652 dla fal w pobliżu długości fali odcięcia λ_c , natomiast dla większych długości fal i dla światłowodów o profilu wieloskokowym nie można dokładnie obliczyć A_{eff} za pomocą wyrażenia (3.89).

Telekomunikacyjne światłowody z dużą powierzchnią efektywną A_{eff} mogą zmniejszać, przede wszystkim w liniach dalekiego zasięgu, gęstość transmitowanej mocy optycznej, a tym samym wpływ efektów nieliniowych na transmisję. Światłowody te charakteryzują się wieloskokowymi profilami współczynników załamania w rdze-

niu domieszkowanym najczęściej fluorem i GeO_2 . Poniżej zaprezentowano symulację procesów termicznego łączenia światłowodów z dużą powierzchnią efektywną A_{eff} ze standardowymi światłowodami telekomunikacyjnymi typu G.652 opierającą się na fakcie, że dyfuzyjne rozkłady domieszek rdzeniowych można aproksymować rozkładami gaussowskimi i tym samym uprościć obliczenia strat w łączonych włóknach, co było przedstawione w poprzednich podrozdziałach rozprawy. Celem symulacji jest zaprojektowanie procesu dyfuzji w łączonych włóknach, tak aby sumaryczne straty wynikające z niedopasowania promieni pól modowych łączonych włókien i strat transmisyjnych obszaru przejściowego były minimalne.

Na rysunku 3.35 przedstawiono profile współczynników załamania we włóknach, które podlegały symulacji termicznego łączenia.



Rys. 3.35. Profile współczynników załamania światłowodów użytych do symulacji termicznego łączenia

Rysunek 3.35a przedstawia skokowy profil standardowego włókna G.652 [8] o powierzchni $A_{\text{eff}} \approx 80 \mu\text{m}^2$ i długości fali odcięcia $\lambda_c = 1,21 \mu\text{m}$, natomiast rysunek

3.35b skokowy profil włókna o obniżonym $\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2}$ i zwiększonej średnicy

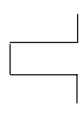
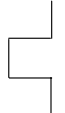
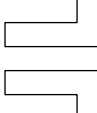
rdzenia, co skutkuje przesunięciem długości fali odcięcia w kierunku fal dłuższych $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$ (III okno optyczne w światłowodach telekomunikacyjnych) i zwiększeniem powierzchni efektywnej $A_{\text{eff}} \approx 130 \mu\text{m}^2$ [1, 19]. Na rysunku 3.35c zaprezentowano włókno o profilu wieloskokowym (centralnie depresyjnym – domieszkowanym w tym obszarze fluorem) o $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$ i $A_{\text{eff}} \approx 130 \mu\text{m}^2$ [19]. Obliczone parametry łączonych włókien zestawiono w tabeli 3.2. Dla włókien b) i c) długość fali odcięcia wynosi $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$, dlatego też dla światłowodu a) parametry zależne od długości fali przedstawiono również dla $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (tabela 3.2).

Dla gaussowskiego rozkładu pola modu LP_{01} otrzymuje się [96, 133]:

$$W = \frac{a}{\sqrt{\ln V}}. \text{ Z tego wyrażenia korzystano przy obliczaniu promieni pól modowych dla}$$

światłowodów a) i b), dla światłowodu c) przyjęto w tabeli 3.2 dane za Hattorim [19]. Koncentracje domieszek liczone na podstawie wykresu 3.13.

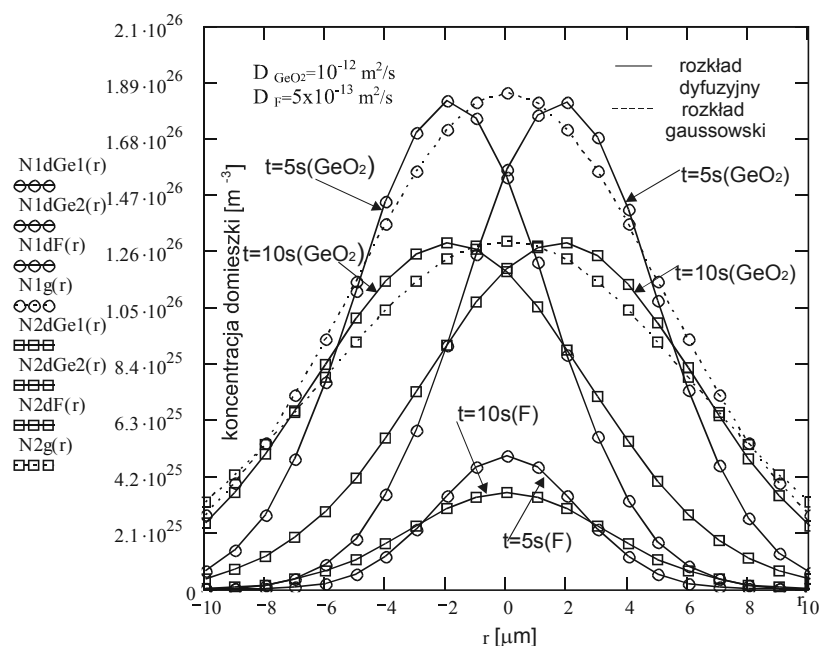
Tabela 3.2. Parametry łączonych włókien (rys. 3.35)

| Typy włókien | a_1 [μm] | a_2 [μm] | W [μm] $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ | A_{eff} [μm^2] $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ | n_r $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | n_{rd} $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | n_p $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | N_0 (GeO ₂) [m^{-3}] | N_0 (F) [m^{-3}] |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | | Δ^+ [%] | Δ^- [%] | Δ^- [%] | Δ^+ [%] | N_0 [m^{-3}] | | | |
| a)  | 4,0 | - | 5,04 | 80 | 1,4488 | - | - | 1,4440 | - | $6,79 \times 10^{26}$ | - | |
| b)  | 5,85 | - | 6,24 | 130 | 1,4478 | - | - | 1,4440 | - | $5,85 \times 10^{26}$ | - | |
| c)  | 1,0 | 5,4 | 5,73 | 130 | 1,4542 | 1,4432 | 1,4432 | 1,4440 | $1,45 \times 10^{27}$ | $1,09 \times 10^{26}$ | - | |
| | | | | | 0,70 | -0,055 | -0,055 | 2,405 | | | | |

Do obliczeń dyfuzyjnych rozkładów domieszki GeO_2 w SiO_2 przyjęto obliczony w poprzednich rozdziałach przedział wartości współczynnika dyfuzji: $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Dla niższych koncentracji GeO_2 w rdzeniu (światłowodów a) i b)) przyjęto następujące wartości współczynników dyfuzji: $D = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ dla a) – G.652, $D = 4 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ dla b) – duża powierzchnia A_{eff} . Dla wyższych koncentracji GeO_2 w rdzeniu, tj. dla światłowodu c) – duża powierzchnia A_{eff} (wieloskok) przyjęto $D = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, gdyż jak już wspomniano, przy większych koncentracjach domieszki obserwowane jest zwiększenie współczynnika dyfuzji. Dla fluoru założono za Shiraishim [106], że współczynnik dyfuzji $D = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$.

Rozkłady dyfuzyjne domieszki dla powyższych włókien liczono, korzystając z wyrażenia na dyfuzję z warstwy o grubości skończonej (3.76), a odpowiadające im gaussowskie rozkłady domieszki obliczono na podstawie (3.84).

Na rysunku 3.36 przedstawiono przykładowe rozkłady dyfuzyjne domieszki i ich gaussowską aproksymację w światłowodzie wieloskokowym (centralnie depresyjnym – tabela 3.2) dla wybranych czasów termicznego łączenia (spajania).

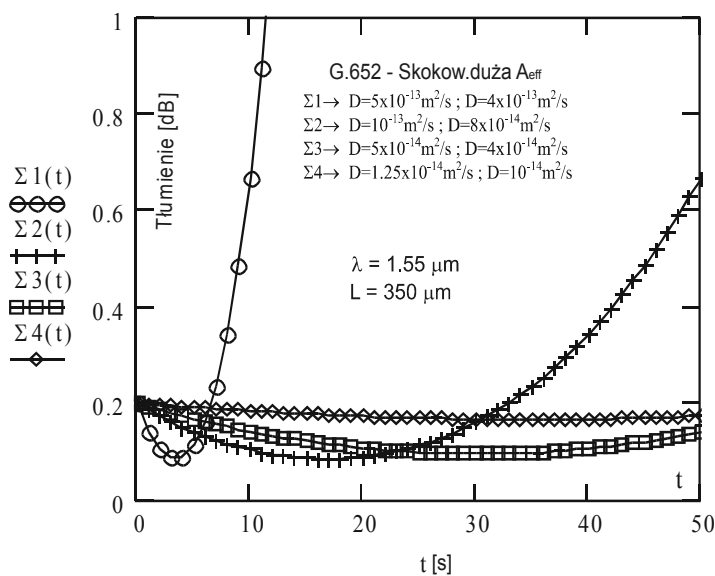


Rys. 3.36. Przykładowe, dla wybranych czasów termicznego łączenia, rozkłady dyfuzyjne domieszki germanowej (NdGe) i fluorowej (NdF) w światłowodzie wieloskokowym (tabela 3.2 – wieloskokowy centralnie depresyjny) oraz dla domieszki germanowej gaussowska aproksymacja (Ng) [wyniki własne]

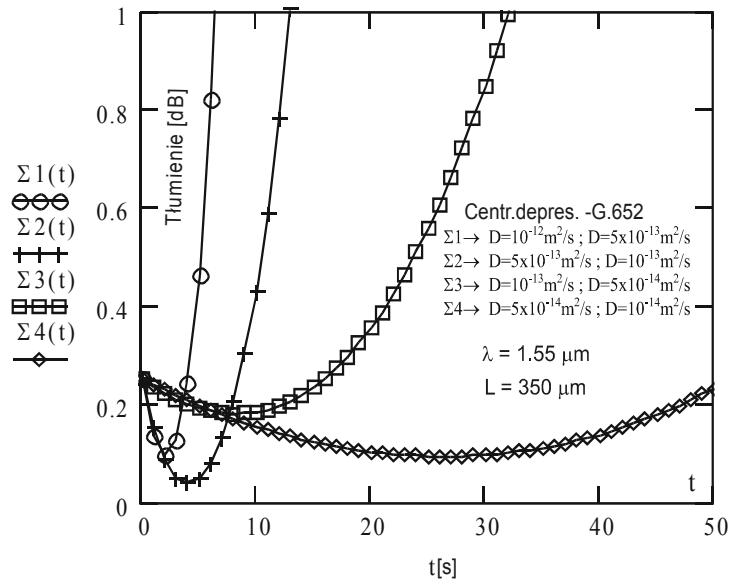
Symulacja dyfuzyjnych rozkładów domieszki i ich gaussowska aproksymacja we włóknach z wieloskokowym profilem współczynnika pokazała, że odpowiadający rozkładowi domieszki rozkład profilu współczynnika załamania osiąga po odpowiednio

zaprojektowanym termicznym procesie taki rozkład dyfuzyjny, że można go aproksymować rozkładem gaussowskim – rysunek 3.36.

Analogicznie do procedury obliczeń przedstawionej w punkcie 3.5.6 na rysunkach 3.37 i 3.38 przedstawiono zależność sumarycznych strat $\Sigma = -10 \log \left[\left(2W_{diff1}W_{diff2} / (W_{diff1}^2 + W_{diff2}^2) \right)^2 \right] - 10 \log T_f$ od czasu dyfuzji dla termicznego łączenia światłowodów a) – b) i a) – c) i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ oraz $L = 350 \text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 3.37. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.652 – skokowy duża A_{eff} (a – b) i współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 350 \text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ [wyniki własne]



Rys. 3.38. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.652 – wieloskokowy centralnie depresyjny (a – c) współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 350 \text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ [wyniki własne]

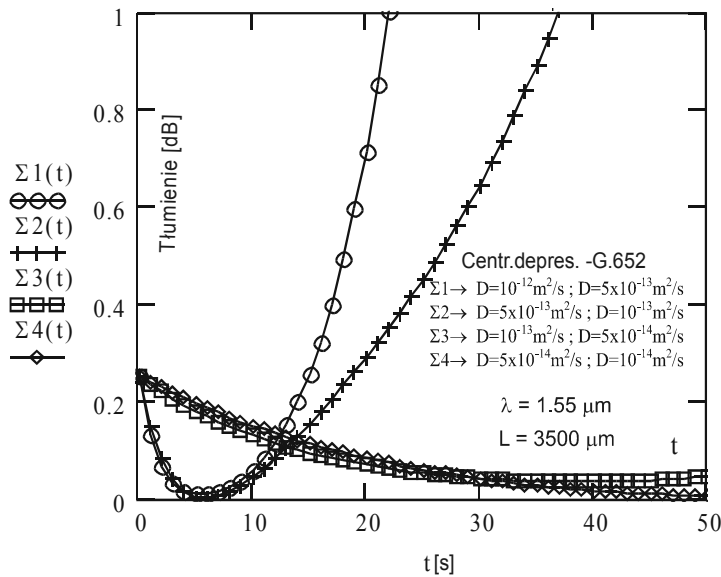
Na podstawie wielkości sumarycznych strat – rysunki 3.37 i 3.38 – stwierdzono, że w temperaturze $t \approx 2000^\circ\text{C}$ (tj. dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) optymalnymi czasami termicznego łączenia światłowodów a) i b) są czasy z zakresu $t = 2 \div 3$ sekund, zaś dla a) i c) $t = 3 \div 5$ sekund.

Dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ($t \approx 1900^\circ\text{C}$) optymalne czasy łączenia przesuwają się do wartości z zakresu $10 \div 30$ sekund – rysunki 3.37 i 3.38.

Straty wynikające z niedopasowania pól modowych są małe w porównaniu z transmisyjnymi stratami obszaru TRD, szczególnie przy połączeniach światłowodów ze skokowym rozkładem współczynnika załamania ze światłowodami wieloskokowymi. Potwierdzają to dane eksperymentalne [135]. Autorzy [135], którzy termicznie łączyli (spajali w łuku elektrycznym) światłowody standardowe ze światłowodami wieloskokowymi i wieloskokowe z wieloskokowymi otrzymali wyniki potwierdzające spostrzeżenie, że wyrażenie (3.55) określające straty wynikające tylko z niedopasowania promieni pól modowych nie opisuje dostatecznie strat w łączonych włóknach tego typu. Zaprezentowali wyniki eksperymentów optymalizacji spajania, w których uzyskali spoiny pomiędzy światłowodami standardowymi a wieloskokowymi o poziomie tłumienia $\sim 0,1 \text{ dB}$. Autorzy tej pracy musieli zatem zmniejszyć straty transmisyjne obszaru TRD.

Straty transmisyjne TRD zależą przede wszystkim od γ_{max} i L – (3.62)÷(3.66). Aby je zmniejszyć należy zmniejszyć γ_{max} i/lub zwiększyć długość obszaru grzania $2L$.

Zmniejszenie γ_{\max} , dla określonych temperatur łączenia ($t = 1900 \div 2000^\circ\text{C}$), jest w praktyce ograniczone, gdyż dla danych koncentracji określonej domieszki w rdzeniu i określonej temperatury spajania nie można zmienić współczynników dyfuzji tejże domieszki. Najprostszą metodą jest zatem zwiększenie długości obszaru TRD, tj. obszaru grzania światłowodów. Na przykład dla $L = 3500 \mu\text{m}$, współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ($t \approx 2000^\circ\text{C}$) i czasów dyfuzji (spajania) od 5 do 7 sekund można otrzymać połączenie światłowodów G.652 – wieloskokowy centralnie depresyjny z praktycznie zerowym tłumieniem – rysunek 3.39.



Rys. 3.39. Zależność całkowitego tłumienia obszaru TRD od czasu dyfuzji dla połączeń włókien G.652 – wieloskokowy centralnie depresyjny (a – c) współczynników dyfuzji z zakresu $D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $L = 3500 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ [wyniki własne]

Termiczne łączenie światłowodów z dużą powierzchnią efektywną i wieloskokowym rozkładem współczynnika załamania ze standardowymi światłowodami telekomunikacyjnymi powinno charakteryzować się dużą długością obszaru grzania, którą można obliczyć, znając parametry łączonych włókien i procesu grzania. Wydaje się, że najlepszą metodą jest tutaj termiczne łączenie za pomocą gazowych mikropalników.

3.6. Jednomodowość dyfuzyjnych obszarów przejściowych

Obliczenia tłumienia obszaru TRD (podrozdział 3.5) opierały się na założeniu jego jednomodowości. Intuicyjnie jasnym jest, że obszar TRD powinien pozostawać jednomodowy, gdyż ilość domieszki pozostaje w nim stała, zmniejsza się apertura numeryczna, ale zwiększa się średnica rdzenia i częstotliwość znormalizowana powinna pozostawać bez zmian (taka jak przed procesem dyfuzji). Obszar rdzenia, ze stałą ilością do-

mieszki w obszarze dyfuzji powinien pozostawać jednomodowy, jeżeli był jednomodowy przed dyfuzją. W literaturze [116] podano krótkie, bez szczegółowego dowodu, uzasadnienie jednomodowości obszaru TRD. Poniżej przedstawiono, inne niż w pracy Ohtery i wsp. [116], uzasadnienie szczegółowe.

3.6.1. Profile równej objętości

Wyrażenie (3.90) opisuje w ogólnym przypadku profil współczynnika załamania światłowodów włóknistego o przekroju kołowym:

$$n^2(R) = n_r^2[1 - 2\Delta f(R)] \quad (3.90)$$

Ten sam rozkład dla światłowodu o stałej wartości współczynnika załamania w płaszczu można przedstawić następująco [103]:

$$n^2(R) \begin{cases} = n_p^2 + (n_r^2 - n_p^2)[1 - 2\Delta f(R)] & \text{dla } 0 \leq R < 1 \\ = n_p^2 & \text{dla } 1 \leq R < \infty \end{cases} \quad (3.90')$$

gdzie:

$R = \frac{r}{a}$ – znormalizowany promień,

a – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu,

r – odległość od środka rdzenia,

n_r – wartość współczynnika załamania w rdzeniu (dla $r = 0$),

n_p – wartość współczynnika załamania w płaszczu, $\Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2}$,

$f(R)$ – funkcja zmian współczynnika załamania.

Funkcja $[1 - f(R)]$ określa formę profilu. Dla wszystkich profili z jednakową wartością Δ i jednakową wartością n_p można określić tzw. efektywną objętość profilu Ω [103]:

$$\Omega = 2\pi a^2 \int_0^{\infty} [1 - f(R)] R dR \quad (3.91)$$

gdzie:

a – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu.

Profile o równym Δ charakteryzują się równą efektywną objętością i w ogólnym przypadku różnymi a .

Do analizy, jako bazowy, wybrano skokowy profil współczynnika załamania i określono dla niego Ω . Ograniczony do rdzenia profil potęgowy (3.92) dla $q = \infty$ przechodzi w skokowy:

$$n^2(R) \begin{cases} = n_r^2(1 - 2\Delta R^q) & \text{dla } 0 \leq R < 1 \\ = n_p^2 = n_r^2(1 - 2\Delta) & \text{dla } 1 \leq R < \infty \end{cases} \quad (3.92)$$

zatem dla profilu skokowego otrzymuje się:

$$\begin{aligned} f(R) &= 0 & \text{dla } 0 \leq R < 1 \\ f(R) &= 1 & \text{dla } 1 \leq R < \infty \end{aligned} \quad (3.93)$$

stąd efektywna objętość profilu (bazowego) skokowego:

$$\Omega = 2\pi a_s^2 \int_0^1 R dR = \pi a_s^2 \quad (3.94)$$

gdzie:

$a_s = a$ – promień rdzenia dla światłowodu ze skokowym profilem współczynnika załamania – równy promieniowi efektywnemu.

Objętość efektywna dla profilu potęgowego ograniczonego do rdzenia $2a_{peff}$ – rysunek 3.40 – wynosi:

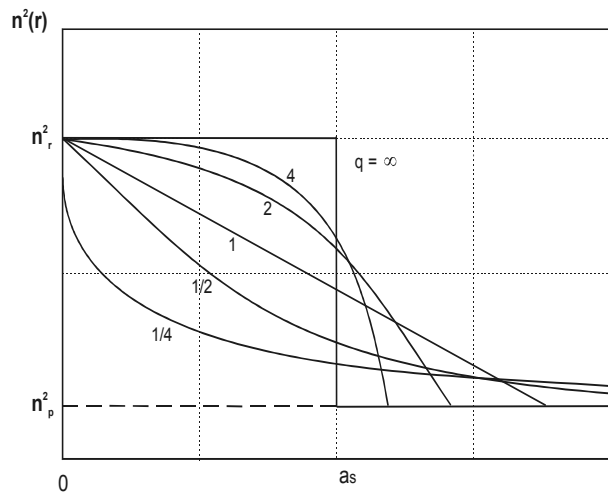
$$\Omega = 2\pi a_{peff}^2 \int_0^1 (1 - R^q) R dR = \pi a_{peff}^2 \frac{q}{q+2} \quad (3.95)$$

gdzie: $R = \frac{r}{a_{peff}}$.

Z wyrażen (3.94) i (3.95) otrzymuje się:

$$a_{peff} = a_s \left(\frac{q+2}{q} \right)^{1/2} \quad (3.96)$$

Zmiany współczynnika załamania dla profilu skokowego i profili potęgowych przy założeniu równej efektywnej objętości przedstawiono na rysunku 3.40.



Rys. 3.40. Zmiany współczynnika załamania dla profilu skokowego i profili potęgowych przy założeniu równej efektywnej objętości [103]

3.6.2. Częstotliwość odcięcia dla profili równej objętości

Częstotliwość odcięcia V_c' dla dowolnej formy profilu równej objętości można wyrazić poprzez a_{eff} i V_c [103]:

$$V_c' = \left(\frac{a_s}{a_{eff}} \right) V_c \quad (3.97)$$

gdzie:

a_{eff} – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu równej objętości.

Częstotliwość odcięcia V_c' dla profilu potęgowego równej objętości można wyrazić poprzez a_{peff} i V_c :

$$V_c' = \left(\frac{a_s}{a_{peff}} \right) V_c = \left(\frac{q}{q+2} \right)^{1/2} V_c \quad (3.98)$$

Dla profilu skokowego $q = \infty$ i $V_c' = V_c = 2,405$.

Uogólniając, dla różnych form profilu współczynnika załamania o tej samej objętości, otrzymuje się (w porównaniu z profilem skokowym):

$$2\pi a_{eff}^2 \int_0^{\infty} [1 - f(R)] R dR = 2\pi a_s^2 \int_0^1 R dR \quad (3.99)$$

i

$$\frac{a_{eff}}{a_s} = \left[\frac{\int_0^1 R dR}{\int_0^{\infty} [1 - f(R)] R dR} \right]^{1/2} \quad (3.100)$$

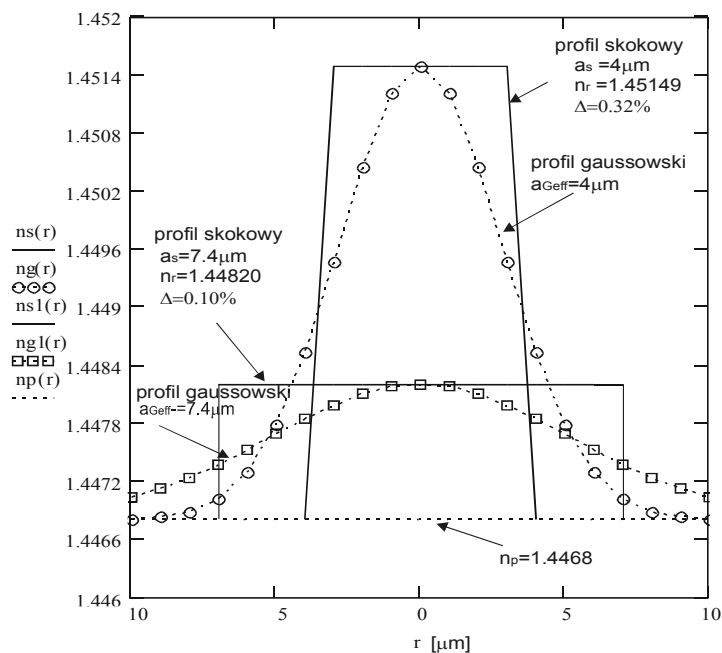
gdzie: $R = \frac{r}{a_{eff}}$.

Dla profilu potęgowego $f(R) = R^q$, a dla profilu gaussowskiego $f(R) = 1 - \exp(-R^2)$.

Ponieważ $\int_0^{\infty} \exp(-R^2) R dR = 0,5$, to dla profilu gaussowskiego, który dobrze aproksymuje rozkład dyfuzyjny domieszki [67], otrzymuje się (3.100): $a_{Geff} = a_s$. Oznacza to, że częstotliwość odcięcia dla profilu skokowego jest taka sama jak dla gaussowskiego tej samej objętości (z równym Δ), gdyż $V_c = \frac{a_{eff}}{a_s} V_c' = \frac{a_{Geff}}{a_s} V_c' = V_c' = 2,405$.

Zatem jeżeli dla profilu skokowego światłowód pozostaje jednomodowy, to dla profilu gaussowskiego równej objętości, o takim samym Δ – rysunek 3.41, jest on również jednomodowy. Oznacza to także, że obszar światłowodu o profilu skokowym po dyfuzji, np. termicznym łączeniu, pozostaje jednomodowy, gdyż światłowody te pozostają jednomodowe, jeżeli ilość domieszki w obrębie profilu skokowego nie zmienia się [107].

Podobny dowód można przeprowadzić dla światłowodów jednomodowych o dowolnym profilu, który po procesie dyfuzji można aproksymować funkcją Gaussa.



Rys. 3.41. Przykłady profili równej objętości przed i po dyfuzji: skokowych i odpowiadających im gaussowskich [wyniki własne]

Promień rdzenia po dyfuzji, który jest tożsamy z a_{Geff} , można obliczyć w poniżej przedstawiony sposób.

Zakłada się, że po procesie dyfuzji rozkład domieszki (zatem i współczynnik załamania) pozostaje skokowy, lecz oczywiście ilość domieszki na długości łączenia L nie zmienia się.

Zatem:

$$\pi a_{S0}^2 \cdot L \cdot N_0 = \pi a_S^2 \cdot L \cdot N_1 \quad (3.101)$$

gdzie:

- L – długość termicznego łączenia,
- a_{S0} – promień rdzenia przed dyfuzją,
- a_S – promień rdzenia po dyfuzji,
- N_0 – koncentracja domieszki przed dyfuzją,
- N_1 – koncentracja domieszki po dyfuzji.

Promień rdzenia po dyfuzji dla rozkładu skokowego i dyfuzyjnego (gaussowskiego) wynosi zatem:

$$a_S = a_{Geff} = a_{S0} \sqrt{\frac{N_0}{N_1}} \quad (3.102)$$

$N_1(r)$ otrzymuje się z rozkładów dyfuzyjnych. N_1 definiowane jest dla $r = 0$.

$$\text{Dla } r = a_{Geff} \rightarrow \frac{N_1(a_{Geff})}{N_1} = \frac{1}{e}.$$

Po procesie dyfuzji obszary termicznego łączenia pozostają jednomodowe.

W procesie termicznego łączenia światłowodów występuje dyfuzja domieszki rdzeniowej. Stwierdzono dobrą zgodność rozkładów dyfuzyjnych i gaussowskich domieszki, tym lepszą, im dłuższy jest czas dyfuzji, czyli termicznego łączenia. Zatem rozkłady dyfuzyjne domieszki, a co za tym idzie, i profile współczynników załamania można aproksymować rozkładami gaussowskimi. Gaussowskie przybliżenie rozkładów pola, które istotnie upraszcza obliczenia strat wynikających z niedopasowania promieni pól modowych łączonych włókien, jest szczególnie przydatne w tych przypadkach profili współczynnika załamania, dla których nie istnieje analityczne rozwiązanie skalarnego równania falowego. Takim przykładem jest właśnie gaussowski profil współczynnika załamania. Taka forma profilu ma duże praktyczne znaczenie, gdyż po pierwsze odzwierciedla procesy dyfuzji domieszek między rdzeniem a płaszczem w procesie produkcji włókien, a po drugie takim profilem można aproksymować rozkłady współczynników załamania w obszarze przejściowym łączonych metodami termicznymi światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów. W tak łączonych włóknach można, dzięki odpowiedniemu rozdyfundowaniu domieszek uzyskać obszar przejściowy TRD i łączyć prawie bezstratnie światłowody o różnych wartościach i profilach współczynnika załamania.

Przeprowadzona teoretyczna analiza właściwości transmisyjnych obszaru przejściowego TRD wykazała, że można otrzymać tłumienie termicznego połączenia (spoiny) włókien istotnie różniących się parametrami, takich jak typu G.652 i G.655 czy G.652 i wieloskokowych z dużą powierzchnią efektywną, poniżej 0,1 dB, stosując klasyczne łączenie w łuku elektrycznym. Stosując zaś metody spajania zwiększające długość TRD, np. łączenie za pomocą gazowych mikropalników, można otrzymać zerowe tłumienie takiego połączenia. Wyniki analizy są zgodne z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi przez autora i przedstawionymi w dalszej części rozprawy.

Przedstawione rozważania umożliwiają sformułowanie wniosku, że profile współczynników załamania stosowane w jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych, „poddane” procesowi dyfuzji można aproksymować rozkładem gaussowskim, co prowadzi do opisu składowych pola modu podstawowego funkcją Gaussa, zaś obszar TRD po procesie dyfuzji pozostaje jednomodowy. Ma to fundamentalne znaczenie przy określaniu współczynników sprzężenia mocy pomiędzy dwoma włóknami różniącymi się wartościami i profilami współczynników załamania, łączonymi metodami termicznymi powodującymi dyfuzję domieszek.

4. Opis włókien światłowodowych użytych do badań eksperymentalnych

Do badań optymalizacji połączeń zgrzewanych wykorzystano następujące światłowody:

- MC-SMF 1528 – Siecor (OVD) – skokowy profil współczynnika załamania,
- MC-SMF – Optical Fibres (OVD) – skokowy profil współczynnika załamania,
- MC-SMF – Fujikura (VAD) – skokowy profil współczynnika załamania,
- MC-SMF – Lycom (MCVD) – skokowy profil współczynnika załamania,
- DC-SMF – Lycom (MCVD) – profil współczynnika załamania typu W,
- DS-SMF – Lycom (MCVD) – quasi-trójkątny profil współczynnika załamania,
- NZDS SMF typu TrueWave[®] – Lucent Technologies (MCVD) – quasi – trójkątny profil współczynnika załamania,
- NZDS SMF typu SMF-LS[™] i SMF-LEAF[™] – Corning (OVD) – profil współczynnika załamania typu korona.

4.1. Standardowe, quasi-universalne włókno MC-SMF – rozważania projektowe, parametry

Podstawowa różnica pomiędzy różnymi typami jednomodowych włókien telekomunikacyjnych wynika głównie z obsługiwanych okien optycznych, dla których poszczególne włókna są optymalizowane. Włókno MC-SMF zostało zaprojektowane dla pracy w II oknie optycznym i dodatkowo spełnia wymagania transmisji w III oknie optycznym, w tym wymagania dla transmisji WDM [67]. Jest ono najczęściej stosowane, a zatem i łączone w różnych kombinacjach z innymi włóknami.

Włókno jest wytwarzane jako światłowód o skokowym profilu współczynnika załamania z płaszczem, z czystego SiO₂ i obszarem rdzeniowym domieszkowanym GeO₂ – rysunek 1.1. Brak użycia jakichkolwiek innych domieszek zapewnia spełnienie warunku małej wrażliwości na działanie wodoru i promieniowania [136].

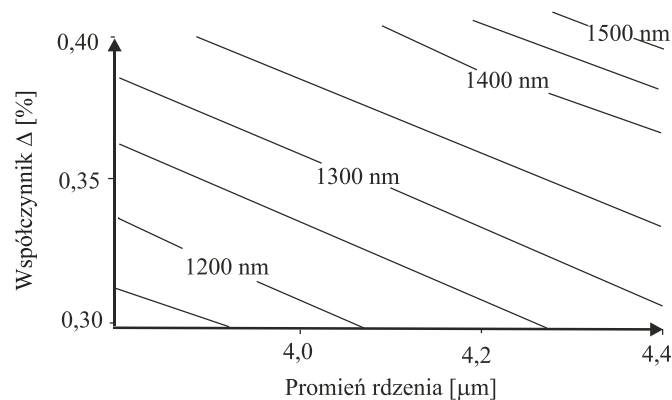
Podstawowe parametry włókien jednomodowych domieszkowanych GeO₂ ze skokowym współczynnikiem załamania wynikają z różnicy we współczynnikach załamania pomiędzy rdzeniem a płaszczem oraz wymiarów promienia rdzenia. Właściwości optyczne włókna, takie jak: długość fali odcięcia, promień pola modu, tłumienność, podatność na makrozgięcia i dyspersja chromatyczna, są definiowane i mogą być dobrze kontrolowane za pomocą tych dwóch parametrów.

Długość fali odcięcia, promień pola modu

Do badania wzajemnych współzależności pomiędzy różnymi własnościami włókna jednomodowego, jak w przypadku MC-SMF, brane są pod uwagę parametry bardziej znaczące użytkowo, tj. długość fali odcięcia i promień pola modu (zamiast różnicy współczynnika załamania i promień rdzenia). Różnica współczynnika załamania i promień rdzenia są zmiennymi niezależnymi, natomiast długość fali odcięcia, jak i promień pola modu są funkcją różnicy współczynnika załamania, promienia rdzenia i długości fali [6, 136].

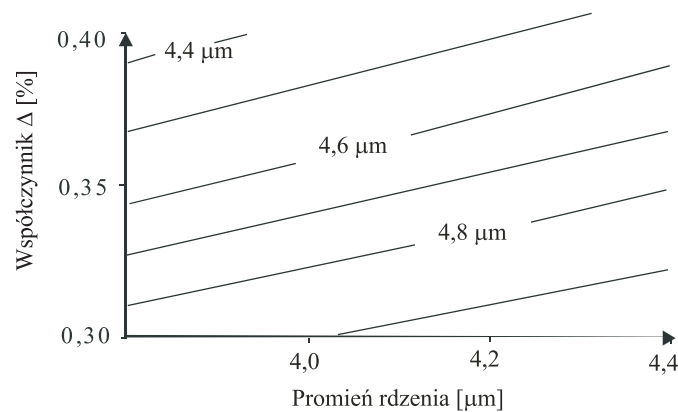
Na rysunku 4.1 przedstawiono teoretyczną zależność długości fali odcięcia od względnej różnicy współczynnika załamania Δ i promienia rdzenia [6], a na rysunku 4.2

teoretyczną zależność promienia pola modu od względnej różnicy współczynnika załamania i promienia rdzenia [5, 136]. Każda kombinacja długości fali odcięcia i promienia pola modu może być uzyskana poprzez zmianę Δ i promienia rdzenia: małe Δ i mały promień rdzenia prowadzą do małej długości fali odcięcia i dają średni do wysokiego promień pola modu. Poprzez kombinację dużego Δ z dużym promieniem rdzenia jest uzyskiwana duża długość fali odcięcia i umiarkowany promień pola modu. Średnia długość fali odcięcia i mały promień pola modu mogą być osiągnięte przez kombinację dużego Δ i małego promienia rdzenia, a średnia długość fali odcięcia i duży promień pola modu są rezultatem małego Δ i dużego promienia rdzenia.



Rys. 4.1. Teoretycznie obliczona długość fali odcięcia jako funkcja promienia rdzenia i względ-

$$\text{nej różnicy współczynnika załamania } \Delta \approx \frac{n_r - n_p}{n_r} \times 100\% \quad [136]$$



Rys. 4.2. Teoretycznie obliczone promienie pola modu dla $\lambda = 1300 \text{ nm}$ jako funkcja promienia

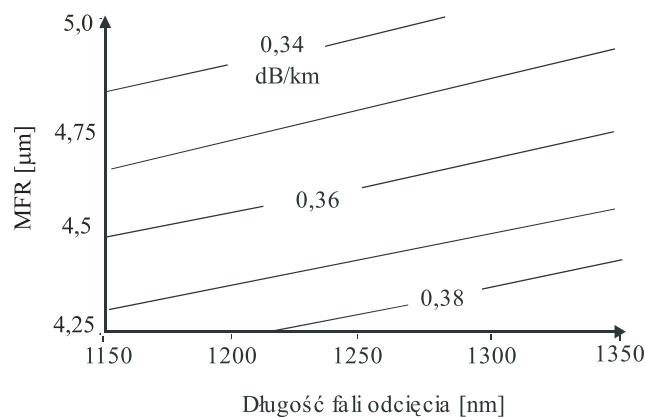
$$\text{rdzenia i względnej różnicy współczynników załamania } \Delta \approx \frac{n_r - n_p}{n_r} \times 100\% \quad [136]$$

W praktyce połączeń zgrzewanych promień pola modu jest bardziej istotnym parametrem niż promień rdzenia, ponieważ zależy od długości fali. Dobre dopasowanie

dwóch promieni pola modu, które oczywiście łatwiej można osiągnąć przy wysokiej wartości promienia pola modu MFR (*Mode Field Radius*), jest ważne do uzyskania niskich strat podczas łączenia dwóch włókien. W odniesieniu do powyższych argumentów, przedmiotem optymalnego projektowania mógłby być duży promień pola modu. Jednakże jest to sprzeczne z możliwością osiągnięcia dobrych właściwości makrozgięciowych.

Tłumienność

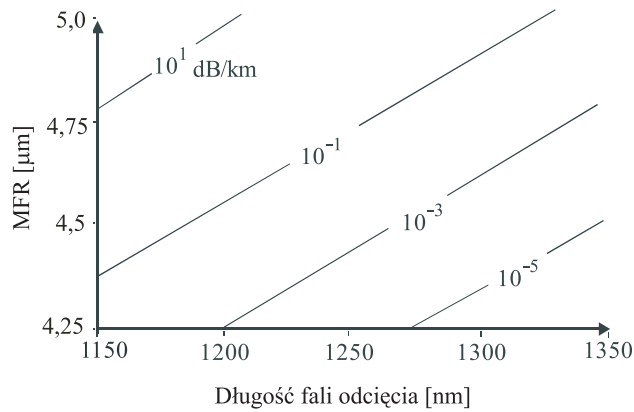
Własności tłumieniowe włókna w zakresie długości fal $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$ zależą głównie od dwóch czynników: poziomu domieszkiowania, który jest przyczyną rozpraszania Rayleigha, i ilości zanieczyszczeń, takich jak jony OH^- . Zwiększenie poziomu domieszkiowania, określone przez wzrost Δ z 0,36% do 0,40% prowadzi do zwiększenia rozpraszania Rayleigha o około 0,02 dB/km [4, 136]. Rysunek 4.3 ilustruje jak rozpraszanie Rayleigha, określone dla $\lambda = 1300 \text{ nm}$, zależy od długości fali odcięcia λ_c i promienia pola modu. Projektowanie włókien MC-SMF, ze względu na domieszkiowanie powodujące straty, ma na celu utrzymanie rozpraszania na tak niskim poziomie, jak to możliwe i w taki sposób, by spełnić wymagania niskiej do średniej wartości λ_c i średniej do dużej wartości promienia pola modu.



Rys. 4.3. Teoretycznie obliczone rozpraszanie Rayleigha dla 1300 nm jako funkcja długości fali odcięcia i promienia pola modu MFR [136]

Podatność na makrozgięcia

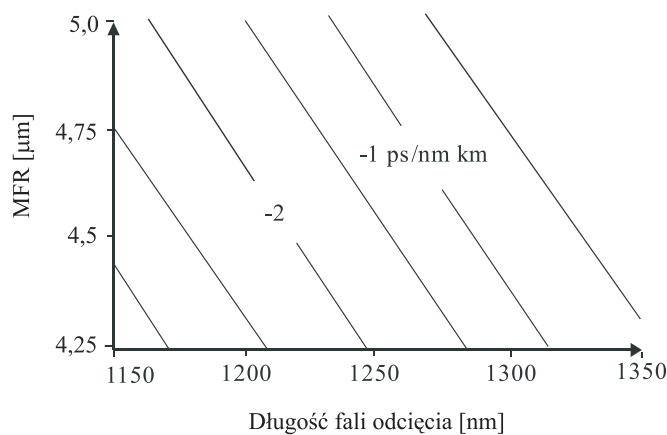
Dodatkowe tłumienie włókna występuje przy zginaniu włókna. Na rysunku 4.4 przedstawiono teoretyczną zależność wzrostu tłumienia spowodowanego makrozgięciem jako funkcję długości fali odcięcia i promienia pola modu [136, 137]. Z rysunku można odczytać, że kombinacja dużej λ_c i małego MFR daje najlepszą odporność na makrozgięcia, podczas gdy włókna z małą długością fali odcięcia i dużym promieniem pola modu wykazują najwyższą wrażliwość na zginanie. Średnia odporność na makrozgięcia będzie obserwowana dla małej λ_c i małego MFR lub dla dużej λ_c i dużego MFR. Duża odporność na makrozgięcia może być realizowana przez kombinację dużej długości fali odcięcia i małego promienia pola modu. Jednak prowadzi to do zwiększenia domieszkiowania powodującego wzrost tłumienności.



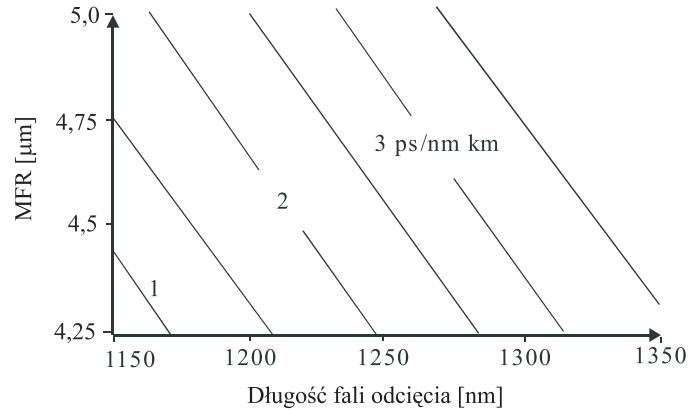
Rys. 4.4. Teoretycznie obliczone straty na makrozgięciach dla $\lambda = 1550$ nm dla średnicy zagięcia 60 mm jako funkcja długości fali odcięcia i promienia pola modu MFR [136]

Dyspersja chromatyczna

Na rysunku 4.5 przedstawiono zależność współczynnika dyspersji od długości fali odcięcia i promienia pola modu, w światłowodzie MC-SMF dla $\lambda = 1285$ nm, natomiast na rysunku 4.6 zaprezentowano tę samą zależność dla $\lambda = 1330$ nm. Można zauważyć sprzeczność pomiędzy wymaganiami dla dyspersji przy 1285 i 1330 nm. Kombinacja małej λ_c i małego MFR prowadzi z jednej strony do dużej (ujemnej) wartości współczynnika dyspersji przy 1285 nm i z drugiej strony do małej wartości współczynnika dyspersji przy 1330 nm. W światłowodach MC-SMF dąży się do utrzymania wartości bezwzględnej współczynnika dyspersji poniżej 3.5 ps/(nm×km) w II oknie transmisyjnym ($1285 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1330 \text{ nm}$). Może to być osiągnięte przez wybór kombinacji średniej długości fali odcięcia i średniego promienia pola modu.



Rys. 4.5. Obliczona teoretycznie dyspersja chromatyczna dla $\lambda = 1285$ nm jako funkcja długości fali odcięcia i promienia pola modu MFR [136]



Rys. 4.6. Obliczona teoretycznie dyspersja chromatyczna dla $\lambda = 1330$ nm jako funkcja długości fali odcięcia i promienia pola modu MFR [136]

Oddzielnym zagadnieniem, wynikającym przede wszystkim z geometrii włókien, jest problem dyspersji polaryzacyjnej omówiony w podrozdziale 7.2.

Z powodu sprzeczności co do wymagań optymalizacyjnych, takich jak mała tłumienność spowodowana domieszkowaniem i dobra odporność na zgięcia, mała dyspersja chromatyczna zarówno przy 1285 nm, jak i przy 1330 nm oraz dobre własności łączeniowe, optymalne parametry włókien MC-SMF osiągane są za pomocą złotego środka, tj. $1170 \text{ nm} \leq \lambda_c \leq 1330 \text{ nm}$ i $4,4 \text{ μm} \leq \text{MFR} \leq 4,9 \text{ μm}$ dla $\lambda = 1330 \text{ nm}$. Włókno takie wykazuje bardzo dobre własności pod względem tłumienności i jednocześnie pierwszorzędne własności zgięciowe. Ponadto osiągnięty zakres promieni pól modowych przyczynia się do bardzo dobrych własności łączeniowych.

Powyższe rozważania przekładają się na optyczne i geometryczne parametry produkowanych jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych MC-SMF z zerem dyspersji w II oknie optycznym (zalecenie G.652 [8]) i skokowym profilem współczynnika załamania wykonane różnymi technologiami – tabela 4.1.

Wartości przedstawione w tabeli są wartościami granicznymi, tzn. są to najniższe i najwyższe wartości podawane przez producentów wytwarzających światłowody daną metodą.

Tabela 4.1. Wybrane parametry jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych MC-SMF [8, 15, 138]

| Parametry | Metody wytwarzania preform | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | MCVD | OVD | VAD |
| Thumienność dla $\lambda = 1310$ nm | $\alpha = 0,33 \div 0,4$ dB/km | $\alpha = 0,33 \div 0,45$ dB/km | $\alpha = 0,35 \div 0,39$ dB/km |
| Thumienność dla $\lambda = 1550$ nm | $\alpha = 0,19 \div 0,25$ dB/km | $\alpha = 0,18 \div 0,25$ dB/km | $\alpha = 0,22 \div 0,25$ dB/km |
| Średnica pola modu $2W$ dla $\lambda = 1310$ nm (II def.* Petermanna) | $\alpha = 8,5 \div 10$ μm | $\alpha = 8,8 \div 9,8$ μm | $\alpha = 8,7 \div 9,9$ μm |
| Średnica pola modu $2W$ dla $\lambda = 1550$ nm (II def.* Petermanna) | $\alpha = 9,5 \div 11,5$ μm | $\alpha = 9,5 \div 11,5$ μm | $\alpha = 9,5 \div 11,5$ μm |
| Długość fali odcięcia | $1150 \text{ nm} < \lambda_c < 1330 \text{ nm}$ | $1170 \text{ nm} < \lambda_c < 1330 \text{ nm}$ | $1150 \text{ nm} < \lambda_c < 1330 \text{ nm}$ |
| Długość fali dla zerowej dyspersji | $1300 \text{ nm} < \lambda_0 < 1322 \text{ nm}$ | $1301 \text{ nm} < \lambda_0 < 1324 \text{ nm}$ | $1300 \text{ nm} < \lambda_0 < 1322 \text{ nm}$ |
| Współczynnik dyspersji chromatycznej | max $3,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla $1280 \div 1330$ nm max $18 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla 1550 nm | max $3,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla $1280 \div 1330$ nm max $18 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla 1550 nm | max $3,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla $1280 \div 1330$ nm max $18 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla 1550 nm |
| Średnica płaszcza | 125 ± 2 μm max 2% | 125 ± 2 μm max 1% | 125 ± 2 μm max 2% |
| Eliptyczność płaszcza | max $0,9 \div 1$ μm | max $0,8 \div 1$ μm | max 1 μm |
| Niecentryczność pola modu | 245 ± 10 μm | 245 ± 10 μm | 245 ± 10 μm |
| Zewnętrzna średnica pokrycia | $\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ | $\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ | $\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ |
| Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej G.652 A | $\leq 0,5$ dB $\leq 0,1$ dB | $\leq 0,5$ dB $0,05 \div 0,1$ dB | $\leq 0,5$ dB $\leq 0,1$ dB |

* Średnica pola modu $2W$ wg tzw. II definicji Petermanna jest określana z kąтового pomiaru rozkładu natężenia wyjściowej wiązki światła ze światłowodu

w dalekim polu [139], otrzymywana jest również z rozkładu natężenia pola modu $E^2(r)$ w bliskim polu: $2W = 2 \int_0^{\infty} r E^2(r) dr$
 $\int_0^{\infty} r [E'(r)]^2 dr$ ^{1/2} [1, 139]. Metody dalekiego

i bliskiego pola są wzajemnie komplementarne poprzez transformatę Henkela [140].

4.2. Włókna DC-SMF

Podstawowe parametry optyczne i geometryczne światłowodów z depresyjnym płaszczem DC-SMF (G.652) o profilu współczynnika załamania typu W – rysunek 1.2, przedstawiono w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Podstawowe parametry światłowodów DC-SMF [8, 15, 138]

| | |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Długość fali odcięcia | $1150 \text{ nm} < \lambda_c < 1330 \text{ nm}$ |
| Długość fali dla zerowej dyspersji | $1300 \text{ nm} < \lambda_0 < 1320 \text{ nm}$ |
| Współczynnik dyspersji chromatycznej | $< 20 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla fal: $1525 \text{ nm} < \lambda < 1575 \text{ nm}$ $< 3,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla fal: $1285 \text{ nm} < \lambda < 1330 \text{ nm}$ |
| Tłumienność jednostkowa | $\alpha < 0,40 \text{ dB/km}$ dla fali 1310 nm $\alpha < 0,25 \text{ dB/km}$ dla fali 1550 nm |
| Średnica pola modu $2W$ (II def. Petermanna) | $8,5 \div 10 \pm 10\% \mu\text{m}$ dla 1310 nm |
| Średnica płaszcz | $125 \pm 2 \mu\text{m}$ |
| Niecentryczność pola modu | $< 1 \mu\text{m}$ |
| Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej | $\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ |

4.3. Włókna DS-SMF i NZDS-SMF z przesuniętym do III okna zerem dyspersji

Podstawowe parametry optyczne i geometryczne światłowodów DS-SMF (G.653) o quasi-trójkątnym profilu współczynnika załamania – przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Podstawowe parametry światłowodów DS-SMF [10, 15, 138]

| | |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Długość fali odcięcia | $1100 \text{ nm} < \lambda_c < 1280 \text{ nm}$ |
| Długość fali dla zerowej dyspersji | $1535 \text{ nm} < \lambda_0 < 1565 \text{ nm}$ |
| Współczynnik dyspersji chromatycznej | $< 2,7 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla fali: $1525 \text{ nm} < \lambda < 1575 \text{ nm}$ $> -25 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ dla fali: $1285 \text{ nm} < \lambda < 1340 \text{ nm}$ |
| Tłumienność jednostkowa | $\alpha < 0,40 \text{ dB/km}$ dla fali 1310 nm $\alpha < 0,25 \text{ dB/km}$ dla fali 1550 nm |
| Średnica pola modu $2W$ (II def. Petermanna) | $7 \div 8,5 \pm 10\% \mu\text{m}$ dla 1310 nm |
| Średnica płaszcz | $125 \pm 2 \mu\text{m}$ |
| Niecentryczność pola modu | $< 1 \mu\text{m}$ |
| Eliptyczność płaszcz | $< 2\%$ |
| Średnica pokrycia | $250 \pm 15 \mu\text{m}$ |

Parametry włókien NZDS-SMF: TrueWave[®] – Lucent Technologies (MCVD) o quasi-trójkątnym profilu współczynnika załamania, SMF-LS[™] i SMF-LEAF[™] firmy Corning (OVD) o profilu współczynnika załamania typu korona – przedstawiono w tabelach 4.4 i 4.5.

Tabela 4.4. Podstawowe parametry włókna TrueWave[®] (MCVD) [14, 18, 138]

| | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Tłumienność α dla 1550 nm | $0,21 \div 0,25$ dB/km |
| Tłumienność α dla 1310 nm | 0,4 dB/km |
| Dyspersja chromatyczna w zakresie niezerowym 1540÷1560 nm | $0,8 \div 4,6 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ |
| Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej max. | $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ |
| Średnica pola modu $2W$ dla 1550 nm (II def. Petermanna) | $8,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$ |
| Długość fali odcięcia we włóknie λ_c | ≤ 1450 nm |
| Typowa średnica rdzenia $2a$ | 6 μm |
| Grupowy współczynnik załamania $n_{g1310 \text{ nm}}$ | 1,471 |
| Grupowy współczynnik załamania $n_{g1550 \text{ nm}}$ | 1,470 |

Tabela 4.5. Podstawowe parametry włókien SMF-LS[™] i SMF-LEAF[™] (OVD) [15]

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Tłumienność α dla 1550 nm | $\leq 0,25$ dB/km |
| Tłumienność α dla 1310 nm | 0,38 dB/km |
| Dyspersja chromatyczna w zakresie niezerowym 1530 ÷ 1560 nm SMF-LS [™] | $-0,1 \div -3,5 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ |
| Dyspersja chromatyczna w zakresie niezerowym 1530 ÷ 1560 nm SMF-LEAF [™] | $0,8 \div 6 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ |
| Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej | $\leq 0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ |
| Średnica pola modu $2W$ dla 1550 nm SMF-LS [™] | $8,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$ |
| Średnica pola modu $2W$ dla 1550 nm SMF-LEAF [™] (II def. Petermanna) | $9,0 \div 10 \mu\text{m}$ |
| Powierzchnia efektywna A_{eff} SMF-LS [™] | 55 μm^2 |
| Powierzchnia efektywna A_{eff} SMF-LEAF [™] | 72 μm^2 |
| Długość fali odcięcia w kablu λ_{cc} | ≤ 1260 nm |
| Grupowy współczynnik załamania $n_{g1310 \text{ nm}}$ | 1,471 |
| Grupowy współczynnik załamania $n_{g1550 \text{ nm}}$ | 1,470 |

4.4. Pomiary profili współczynników załamania i wymiarów geometrycznych

Istotną rolę w procesie optymalizacji termicznego łączenia (zgrzewania) ma znajomość profili współczynnika załamania oraz wymiary geometryczne włókien. Niecentryczność, niesymetryczność profili czy zmiany w wymiarach geometrycznych włókien uniemożliwiają prawidłową optymalizację termicznego łączenia, w której niezbędne jest założenie powtarzalności parametrów włókien.

Pomiary profili współczynnika załamania oraz wymiarów geometrycznych włókien autor przeprowadził za pomocą miernika firmy Photon Kinetics Model 2400. Przy-

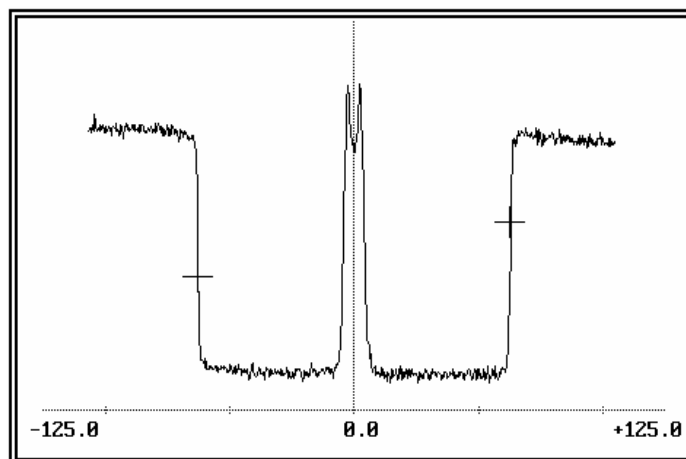
rzęd ten pozwala na pomiary powyższych cech włókien metodą analizy skali szarości w jasnym polu oraz metodą pola bliskiego z zastosowaniem mikroskopowego systemu video, z kamerą CCD o dużej rozdzielczości i komputerowym systemem obróbki obrazów.

Metody te umożliwiają określenie profilu współczynnika załamania w światłowodzie $n(r)$ oraz parametrów geometrycznych: średnicy rdzenia $2a^r$, średnicy płaszczka $2a^p$, niecentryczności rdzenia względem płaszczka η , eliptyczności rdzenia e^r , eliptyczności płaszczka e^p oraz wymiarów pokrycia pierwotnego. Parametry te definiuje się następująco [141]: $e^r = [(2a_{\max}^r - 2a_{\min}^r)/2a^r]100\%$, $e^p = [(2a_{\max}^p - 2a_{\min}^p)/2a^p]100\%$, $\eta = (x/2a^r)100\%$ lub samo przesunięcie x . Dokładność pomiarów wynosiła: średnica rdzenia $\leq 0,05 \mu\text{m}$, średnica płaszczka $\leq 0,05 \mu\text{m}$, niecentryczność rdzenia względem płaszczka $\leq 0,04 \mu\text{m}$, eliptyczność rdzenia $\leq 1,0\%$, eliptyczność płaszczka $\leq 0,1\%$. Długość fali pomiarowej wynosiła: dla rdzenia $850 \pm 25 \text{ nm}$, dla płaszczka $620 \pm 25 \text{ nm}$.

Na poniższych rysunkach (4.7÷4.14) oraz w tabelach (4.6÷4.13) przedstawiono wybrane wyniki pomiarów profili refrakcyjnych i wymiarów geometrycznych.

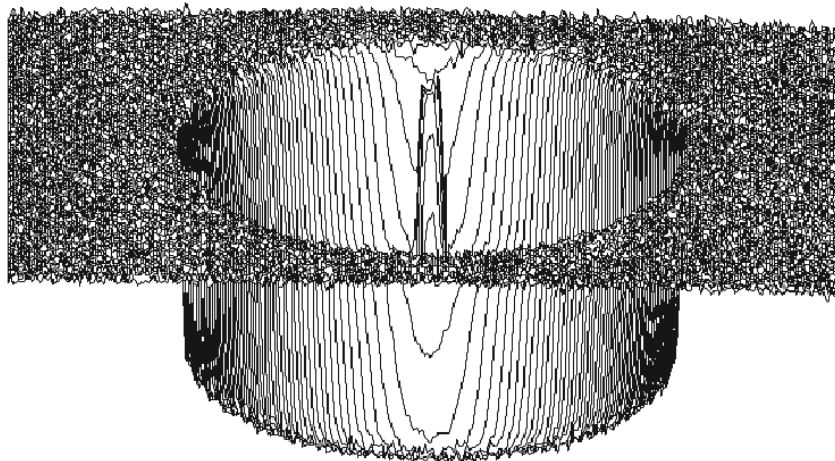
Światłowód MC-SMF 1528 jest teoretycznie włóknem o skokowym profilu współczynnika załamania. W rzeczywistości mamy do czynienia ze światłowodem o ciągłym, dość skomplikowanym profilu współczynnika załamania, wynikającym z procesów dyfuzji zachodzących podczas wyciągania włókien – rysunek 4.7. Włókna światłowodowe wykonane technologiami OVD i MCVD charakteryzują się sinusoidalnymi fluktuacjami współczynnika załamania w kierunku radialnym – rysunek 4.7, natomiast włókna wykonane technologią VAD cechują się dodatkowo sinusoidalnymi fluktuacjami wzdłużnymi [141].

- Pomiary światłowodu MC-SMF 1528 – Siecor (OVD)



Rys. 4.7a. Profil współczynnika załamania w światłowodzie MC-SMF 1528 – Siecor (OVD) [wyniki własne]

Intensity Plot 14:41:56
 Numer szpuli :8
 Numer partii :SIECOR SM

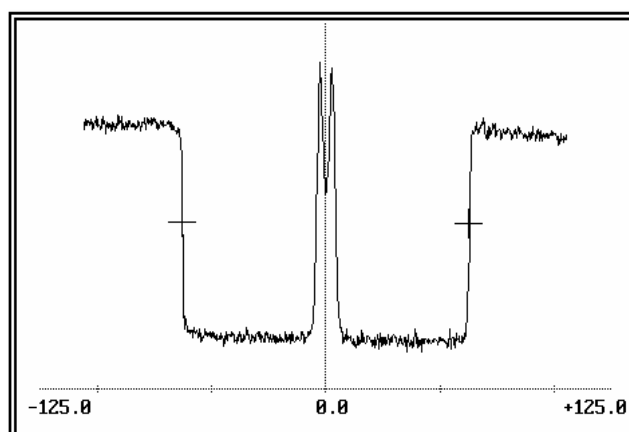


Rys. 4.7b. Przestrzenny obraz profilu współczynnika załamania w światłowodzie MC-SMF 1528 – Siecor (OVD) [wyniki własne]

Tabela 4.6. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu MC-SMF 1528 – Siecor (OVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 8,29 | 1,38 |
| Płaszcz | 124,94 | 0,06 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszczu $x = 0,19 \mu\text{m}$ | | |

- Pomiaru światłowodu MC-SMF – Fujikura (VAD)

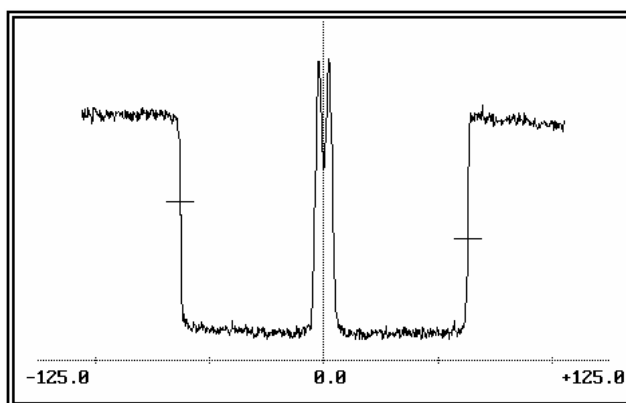


Rys. 4.8. Profil współczynnika załamania w światłowodzie MC-SMF – Fujikura (VAD) [wyniki własne]

Tabela 4.7. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu MC-SMF – Fujikura (VAD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 8,52 | 0,36 |
| Płaszcz | 125,31 | 0,02 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszczu $x = 0,21 \mu\text{m}$ | | |

- Pomiar światłowodu MC-SMF – Lycom (MCVD)

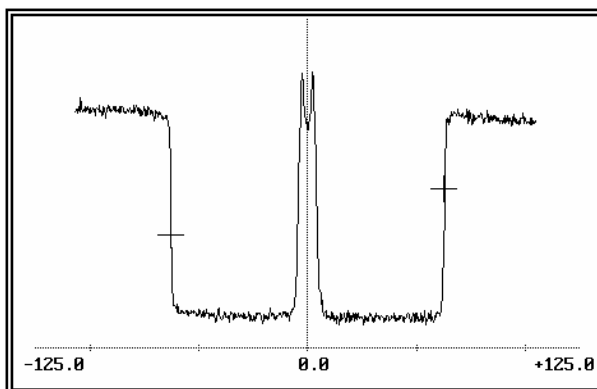


Rys. 4.9. Profil współczynnika załamania w światłowodzie MC-SMF – Lycom (MCVD) [wyniki własne]

Tabela 4.8. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu MC-SMF – Lycom (VAD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 9,18 | 2,05 |
| Płaszcz | 125,01 | 0,27 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszczu = $0,05 \mu\text{m}$ | | |

- Pomiar światłowodu DC-SMF (depresyjny płaszcz) – Lycom (MCVD)

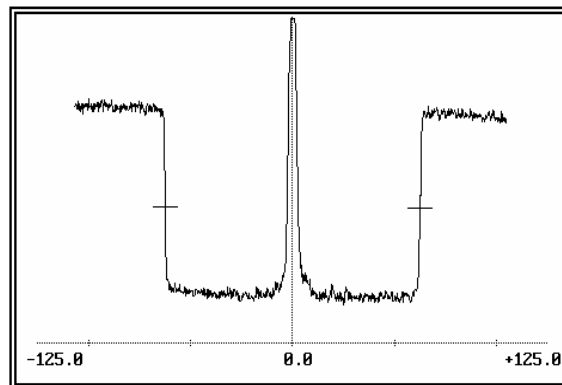


Rys. 4.10. Profil współczynnika załamania w światłowodzie DC-SMF – Lycom (MCVD) [wyniki własne]

Tabela 4.9. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu DC-SMF – Lycom (MCVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 9,17 | 5,99 |
| Płaszcz | 125,20 | 0,07 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszcza = 0,07 μm | | |

- Pomiar światłowodu DS-SMF – Lycom (MCVD) z trójkątnym profilem współczynnika załamania



Rys. 4.11. Profil współczynnika załamania w światłowodzie DS-SMF – Lycom (MCVD) [wyniki własne]

Tabela 4.10. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu DS-SMF – Lycom (MCVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 5,56 | 3,45 |
| Płaszcz | 124,42 | 0,43 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszcza = 0,09 μm | | |

- Pomiar światłowodu NZDS SMF typu TrueWave[®] – Lucent Technologies (MCVD) z trójkątnym profilem współczynnika załamania

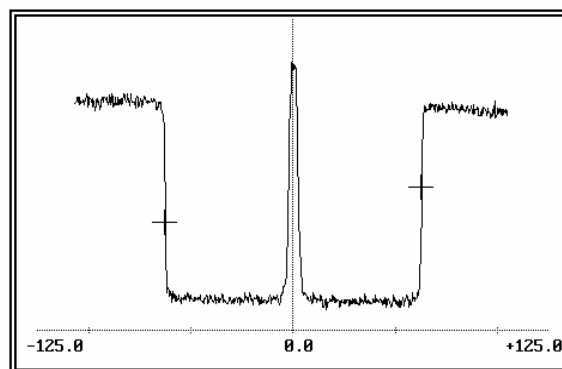
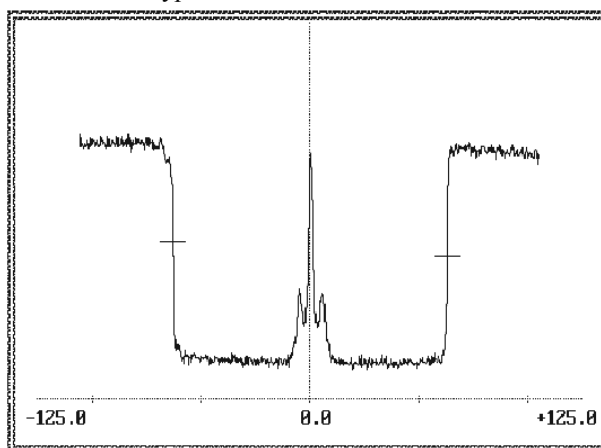
Rys. 4.12. Profil współczynnika załamania w światłowodzie NZDS SMF typu TrueWave[®] – Lucent Technologies (MCVD) [wyniki własne]

Tabela 4.11. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu NZDS SMF typu TrueWave[®] – Lucent Technologies (MCVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 5,62 | 3,30 |
| Płaszcz | 125,03 | 0,35 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszczu = 0,07 μm | | |

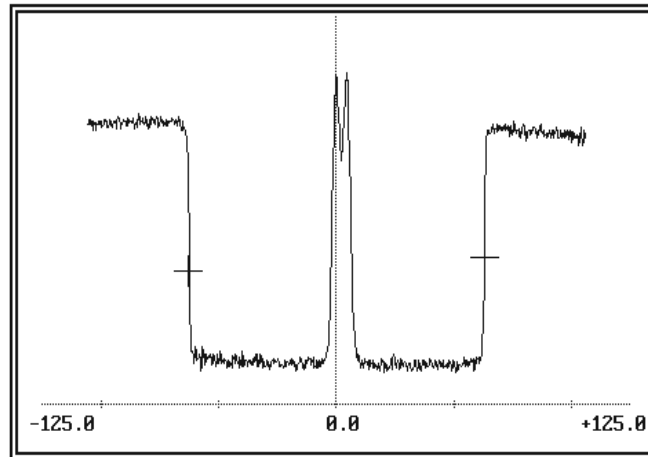
- Pomiary światłowodu NZDS SMF typu LEAF[™] – Corning (OVD) z profilem współczynnika załamania typu korona

Rys. 4.13. Profil współczynnika załamania w światłowodzie NZDS SMF typu SMF-LEAF[™] – Corning (OVD) [wyniki własne]Tabela 4.12. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu NZDS SMF typu LEAF[™] – Corning (OVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica 2a [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 3,30 | 3,61 |
| Płaszcz | 125,07 | 0,46 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszczu = 0,66 μm | | |

W powyższym przypadku średnicę określono tylko dla środkowej części rdzenia.

Znakomita większość włókien spełnia wymagania dotyczące wymiarów geometrycznych. Zdarzają się jednak przypadki istotnych odchyłeń od norm [8] – rysunek 4.14. Na rysunku 4.14 oraz w tabeli 4.13 przedstawiono wyniki pomiarów profilu współczynnika załamania i wymiarów geometrycznych włókna nie spełniającego wymagań [8].



Rys. 4.14. Profil współczynnika załamania w światłowodzie MC-SMF (OVD) [wyniki własne]

Tabela 4.13. Wyniki pomiarów geometrii światłowodu MC-SMF – (OVD) [wyniki własne]

| Warstwa | Średnica $2a$ [μm] | Eliptyczność [%] |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Rdzeń | 8,29 | 1,90 |
| Płaszcz | 124,94 | 0,12 |
| niecentryczność rdzenia względem płaszcza = 2,08 μm | | |

Przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków łączenia światłowodów takich jak na rysunku 4.14 (przesunięcie $d = 2x$) i o średnicach pola modu $2W = 9 \mu\text{m}$ (dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$), tłumienie spoiny wynikające tylko z niecentryczności rdzenia (5.1) wynosi aż 0,87 dB.

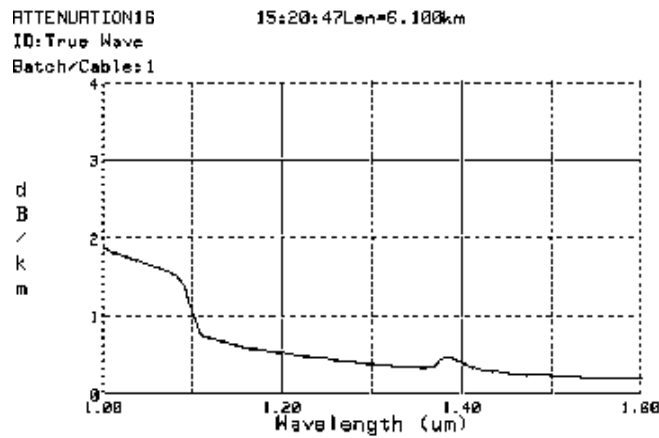
4.5. Pomiary tłumienności, średnicy pola modu, długości fali odcięcia i dyspersji chromatycznej

W celu weryfikacji udostępnianych parametrów autor wykonał szereg pomiarów tłumienności, średnicy pola modu, długości fali odcięcia i dyspersji chromatycznej włókien użytych do badań termicznego łączenia. Do badań użyto systemu pomiarowego firmy Photon Kinetics Model 2500 oraz firmy EG&G Model CD300 w przypadku pomiarów dyspersji chromatycznej. Systemy te zapewniają pomiary metodami zalecanymi przez ITU-T [6].

Spektralną zależność tłumienności mierzono transmisyjną metodą odcinania, długość fali odcięcia – metodą pomiaru zależności spektralnej mocy transmitowanej we włóknie, średnicę pola modu otrzymywano poprzez pomiar rozkładu pola dalekiego metodą zmiennej apertury, a dyspersję chromatyczną poprzez pomiar opóźnień faz impulsów optycznych o różnych długościach fal.

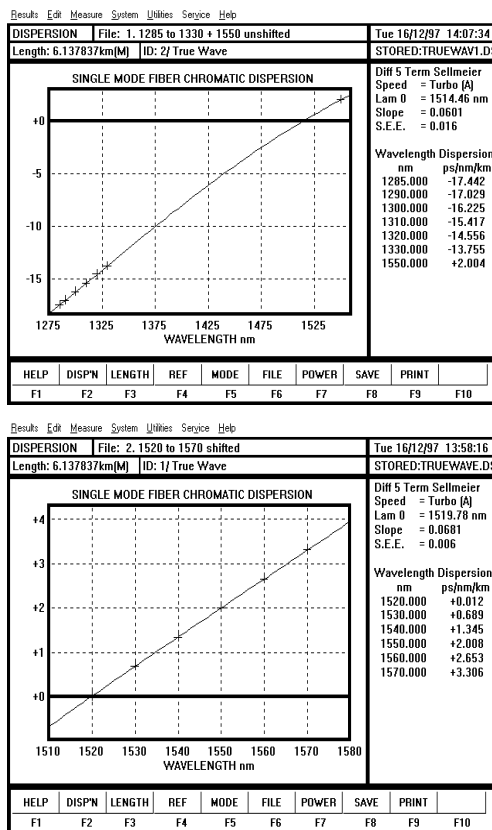
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki pomiarów dla włókna NZDS SMF typu TrueWave[®].

Tłumienność spektralna – rysunek 4.15.



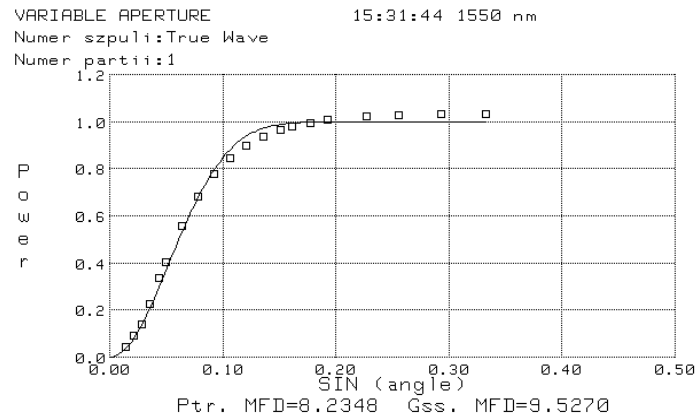
Rys. 4.15. Spektralna zależność tłumienności światłowodu TrueWave®: $\alpha_{1310} = 0,375$ dB/km, $\alpha_{1550} = 0,213$ dB/km (pomiar metodą odcinania, rozdzielczość ± 3 nm) [wyniki własne]

Dyspersja chromatyczna – rysunek 4.16.



Rys. 4.16. Dyspersja chromatyczna światłowodu TrueWave® (metoda pomiaru różnicy faz impulsów o różnych λ – podrozdział 7.1) [wyniki własne]

Średnica pola modu $2W$ – Petermann II – rysunek 4.17, tabela 4.14.



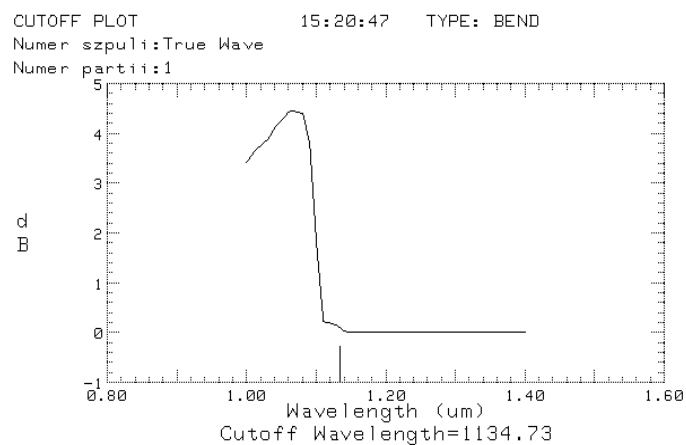
Rys. 4.17. Średnica pola modu $2W$ światłowodu TrueWave® dla $\lambda = 1550$ nm (pomiar rozkładu pola dalekiego metodą zmiennej apertury – dokładność $>1\%$) [wyniki własne]

Tabela 4.14. Wyniki pomiarów średnicy $2W$ pola modu – Petermann II – dla światłowodu TrueWave® [wyniki własne]

| λ [nm] | $2W$ [μm] |
|----------------|------------------------|
| 1200 | 6,0961 |
| 1300 | 6,6415 |
| 1500 | 7,8813 |
| 1550 | 8,2348 |
| 1600 | 8,6193 |

Apertura numeryczna (obliczona) $NA = 0,154$

Długość fali odcięcia we włóknie $\lambda_c = 1134,73 \mu\text{m}$ – rysunek 4.18.



Rys. 4.18. Długość fali odcięcia w światłowodzie TrueWave® [wyniki własne]

Wyniki pomiarów w większości przypadków potwierdzają, że wymagane parametry dla poszczególnych typów badanych włókien, w granicach dokładności zalecanych przez ITU-T [8, 10, 14], były zachowane. Światłowody nie spełniające wymagań telekomunikacyjnych, a także kryteriów poprawnego centrowania łączonych włókien nie zostały użyte do badań termicznego łączenia.

5. Reflektometryczne pomiary włókien i spoin – analiza, możliwości interpretacyjne

Optyczne pomiary reflektometryczne w dziedzinie czasu, których teoretyczne podstawy i fundamentalne możliwości interpretacyjne jako pierwsi przedstawili w 1976 roku Bornoski i Jensen [142], są obecnie powszechnie stosowane w technice światłowodowej.

Optyczny reflektometr w dziedzinie czasu, w skrócie OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), działa na zasadzie wysyłania w łącze światłowodowe (wielomodowe lub jednomodowe) wielu krótkich impulsów optycznych i rejestrowaniu natężenia światła powracającego ze światłowodu w postaci „echa optycznego” [143], czyli mocy rozpraszanej wstecznie (rozpraszanie Rayleigha [144]) i odbitej w światłowodzie. Obserwacja rozpraszania wstecznego w funkcji czasu jest równoważna obserwacji w funkcji odległości od miejsca pomiaru. Czas od wysłania impulsu do powrotu wynika z dwukrotnego przejścia światła przez mierzony światłowód.

Otrzymane z pomiarów sygnały reflektometryczne umożliwiają określenie tłumienia, tłumienności i długości włókien, strat mocy optycznej wnoszonych przez spoiny i złącza, poziomu mocy odbitej od złącza czy końca włókna, mikro- i makrozgięć oraz ich wpływu na właściwości transmisyjne traktu, lokalizację innych zdarzeń zmieniających poziom mocy odbitej lub rozpraszanej wstecznie.

Zaletą pomiarów reflektometrycznych jest możliwość ich wykonywania z jednej strony światłowodu. Jednak jednokierunkowy reflektometryczny pomiar tłumienia spoiny nie odzwierciedla rzeczywistej wartości straty połączenia, ponieważ wnosi pozorne straty (zyski). Straty te wynikają z możliwości zmian parametrów rozpraszania wstecznego przed i za spoiną. Do dokładnego określenia tłumienia spoiny z wykorzystaniem reflektometru niezbędne są pomiary uzyskane z dwóch kierunków włókna. Uśrednienie obu wyników pozwala na wyeliminowanie różnic kierunkowych i daje poprawne wartości tłumienia spoiny.

Możliwości interpretacyjne pomiarów reflektometrycznych dla charakteryzacji termicznie łączonych traktów światłowodowych, szczególnie dotyczy to jednokierunkowych pomiarów spoin, są niedoceniane i niewykorzystywane w pełni [72, 81].

Zdaniem autora, w tym rozdziale pracy zaprezentowano takie nowe możliwości interpretacyjne, które pełniej charakteryzują termicznie łączone trakty światłowodowe i są przydatne w określaniu procesu optymalizacji spoin – co zostanie omówione w rozdziale 6.

5.1. Reflektometryczne pomiary strat termicznych połączeń światłowodów

Zgodnie z analizą przeprowadzoną w rozdziale trzecim, jeżeli łączy się centrycznie – bez obszaru przejściowego TRD – dwa światłowody o promieniach wiązek gaussowskich W_1 i W_2 , to współczynnik sprzężenia wyraża się wzorem (3.53). Przy łączeniu światłowodów, których osie są przesunięte o wielkość d , współczynnik sprzężenia określa wyrażenie (3.54).

Straty połączenia, wynikające z (3.54), wynoszą [dB]:

$$A_\alpha = 20 \log \left(\frac{W_1^2 + W_2^2}{2W_1W_2} \right) + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.1)$$

przy $W_1 = W_2$ oraz $d = 0$ strata łączenia równa się zeru.

Ze wzoru (5.1) wynika również, że wraz ze wzrostem pól modowych łączonych światłowodów, przy określonym d , zmniejsza się strata wynikająca z łączenia.

Przy różnych polach modu centrycznie łączonych światłowodów ($d = 0$), co w praktyce występuje najczęściej, strata wynosi:

$$A_\alpha = -10 \log \eta = 20 \log \left(\frac{W_1^2 + W_2^2}{2W_1W_2} \right) = 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \quad (5.2)$$

Moc rozproszenia wstecznego wykrywana przez reflektometr z punktu trasy bezpośrednio przed spoiną (lub złączem charakteryzującym się zerową przerwą między światłowodami i zerową stratą odbiciową) wynosi [142, 145]:

$$P_1 = P_0 S_1 \exp(-2\alpha_1 L_1) \quad (5.3)$$

gdzie:

- P_0 – moc impulsu optycznego na wejściu światłowodu,
- L_1 – długość światłowodu wejściowego – do spoiny [km],
- α_1 – tłumienność światłowodu [1/km],
- S_1 – współczynnik rozproszenia wstecznego światłowodu wejściowego.

Współczynnik rozproszenia wstecznego S definiuje się jako [144]:

$$S = \frac{\frac{3}{2}(NA)^2}{\left(\frac{W}{a}\right)^2 V^2 n_r^2} \quad (5.4)$$

gdzie:

- NA – apertura numeryczna,
- W – promień pola modu,
- a – promień rdzenia,
- V – częstotliwość znormalizowana,
- n_r – współczynnik załamania w rdzeniu.

Zgodnie z [1, 96, 103] częstotliwość znormalizowana:

$$V = kan_r \sqrt{2\Delta} = kaNA \quad (5.5)$$

gdzie:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda - \text{długość fali}, \Delta = \frac{n_r^2 - n_p^2}{2n_r^2}.$$

Wstawiając (5.5) do (5.4) otrzymuje się (indeks 1 oznacza światłowód wejściowy – przed spoiną):

$$S_1 = 0,038 \left(\frac{\lambda}{n_1 W_1} \right)^2 \quad (5.6)$$

gdzie:

- λ – długość fali, na której przeprowadzany jest pomiar,
- n_1 – współczynnik załamania w rdzeniu światłowodu wejściowego,
- W_1 – promień pola modu światłowodu wejściowego.

Moc rozpraszania wstecznego wykrywana przez OTDR z punktu bezpośrednio za spoiną wynosi [145]:

$$P_2 = P_0 S_2 \eta_{12} \eta_{21} \exp(-2\alpha_1 L_1) \quad (5.7)$$

gdzie:

- η_{12} i η_{21} – współczynniki sprzężenia mocy optycznej od włókna 1 do 2 i od włókna 2 do 1:

$$\eta_{12} = \eta_{21} = \left(\frac{2W_1 W_2}{W_1^2 + W_2^2} \right)^2 \exp\left(-\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.8)$$

S_2 – współczynnik rozproszenia wstecznego światłowodu za spoiną (wyjściowego):

$$S_2 = 0,038 \left(\frac{\lambda}{n_2 W_2} \right)^2 \quad (5.9)$$

Mierzone przez reflektometr jednokierunkowe A_{12} tłumienie spoiny z włókna 1 do 2 wynosi:

$$2A_{12} = -10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (5.10)$$

Zatem korzystając z równań (5.3), (5.7) i (5.8), otrzymuje się:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_1 W_1}{n_2 W_2} \right)^2 \eta_{12} \eta_{21} \quad (5.11)$$

$$2A_{12} = -10 \log \frac{P_2}{P_1} = 20 \log \frac{n_2}{n_1} + 20 \log \frac{W_2}{W_1} + 40 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 20 \log \left[\exp \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \right] \quad (5.12)$$

Ostatecznie jednokierunkowe tłumienie spoiny z kierunku 1 \rightarrow 2 mierzone przez reflektometr wynosi:

$$A_{12} = 10 \log \frac{n_2}{n_1} + 10 \log \frac{W_2}{W_1} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.13)$$

i analogicznie jednokierunkowe tłumienie spoiny z kierunku 2 \rightarrow 1 mierzone przez reflektometr wynosi:

$$A_{21} = 10 \log \frac{n_1}{n_2} + 10 \log \frac{W_1}{W_2} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.14)$$

Tłumienie spoiny jest średnią arytmetyczną (5.13) i (5.14) i jest zgodne z (5.1):

$$A_S = \frac{A_{12} + A_{21}}{2} = 20 \log \left(\frac{W_1^2 + W_2^2}{2W_1W_2} \right) + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.15)$$

5.1.1. Jednokierunkowe tłumienie spoin

Wyrażenia (5.13) i (5.14) określają jednokierunkowe tłumienie połączenia. Pierwszy i drugi składnik w wyrażeniach (5.13) i (5.14) wynikają z zasady pomiaru (rozpraszanie wsteczne) i mogą przyjmować wartości dodatnie lub ujemne przy łączeniu włókien o różnych n i W . Trzeci i czwarty składnik we wzorach (5.13) i (5.14) wyrażają sprzężenie optyczne pomiędzy łączonymi światłowodami i są zawsze dodatnie.

Przy założeniu centrycznego łączenia światłowodów różnych typów, tj. dla $d = 0$ oraz $W_1 \neq W_2$ i $n_1 \neq n_2$, jeden z pomiarów reflektometrycznych jest zawsze ujemny, ponieważ jeżeli $W_1 \neq W_2$ i np. $W_1 > W_2$ oraz $n_1 \neq n_2$ i np. $n_1 > n_2$ to zawsze:

$$10 \log \frac{W_1}{W_2} > 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] - \text{przypadek zawsze dodatniego } A_{21} \quad (5.16)$$

i

$$\left| 10 \log \frac{W_2}{W_1} \right| > 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] - \text{przypadek zawsze ujemnego } A_{12} \quad (5.17)$$

Składniki $10 \log \frac{n_1}{n_2}$ – dodatni i $10 \log \frac{n_2}{n_1}$ – ujemny, mimo że dodatkowo zwięk-

szają dodatnią wartość A_{21} i ujemną wartość A_{12} odpowiednio, to ich wartości można pominąć. Na przykład przy łączeniu światłowodów o istotnie różnych aperturach numerycznych: $NA_1 = 0,16$ (DS-SMF) i $NA_2 = 0,12$ (MC-SMF) ich współczynniki załamania w rdzeniach (przy domieszkowaniu GeO_2) dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ – liczone ze wzoru Sellmeiera [1] – wynoszą odpowiednio $n_1 = 1,4557$ i $n_2 = 1,4515$. Zatem wartości składników: $10 \log \frac{n_1}{n_2} = 0,0125 \text{ dB}$ i $10 \log \frac{n_2}{n_1} = -0,0125 \text{ dB}$ praktycznie nie mają

wpływu na jednokierunkowe tłumienia A_{12} i A_{21} i można je w analizie pominąć. Wartości tych składników są jeszcze mniejsze dla optymalizowanych połączeń zgrzewanych, gdyż podczas dyfuzji dochodzi do wyrównania koncentracji domieszek rdzeniowych, a zatem $n_1 \approx n_2$, co skutkuje również brakiem odbić w takich połączeniach.

5.1.2. Zależność tłumienia spoin od długości fali pomiarowej

Analizując wyrażenia (5.13), (5.14) i (5.15), pomijając składniki $10 \log \frac{n_1}{n_2}$

i $10 \log \frac{n_2}{n_1}$, można wyróżnić niżej przedstawione przypadki łączenia:

I. Łączenie centryczne, tj. $d = 0$, gdzie:

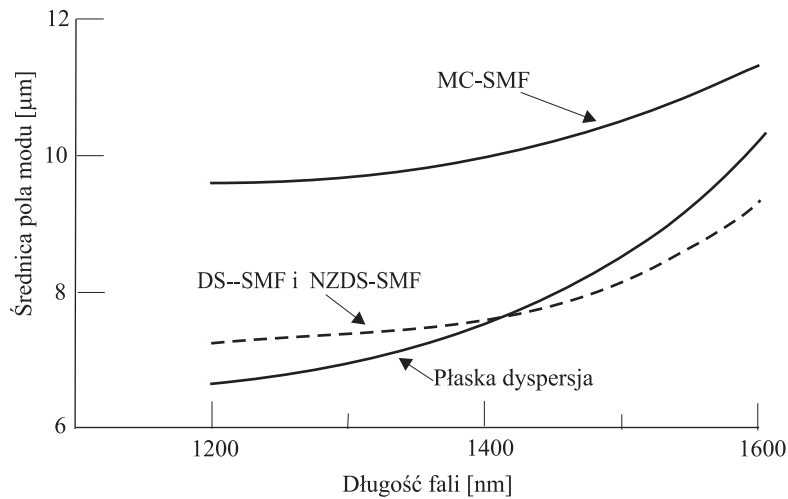
1. $W_1 = W_2$,
2. $W_1 \neq W_2$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ maleje wraz ze wzrostem długości fali λ ,
3. $W_1 \neq W_2$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ rośnie wraz ze wzrostem długości fali λ ,
4. $W_1 \neq W_2$ i $\frac{W_1}{W_2}$ nie zmienia się z długością fali λ .

II. Łączenie z przesunięciem osi, tj. $d \neq 0$, gdzie:

1. $W_1 = W_2$,
2. $W_1 \neq W_2$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ maleje wraz ze wzrostem długości fali λ ,
3. $W_1 \neq W_2$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ rośnie wraz ze wzrostem długości fali λ ,

4. $W_1 \neq W_2$ i $\frac{W_1}{W_2}$ nie zmienia się z długością fali λ .

Wyżej przedstawionym przypadkom można przyporządkować odpowiednie typy łączonych światłowodów. Teoretycznie przypadki **I.1** i **II.1** dotyczą łączenia tych samych typów włókien. Przypadki **I.2** i **II.2** dotyczą łączenia światłowodów standardowych G.652 MC-SMF (*Matched Cladding Single Mode Fiber*) ze światłowodami z przesuniętą dyspersją G.653 DS-SMF (*Dispersion Shifted Single Mode Fiber*) i niezerową dyspersją G.655 NZDS-SMF (*Non-Zero Dispersion Shifted Single Mode Fiber*), gdyż w tych przypadkach stosunek promieni pól modowych maleje wraz ze wzrostem długości fali – rysunek 5.1 [146, 147].



Rys. 5.1. Zależność średnicy pól modowych od długości fali dla światłowodów SMF, NZDS-SMF (DS-SMF) i z płaską charakterystyką dyspersyjną

Przypadki **I.3** i **II.3** dotyczą łączenia światłowodów ze skokowym i W-podobnym profilami współczynników załamania – rysunki 1.1 i 1.2, tj. dwóch typów światłowodów standardowych G.652: MC-SMF (*Matched Cladding Single Mode Fiber*) i DC-SMF (*Depressed Cladding Single Mode Fiber*), gdyż w tym przypadku stosunek promieni pól modowych rośnie wraz ze wzrostem długości fali. Można to określić w sposób zaprezentowany poniżej.

Zakres wartości częstotliwości znormalizowanej V modu podstawowego leży w granicach $0 < V < 2,405$; V definiuje się [148]:

$$V = \pi \frac{2a}{\lambda} NA \quad (5.18)$$

Funkcja Gaussa opisuje dokładnie rozkład mocy modu podstawowego dla parabolicznego rozkładu współczynnika załamania, natomiast dla skokowego profilu współczynnika załamania jest przybliżoną funkcją opisu. Dla $1,8 < V < 2,405$ aproksymacja rozkładu pola modu (dla skokowego profilu współczynnika załamania) funkcją Gaussa

daje dobrą zgodność i promień pola modu można obliczyć z przybliżonego wzoru z dokładnością 1% [148]:

$$W \approx \frac{2,6a}{V} = \frac{2,6\lambda}{2\pi NA} \quad (5.19)$$

gdzie:

- a – promień rdzenia,
- λ – długość fali,
- $NA = \sqrt{n_r^2 - n_p^2}$ – apertura numeryczna, n_r i n_p współczynniki załamania odpowiednio w rdzeniu i płaszczu.

Licząc $NA(\lambda) = \sqrt{n_r^2(\lambda) - n_p^2(\lambda)}$, można następnie znaleźć $W(\lambda)$ i stwierdzić,

jak zmienia się iloraz $\frac{W_1(\lambda)}{W_2(\lambda)}$ dla światłowodów MC-SMF i DC-SMF.

Dla światłowodu MC-SMF przyjęto, że rdzeń jest domieszkowany 3.1at% GeO₂, a płaszcz stanowi czysty SiO₂.

Dla światłowodu DC-SMF przyjęto, że rdzeń jest domieszkowany 3.1at% GeO₂, a obniżona część płaszczu jest domieszkowana 1at% F.

Wartości współczynników załamania n_r i n_p dla różnych λ liczono, wykorzystując wzór Sellmeiera [1]:

$$n^2 = 1 + \sum_1^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \quad (5.20)$$

gdzie:

- a_i i b_i (w mikrometrach) – stałe wyznaczone eksperymentalnie dla różnych domieszek i poziomów domieszkowania.

Otrzymane wyniki dla $\lambda = 1310$ nm i $\lambda = 1550$ nm (klasyczne długości pomiarowe) przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Obliczone wartości NA_1 , NA_2 , $2W_1$, $2W_2$ oraz W_1/W_2 dla światłowodów MC-SMF i DC-SMF

| Długość fali | MC-SMF | | DC-SMF | | W_1/W_2 |
|--------------|--------|-------------|--------|-------------|-----------|
| | NA_1 | $2W_1$ [μm] | NA_2 | $2W_2$ [μm] | |
| 1310 nm | 0,1245 | 8,6281 | 0,1648 | 6,5170 | 1,3239 |
| 1550 nm | 0,1167 | 10,8912 | 0,1639 | 7,7557 | 1,4043 |

Iloraz promieni pól modowych W_1/W_2 światłowodów MC-SMF i DC-SMF rośnie wraz ze wzrostem długości fali.

Należy również zauważyć, że wraz ze wzrostem długości fali, tj. wzrostem pola modu tłumienie wynikające tylko z niecentryczności połączenia – przypadek **II.1** – maleje i oczywiście jest zawsze dodatnie niezależnie od kierunku pomiaru.

Przypadki **I.4** i **II.4** dotyczą łączenia światłowodów tych samych typów, lecz różniących się promieniami pól modowych w ramach dopuszczalnego rozkładu wartości MFR (*Mode Field Radius*).

5.1.3. Pomiary reflektometryczne spoin – analiza teoretyczna i wyniki eksperymentów

I. Łączenie centryczne $d = 0$

1. $W_1 = W_2$, $d = 0$

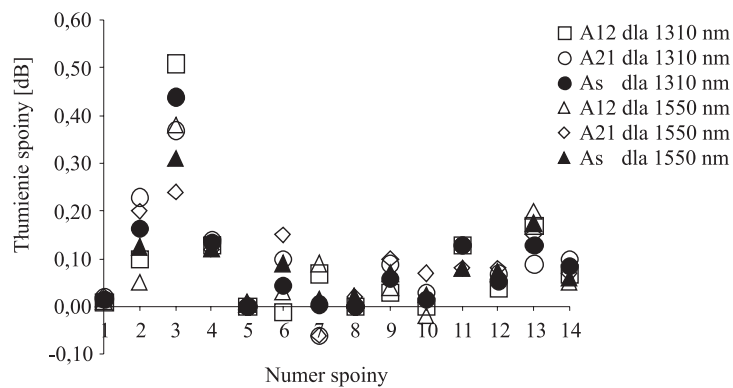
W wyrażeniach (5.13) i (5.14) pomija się składnik pierwszy (wpływ nieistotny) i czwarty ($d = 0$):

$$A_{12} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \quad (5.21)$$

$$A_{21} = 10 \log \frac{W_1}{W_2} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \quad (5.22)$$

Jeżeli $W_1 = W_2$, to $A_{12} = A_{21} = A_s = 0$ i oczywiście nie zależą od długości fali.

W praktyce trudno znaleźć idealne odniesienie do takiego przypadku. Najczęściej przy połączeniach teoretycznie identycznych włókien $|A_{12}^{(-)}|_{1310 \text{ nm}} > |A_{12}^{(-)}|_{1550 \text{ nm}}$ i $A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} > A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$, lecz różnią się bardzo mało i $A_s \approx 0$ oraz najczęściej $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$ – rysunek 5.2, tutaj spoina nr 3 odbiega od normy i jest przykładem dużej niecentryczności połączenia.

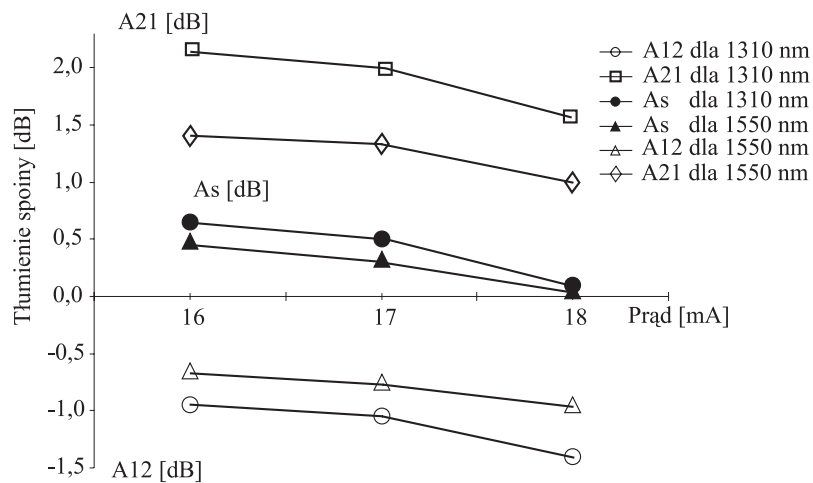


Rys. 5.2. Tłumienie 14 spoin łączonych światłowodów MC-SMF (przykłady z eksploatowanej trasy światłowodowej) dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ i $\lambda = 1550 \text{ nm}$, pomiary reflektometrycznymi MW9070B firmy Anritsu [wyniki własne]

2. $W_1 \neq W_2$, $d = 0$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ maleje wraz ze wzrostem długości fali λ ,

$$\text{tj. } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} > \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}} .$$

Jest to przypadek łączenia światłowodów DS-SMF i NZDS-SMF ze światłowodami MC-SMF – rysunek 5.1. Z zależności (5.16) i (5.17) oraz (5.21) i (5.22) dla połączeń powyższych światłowodów otrzymuje się $|A_{12}^{(-)}|_{1310 \text{ nm}} > |A_{12}^{(-)}|_{1550 \text{ nm}}$ i $A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} > A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$. Wartości $|A_{12}^{(-)}|$ i $A_{21}^{(+)}$ są duże, $A_s \gg 0$ oraz $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$. Na rysunku 5.3 przedstawiono praktyczne potwierdzenie powyższej analizy.

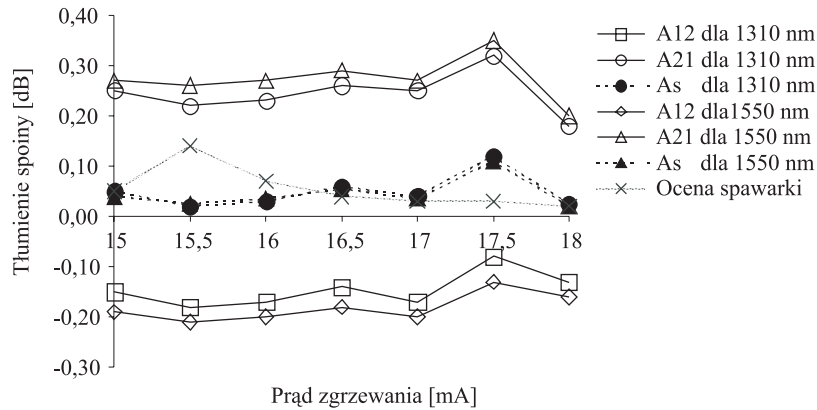


Rys. 5.3. Zależność tłumienia (pomiar reflektometryczny) spoin światłowodów MC-SMF ($2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$, $2W_1|_{1550 \text{ nm}} = 10,5 \pm 1 \mu\text{m}$) i NZDS-SMF typu TrueWave ($2W_2|_{1310 \text{ nm}} \approx 6,7 \mu\text{m}$, $2W_2|_{1550 \text{ nm}} = 8,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$) od prądu zgrzewania – spawarka Ericsson 925RTC, czas zgrzewania $t = 2 \text{ s}$, stosowano reflektometr Exfo FCS-100 [wyniki własne]

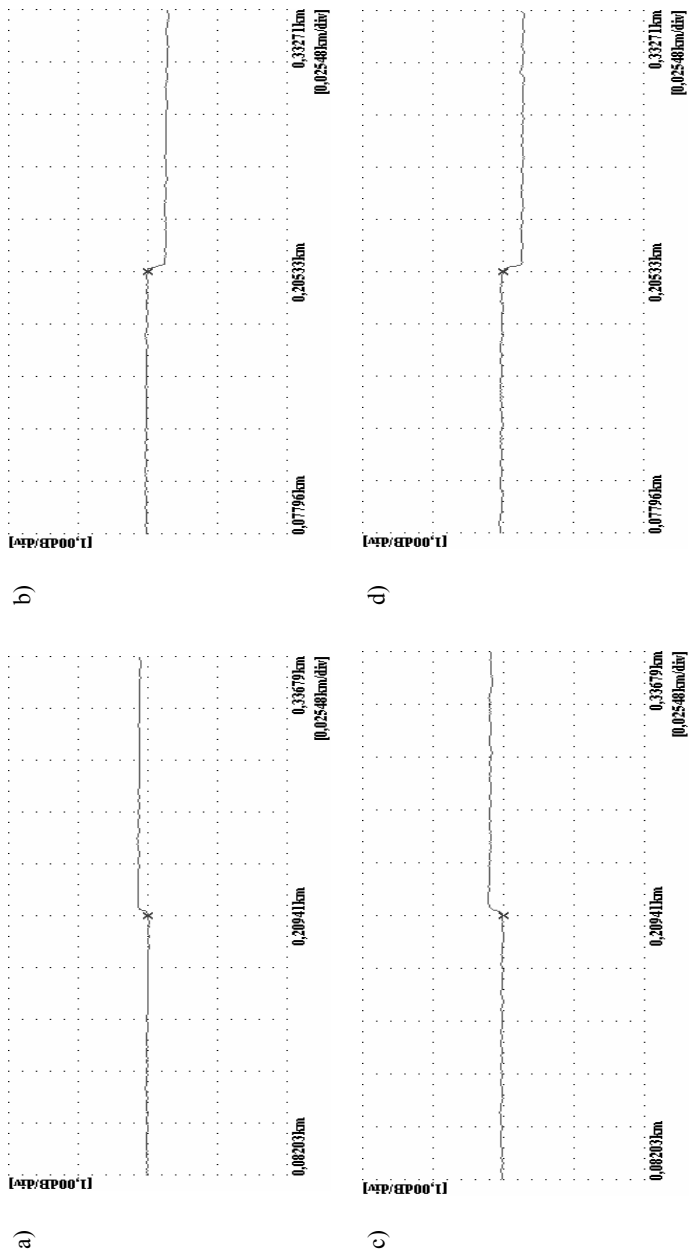
3. $W_1 \neq W_2$, $d = 0$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ rośnie wraz ze wzrostem długości fali λ ,

$$\text{tj. } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} < \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}} .$$

Jest to przypadek łączenia światłowodów DC-SMF ze światłowodami MC-SMF. Wykorzystywane w telekomunikacji światłowody DC-SMF i MC-SMF niewiele różnią się polami modu [8]. Parametry tych światłowodów przedstawione w tabeli 5.1 służą do ilustracji zmian $\frac{W_1}{W_2}$ zachodzących wraz ze zmianami długości fali i są przykładem poglądowym parametrów dla tego typu światłowodów. Biorąc pod uwagę wyrażenia (5.16) i (5.17) oraz (5.21) i (5.22) dla połączeń powyższych światłowodów otrzymuje się $|A_{12}^{(-)}|_{1310 \text{ nm}} < |A_{12}^{(-)}|_{1550 \text{ nm}}$ i $A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} < A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$, a A_s jest niewielkie (małe różnice W_1 i W_2) i praktycznie nie zmniejszające się wraz ze wzrostem czasów i prądów zgrzewania – rysunek 5.4 (brak wpływu optymalizacji), oraz $A_s|_{1310 \text{ nm}} < A_s|_{1550 \text{ nm}}$ – co jest bardzo charakterystyczne. Na rysunkach 5.4 i 5.5 przedstawiono eksperymentalne potwierdzenie wyżej przedstawionej analizy.



Rys. 5.4. Zależność tłumienia (pomiar reflektometryczny) spoin światłowodów MC-SMF ($2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$, $2W_1|_{1550 \text{ nm}} = 10,5 \pm 1 \mu\text{m}$) i DC-SMF ($2W_2|_{1310 \text{ nm}} = 8,8 \pm 0,7 \mu\text{m}$, $2W_2|_{1550 \text{ nm}} \approx 9,8 \pm 1 \mu\text{m}$) od prądu zgrzewania – spawarka Ericsson 925RTC, czas zgrzewania $t = 3,5 \text{ s}$, stosowano reflektometr MW9070B firmy Anritsu [wyniki własne]



Rys. 5.5. Przykład reflektometrycznego pomiaru (reflektometr Anritsu MW9070B) spójny światłowodów MC-SMF ($2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$,

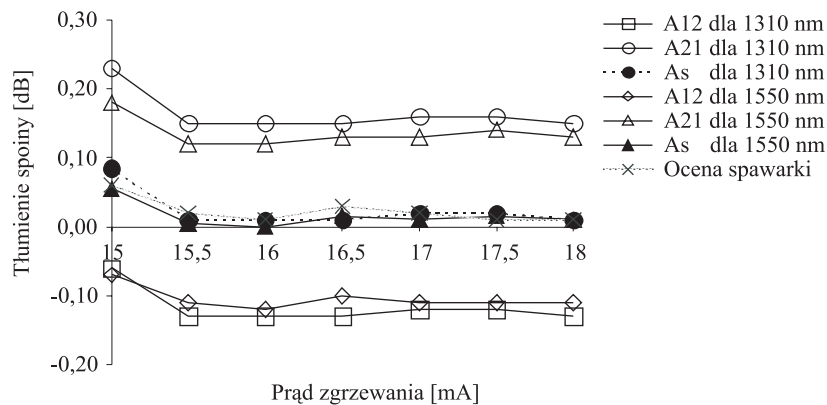
$2W_2|_{1550 \text{ nm}} = 10,5 \pm 1 \mu\text{m}$) i DC-SMF ($2W_2|_{1310 \text{ nm}} = 8,8 \pm 0,7 \mu\text{m}$, $2W_2|_{1550 \text{ nm}} \approx 9,8 \pm 1 \mu\text{m}$): a) $A_{12}|_{1310 \text{ nm}}$, b) $A_{21}|_{1310 \text{ nm}}$,

c) $A_{12}|_{1550 \text{ nm}}$, d) $A_{21}|_{1550 \text{ nm}}$; spawarka Ericsson 925RTC, czas zgrzewania $t = 3,5 \text{ s}$, prąd zgrzewania $I = 17 \text{ mA}$ [wyniki własne]

$$4. W_1 \neq W_2, d = 0 \text{ i } W_1 > W_2 \text{ oraz } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} = \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}}$$

Jest to przypadek łączenia tych samych typów światłowodów, lecz różniących się promieniami pól modowych w ramach dopuszczalnego rozkładu wartości MFR (*Mode Field Radius*), np. połączenia MC-SMF – MC-SMF o $2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,0 \mu\text{m}$ i $2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,3 \mu\text{m}$.

Biorąc pod uwagę (5.16) i (5.17) oraz (5.21) i (5.22) dla połączeń powyższych światłowodów otrzymujemy $|A_{12}^{(-)}|_{1310 \text{ nm}} = |A_{12}^{(-)}|_{1550 \text{ nm}}$ i $|A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} = |A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$ oraz $A_s|_{1310 \text{ nm}} = A_s|_{1550 \text{ nm}}$ – w praktyce (spajanie bez optymalizacji) dla tego typu połączeń $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$ o około $0,01 \div 0,03 \text{ dB}$ – rysunek 5.6 (spoina dla prądu 15 mA).



Rys. 5.6. Zależność tłumienia (pomiar reflektometryczny) spoin światłowodów MC-SMF - MC-SMF ($2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$) od prądu zgrzewania – spawarka Ericsson 925RTC, czas zgrzewania $t = 3 \text{ s}$, stosowano reflektometr MW9070B firmy Anritsu [wyniki własne]

II. Łączenie niecentryczne $d \neq 0$

1. $W_1 = W_2, d \neq 0$

W wyrażeniach (5.13) i (5.14) pomija się trzy składniki: pierwszy (nieistotny wpływ), drugi i trzeci równają się zeru:

$$A_{12} = 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.23)$$

$$A_{21} = 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} A_{12}|_{1310 \text{ nm}} &= A_{21}|_{1310 \text{ nm}} = A_s|_{1310 \text{ nm}} = \\ &= 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad \text{i jest zawsze dodatnie} \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} A_{12}|_{1550 \text{ nm}} &= A_{21}|_{1550 \text{ nm}} = A_s|_{1550 \text{ nm}} = \\ &= 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad \text{i jest zawsze dodatnie} \end{aligned} \quad (5.26)$$

Pole modu rośnie z długością fali, więc $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$. Zatem jeżeli jednokierunkowe pomiary reflektometryczne są zawsze dodatnie i $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$, świadczy to o łączeniu tych samych typów światłowodów, w których występuje przesunięcie osi. Przykładem takiego połączenia jest spoina nr 3 na rysunku 5.2. Mając promienie pól modowych łączonych światłowodów, można obliczyć przesunięcie d .

2. $W_1 \neq W_2$, $d \neq 0$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ maleje wraz ze wzrostem długości fali λ ,

$$\text{tj. } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} > \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}}.$$

Jest to przypadek łączenia światłowodów DS-SMF i NZDS-SMF ze światłowodami MC-SMF i DC-SMF – rysunek 5.1, przy równoczesnym występowaniu przesunięcia osi łączonych włókien. Światłowody te różnią się istotnie promieniami pól modowych. Jednokierunkowe tłumienia $|A_{12}^{(-)}|$ i $A_{21}^{(+)}$ połączeń takich włókien osiągają wartości powyżej 1 dB, zaś przesunięcie osi $d = 1 \mu\text{m}$ przy ich łączeniu wnosi relatywnie małe tłumienie: rzędu 0,07 dB dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ i 0,05 dB dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

Dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ w porównaniu z większymi długościami fali $\lambda = 1550 \text{ nm}$ otrzymuje się:

$$\begin{aligned} A_{12}|_{1310 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} (\text{ujemne } \uparrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] (\text{dodatnie } \uparrow) + \\ &+ 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) (\text{dodatnie } \uparrow) \end{aligned}$$

$$A_{21}|_{1310 \text{ nm}} = 10 \log \frac{W_1}{W_2} (\text{dodatnie } \uparrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] (\text{dodatnie } \uparrow) +$$

$$+ 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) (\text{dodatnie } \uparrow)$$

Dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$ w porównaniu z mniejszymi długościami fali $\lambda = 1310 \text{ nm}$ otrzymuje się:

$$A_{12}|_{1550 \text{ nm}} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} (\text{ujemne } \downarrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] (\text{dodatnie } \downarrow) +$$

$$+ 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) (\text{dodatnie } \downarrow)$$

$$A_{21}|_{1550 \text{ nm}} = 10 \log \frac{W_1}{W_2} (\text{dodatnie } \downarrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] (\text{dodatnie } \downarrow) +$$

$$+ 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) (\text{dodatnie } \downarrow)$$

W konsekwencji otrzymuje się: $|A_{12}^{(-)}|_{1310 \text{ nm}} > |A_{12}^{(-)}|_{1550 \text{ nm}}$ – dla małych przesunięć osi d i $A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} > A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$. Wartości $|A_{12}^{(-)}|$ i $A_{21}^{(+)}$ są duże, $A_s \gg 0$ oraz $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$. W praktyce przy niezbyt dużym przesunięciu $d \leq 1 \mu\text{m}$ przypadki **I.2** i **II.2** są nierozróżnialne.

3. $W_1 \neq W_2$, $d \neq 0$ i $W_1 > W_2$ oraz $\frac{W_1}{W_2}$ rośnie wraz ze wzrostem długości fali λ ,

$$\text{tj. } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} < \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}}.$$

Jest to przypadek łączenia światłowodów DC-SMF ze światłowodami MC-SMF przy występowaniu przesunięcia osi łączonych włókien. Wykorzystywane w telekomunikacji światłowody DC-SMF i MC-SMF mało różnią się promieniami pól modowych. Jednokierunkowe tłumienia $|A_{12}^{(-)}|$ i $A_{21}^{(+)}$ połączeń takich włókien osiągają wartości rzędu $0,10 \div 0,15 \text{ dB}$, zaś przesunięcie osi $d = 1 \mu\text{m}$ przy ich łączeniu wnosi relatywnie duże tłumienie: rzędu $0,07 \text{ dB}$ dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ i $0,05 \text{ dB}$ dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

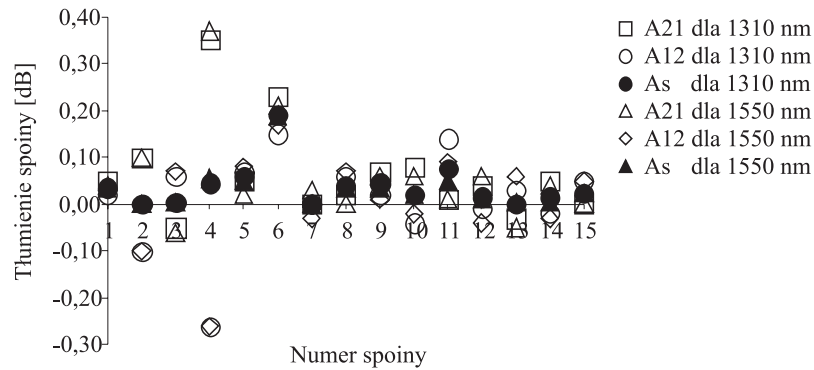
Dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$ w porównaniu z większymi długościami fali $\lambda = 1550 \text{ nm}$ otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
 A_{12}|_{1310 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (ujemne } \downarrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie } \downarrow) + \\
 &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \uparrow) \\
 A_{21}|_{1310 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ (dodatnie } \downarrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie } \downarrow) + \\
 &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \uparrow)
 \end{aligned}$$

Dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$ w porównaniu z mniejszymi długościami fali $\lambda = 1310 \text{ nm}$ otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
 A_{12}|_{1550 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (ujemne } \uparrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie } \uparrow) + \\
 &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \downarrow) \\
 A_{21}|_{1550 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ (dodatnie } \uparrow) + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie } \uparrow) + \\
 &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \downarrow)
 \end{aligned}$$

W tym przypadku możliwy jest tylko jeden wniosek. Otóż jeżeli $A_{21}^{(+)}$ jest duże i A_{12} zbliża się do zera lub przyjmuje wartości dodatnie, to występuje duże przesunięcie osi d (np. spoina nr 6 na rysunku 5.7), które można obliczyć, mając do dyspozycji pomiary jednokierunkowe $A_{12}|_{1310 \text{ nm}}$ i $A_{12}|_{1550 \text{ nm}}$.



Rys. 5.7. Tłumienie 14 spoin łączonych światłowodów DC-SMF – MC-SMF dla $\lambda = 1310$ nm i $\lambda = 1550$ nm (spoina nr 6 – przykład dużej niecentryczności połączenia), stosowano reflektometr MW9070B firmy Anritsu [wyniki własne]

$$4. W_1 \neq W_2, d \neq 0 \text{ i } W_1 > W_2 \text{ oraz } \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1310 \text{ nm}} = \frac{W_1}{W_2} \Big|_{1550 \text{ nm}}.$$

Jest to przypadek łączenia tych samych typów światłowodów, lecz różniących się promieniami pól modowych w ramach dopuszczalnego rozkładu wartości MFR, np. połączenia MC-SMF – MC-SMF o $2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,0 \mu\text{m}$ i $2W_1|_{1310 \text{ nm}} = 9,3 \mu\text{m}$ z występowaniem przesunięcia osi łączonych włókien.

Dla $\lambda = 1310$ nm w porównaniu z większymi długościami fali $\lambda = 1550$ nm otrzymuje się:

$$\begin{aligned} A_{12} \Big|_{1310 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (ujemne)} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie)} + \\ &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \uparrow) \\ A_{21} \Big|_{1310 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ (dodatnie)} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie)} + \\ &\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \uparrow) \end{aligned}$$

Dla $\lambda = 1550$ nm w porównaniu z mniejszymi długościami fali $\lambda = 1310$ nm otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
A_{12}|_{1550 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (ujemne)} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie)} + \\
&\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \downarrow) \\
A_{21}|_{1550 \text{ nm}} &= 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ (dodatnie)} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] \text{ (dodatnie)} + \\
&\quad + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \text{ (dodatnie } \downarrow)
\end{aligned}$$

W konsekwencji otrzymuje się: $|A_{12}|_{1310 \text{ nm}} < |A_{12}|_{1550 \text{ nm}}$ i $A_{21}^{(+)}|_{1310 \text{ nm}} > A_{21}^{(+)}|_{1550 \text{ nm}}$ oraz $A_s|_{1310 \text{ nm}} > A_s|_{1550 \text{ nm}}$. Mając do dyspozycji pomiary jednokierunkowe $A_{12}|_{1310 \text{ nm}}$ i $A_{12}|_{1550 \text{ nm}}$, można policzyć przesunięcie osi d .

Wykonane analizy wskazują, że na podstawie reflektometrycznych jednokierunkowych pomiarów tłumienia spoin można określić typy łączonych włókien oraz zidentyfikować i obliczyć przesunięcie osi łączonych światłowodów. Jest to istotne, gdyż najczęściej mierząc tzw. „trasę”, nie dysponuje się informacją, jakie typy włókien składają się na nią. Inne pomiary, np. transmisyjne, nie dają takich możliwości.

5.2. Straty w światłowodach jednomodowych dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych $\lambda = 1310, 1450, 1550$ i 1625 nm

W klasycznych pomiarach reflektometrycznych pomiary odbywają się na dwóch długościach fal, tj. $\lambda = 1310$ nm (tzw. II okno optyczne) i $\lambda = 1550$ nm (tzw. III okno optyczne).

Obecnie jednak uważa się, że pomiary reflektometryczne na tych dwóch długościach fal są niewystarczające i należy je rozszerzać o tzw. IV okno optyczne, tj. dla $\lambda \sim 1625$ nm, ponieważ generalnie czułość pomiaru reflektometrycznego zwiększa się wraz ze wzrostem długości fali pomiarowej, gdyż wraz z nią zwiększa się promień modu MFR. Jest to niezwykle istotne w lokalizacji zdarzeń na trasach światłowodowych i ocenie efektów starzeniowych w światłowodach. Dotyczy to szczególnie lokalizacji często występujących makro-, mikrozgięć i mikropeknięć oraz spoin.

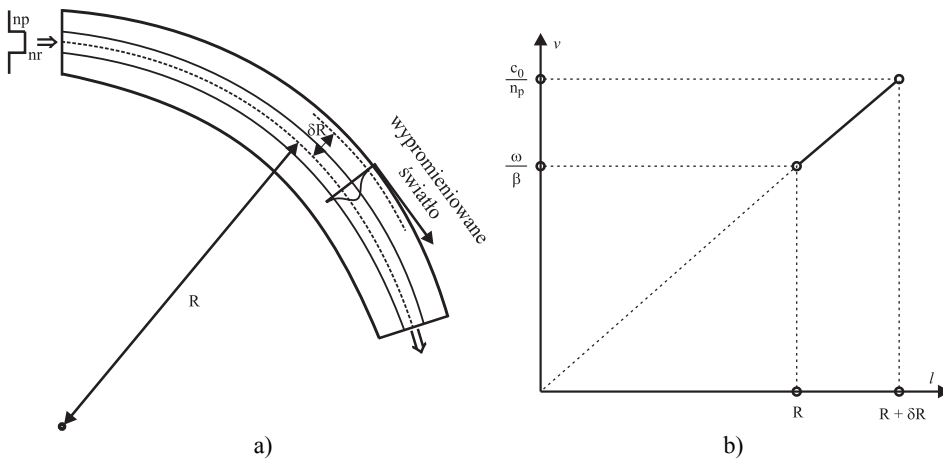
W pomiarach reflektometrycznych makrozgięcia dają podobny obraz jak spoiny lub złącza rozłączne o niezauważalnej reflektancji. Dysponując trzecią (dużą) długością fali o największym polu modu, można jednoznacznie lokalizować i odróżniać makrozgięcia od spoin i złączy rozłącznych o niezauważalnej reflektancji, gdyż tłumienie makrozgięć bardzo istotnie zwiększa się wraz ze wzrostem pola modu, a tłumienie spoin i złączy rozłącznych nie. Makrozgięcia są zdarzeniami, które ze względu na sposób powstawania mogą zmieniać swoje tłumienie w czasie. Ich lokalizacja i likwidacja jest niezwykle istotna, gdyż mogą zmieniać budżet optyczny tras światłowodowych.

Tłumienie mikrozęgień i mikropeknięć, podobnie jak makrozęgień, zwiększa się ze wzrostem długości fali pomiarowej [1].

5.2.1. Makrozęgiecia

Makrozęgieciem nazywa się krzywiznę włókna o promieniu rzędu kilku centymetrów. Makrozęgiecia występują najczęściej w mufach kablowych, skrzynkach połączeniowych czy kablach rozetowych. Straty przez nie spowodowane mogą osiągać nawet wartość kilkunastu decybeli.

Jeżeli światłowód zgięto i promień krzywizny wynosi R – rysunek 5.8a [1], to pole, które było symetryczne na odcinku prostoliniowym, przesuwa się na zewnątrz osi światłowodu. Energia modu poruszającego się w płaszczu musi mieć prędkość większą ze względu na konieczność przebycia dłuższej drogi. Jeżeli jednak ta część energii znajdzie się zbyt daleko od osi światłowodu zostanie wypromieniowana, gdyż nie może osiągnąć prędkości większej niż c_0/n_p . Wynika stąd strata mocy optycznej, której przyczyną jest makrozęgiecie. Krytyczną odległość od osi światłowodu δR , za którą światło nie może się znaleźć, można wyznaczyć wykorzystując rysunek 5.8b [1].



Rys. 5.8. Rozkład pola modu podstawowego w światłowodzie zgiętym o promieniu R – a), zależność prędkości światła od odległości od środka krzywizny – b) [1]

Prędkość światła na osi światłowodu wynosi ω/β , a w płaszczu c_0/n_p , zatem z podobieństwa trójkątów – rysunek 5.8 – wynika:

$$\frac{R + \delta R}{R} = \frac{c_0}{n_p} \frac{\beta}{\omega} \quad (5.27)$$

i

$$\delta R = R \left(\frac{c_0}{n_p} \frac{\beta}{\omega} - 1 \right) = R \left(\frac{c_0}{n_p} \frac{kn_r}{kc_0} - 1 \right) = R \left(\frac{n_r}{n_p} - 1 \right) \quad (5.28)$$

gdzie:

- c_0 – prędkość światła w próżni, $\beta = kn_r$, $\omega = 2\pi f$,
- k – liczba falowa,
- n_p – współczynnik załamania w płaszczu,
- n_r – współczynnik załamania na osi światłowodu.

Można udowodnić, że [1]:

$$\delta R = R \left(\frac{n_r}{n_p} - 1 \right) \approx \frac{R}{2} \left(\frac{w}{n_p k a} \right)^2 \quad (5.29)$$

gdzie:

a – promień rdzenia światłowodu, parametr $w = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_p^2}$ [1, 148].

Minimalne straty wynikające z makrozgięć otrzymuje się, jeżeli zwiększy się odległość δR w stosunku do obszaru, który zajmuje pole modu. Można tego dokonać, zwiększając różnicę współczynników załamania [1] lub zwiększając stosunek $\frac{w}{a}$ (5.29).

Oznacza to, że dla światłowodu jednomodowego o określonej długości fali odcięcia λ_c i promieniu rdzenia a straty wynikające z makrozgięcia rosną w kwadracie z długością transmitowanej fali λ , gdyż parametr w jest zależny od λ [148]:

$$w \approx 2,7484 \frac{\lambda_c}{\lambda} - 0,060 \quad (5.30)$$

Wraz ze wzrostem długości fali rośnie również promień pola modu [1]. Rozkład składowej poprzecznej pola elektrycznego modu podstawowego $E(r)$ służy do obliczenia promieni pola modu zaproponowanych przez Petermanna [1, 139, 149, 150]:

$$W_0^2 = \frac{2 \int_0^\infty r^3 E^2(r) dr}{\int_0^\infty r E^2(r) dr} \quad (\text{tzw. I definicja Petermanna [149]}) \quad (5.31)$$

$$W_1^2 = \frac{2 \int_0^\infty r E^2(r) dr}{\int_0^\infty r [E'(r)]^2 dr} \quad (\text{tzw. II definicja Petermanna [139]}) \quad (5.32)$$

$$W_\infty^2 = \frac{2}{kn_r(\beta - kn_p)} \quad (5.33)$$

Promienie spełniają nierówność: $W_1 < W_0 < W_\infty$ [1].

Dla gaussowskiego rozkładu pola modu wszystkie te definicje są równoważne i $W_0 = W_1 = W_\infty = W$. Przy założeniu słabego prowadzenia, które ma miejsce w jednodowych światłowodach telekomunikacyjnych $n_r \approx n_p$, otrzymuje się [1]:

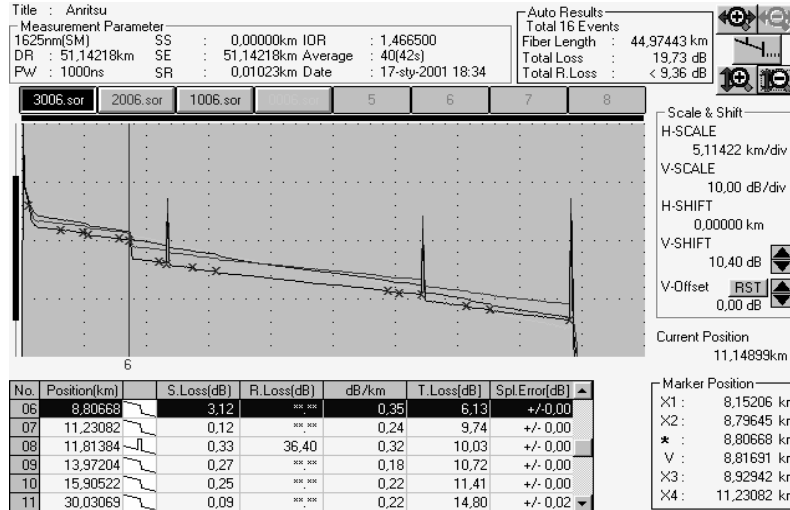
$$W_\infty^2 = \frac{2}{kn_r(\beta - kn_p)} \approx \frac{2(\beta + kn_p)}{kn_p \frac{w^2}{a^2}} = \frac{4a^2}{w^2} \quad (5.34)$$

$W_\infty \approx \frac{2a}{w}$ co oznacza, że straty makrozgięciowe zależą od W_∞ (5.29) i (5.34) oraz

rosną wraz ze wzrostem długości transmitowanej fali λ , co wiąże się ze wzrostem pola modu. Równocześnie światłowody charakteryzujące się dużym polem modu są bardziej narażone na makrozgięcia.

Przy pomiarach reflektometrycznych odróżnienie straty wtrąconej, np. spoiny lub złącza rozłącznego o niezauważalnej reflektancji od straty wtrąconej wynikającej z makrozgięcia jest jednoznacznie możliwe przy poszerzonym, w kierunku fal długich, zakresie długości fal pomiarowych – rysunek 5.9.

Na rysunku 5.9 jednoznacznie identyfikowalne makrozgięcie jest tylko dla $\lambda = 1625$ nm. Dla pozostałych długości fal: 1310, 1450 i 1550 nm zdarzenie zaznaczone na rysunku 5.9 można by było interpretować jako złe połączenie zgrzewane lub złącze rozłączne o niezauważalnej reflektancji.



Rys. 5.9. Przykładowy pomiar reflektometryczny światłowodu G.652, dla czterech długości fal $\lambda = 1310, 1450, 1550$ i 1625 nm (krzywa zaznaczona krzyżykami), światłowodu z makrozgięciem (pionowa linia oznaczona 6 wyznacza miejsce makrozgięcia) w kablu rozetowym, pomiar reflektometrem MW9076D/D1 firmy Anritsu [wyniki własne]

5.2.2. Mikrozmęczenia

Mikrozmęczenia powstają w wyniku oscylacji wymiarów rdzenia wokół wartości nominalnej [1]. Pomimo małych wahań wymiarów na granicy rdzeń – płaszcz, mod przewodzący reaguje na mikrozmęczenia, jak i na lokalne zagięcia falowodu. Straty na mikrozmęczeniach i niejednorodnościach wynikają z technologii wykonania światłowodu lub kabla (dużych naprężeń lub nacisków na światłowód w kablu).

Straty wynikające z mikrozmęczeń określa się jako [1]:

$$\alpha_{mikr} = \frac{\Delta P}{P} \quad (5.35)$$

gdzie:

ΔP – moc wypromieniowana ze światłowodu,
 P – moc modu prowadzonego w światłowodzie.

Dla gaussowskiego rozkładu pola straty na mikrozmęczeniach wynoszą [1, 149]:

$$\alpha_{mikr} = \frac{A}{4} (kn_r W_0)^2 (kn_r W_0^2 / 2)^{2p} \quad (5.36)$$

gdzie:

$$A = 9,68 \cdot 10^{-19} \text{ (dB/km)} \mu\text{m}^{-2p} .$$

Dla dowolnego światłowodu jednomodowego [1]:

$$\alpha_{mikr} = \frac{A}{4} (kn_r W_0)^2 (kn_r W_p^2 / 2)^{2p} \quad (5.37)$$

$p = 2, 3$ dla typowego światłowodu o skokowym rozkładzie współczynnika załamania, a W_p jest takim parametrem, że [1]:

$$W_\infty^2 \geq W_p^2 \geq W_0 W_1 \geq W_1^2 \quad (5.38)$$

gdzie:

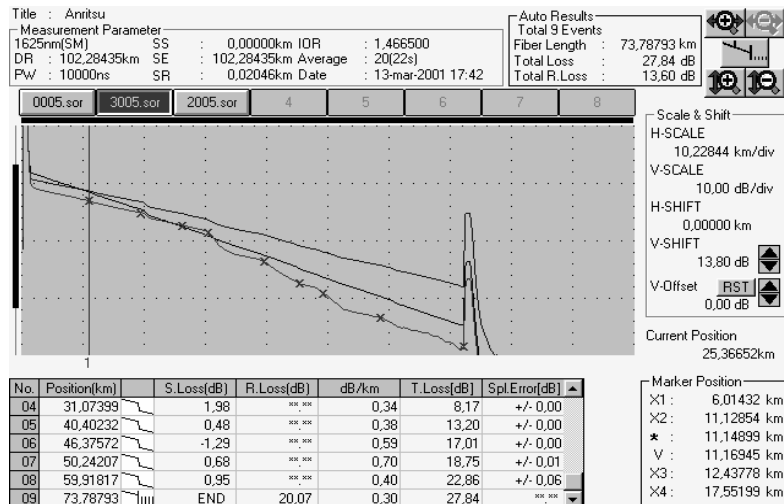
W_0, W_1, W_∞ – promienie pól modowych (5.31), (5.32), (5.33).

Straty makrozmęczeniowe zależą od promienia W_∞ (powinien być mały), a mikrozmęczeniowe od W_p . Zależność (5.38) wyznacza dolną granicę W_1 i górną W_∞ dla W_p .

Od wielkości promienia W_1 zależą straty przy łączeniu światłowodów (małe straty przy dużym W_1), zatem aby uzyskać małe straty na mikro- i makrozmęczeniach, należy zmniejszać $W_\infty \approx \frac{2a}{w}$, czyli np. zmniejszyć długość fali transmitowanej lub pomiarowej.

Oznacza to również, że istniejące w światłowodzie mikrozmęczenia będą najlepiej widoczne (detekowane) przy dużych długościach fal. Stwierdzenie przy pomiarach

reflektometrycznych istnienia mikrozgieć jest jednoznacznie możliwe przy poszerzonym, w kierunku fal długich, zakresie długości fal pomiarowych – rysunek 5.10.



Rys. 5.10. Przykładowy pomiar reflektometryczny, dla trzech długości fal $\lambda = 1450, 1550$ i 1625 nm (krzywa zaznaczona krzyżykami), światłowodu G.652 z mikrozgiećmi w naprężonym kablu podwieszanym, pomiar reflektometrem MW9076D/D1 firmy Anritsu [wyniki własne]

Jednoznaczna detekcja naprężeń i mikrozgieć (rysunek 5.10 dla $\lambda = 1625$ nm) ma również istotne znaczenie przy bardzo dużych prędkościach transmisji, gdyż wskazuje na możliwość istnienia dwójłomności naprężeniowej, w związku z tym – konieczność pomiaru dyspersji polaryzacyjnej [73].

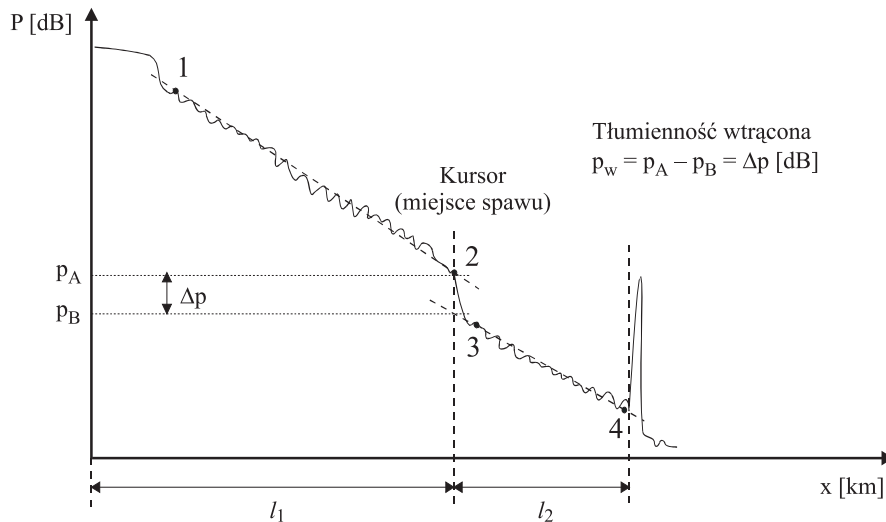
5.3. Korekcja błędów w reflektometrycznych pomiarach długości odcinków spajanych

Podczas reflektometrycznych pomiarów tłumienia połączeń zgrzewanych zauważono błędy w pomiarach długości odcinków spajanych. Pomiar długości były wykonywane prawidłowo różnymi typami reflektometrów, tym niemniej dla każdego użytego typu przyrządu występowały błędy w ocenie długości spajanych odcinków światłowodów jednomodowych.

W eksperymentach mających na celu weryfikację powyższych obserwacji, długość światłowodów przed spajaniem mierzono metodą reflektometryczną poprzez pomiar odległości impulsu odbitego od końca światłowodu. Do reflektometrycznych pomiarów długości odcinków spajanych i tłumienności spoin zastosowano metodę LSA (*Least Square Approximation*). Przykład realizacji czteropunktowej metody LSA przedstawiono na rysunku 5.11.

Pomiary przeprowadzono reflektometrami EXFO FCS-100, Siemens K2310, Tektronix TFS3030 FiberMini, dla różnych długości impulsów oraz dla $\lambda = 1310$ i 1550 nm.

Przyjęto grupowy współczynnik załamania $n_g = 1,47$. Stwierdzono znaczne wydłużenie, w stosunku do mierzonych metodą „odbiciową”, długości odcinków przed spoiną l_1 – rysunek 5.11 i skrócenie długości odcinków za spoiną l_2 – rysunek 5.11. Ekstremalne różnice dochodziły do 8 metrów na kilometrowych odcinkach spajanych światłowodów.



Rys. 5.11. Ilustracja metody czteropunktowej

Pomiar długości trasy $l_1 + l_2$ spajanych światłowodów, mierzony na „odbicie”, w granicach błędów ± 2 m, zgadzał się z sumą l_1 i l_2 światłowodów oddzielnie mierzonych przed spajaniem.

Pomiar długości odcinków spajanych jest więc obciążony dużym błędem. Ma to bardzo duże znaczenie przy lokalizacji spoin w istniejących liniach światłowodowych.

Reflektometr w dziedzinie czasu OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) umożliwia wykonanie pomiaru, między innymi długości światłowodu, z jednego końca linii światłowodowej na zasadzie wielokrotnego wstrzykiwania do światłowodu impulsów optycznych, a następnie określenie mocy optycznej rozpraszanej wstecznie powracającej do reflektometru oraz mocy odbitej w światłowodzie, powracającej do reflektometru. Moc optyczna powracająca do reflektometru jest kierowana do odbiornika optycznego, gdzie jest uśredniana, przetwarzana na sygnał elektryczny i analizowana. Wstrzykiwane do światłowodu impulsy optyczne charakteryzuje moc szczytowa P_o , czas trwania Δt oraz częstość repetycji. Częstość repetycji musi być tak dobrana, aby powracający ze światłowodu sygnał nie zachodził na impuls wstrzykiwany.

W pomiarach reflektometrycznych kluczowym zagadnieniem jest analiza mocy rozpraszanej i odbitej pochodzących od wstrzykiwanych optycznych impulsów w funkcji czasu, co jest równoważne analizie w funkcji odległości od miejsca pomiaru, przy znanym grupowym współczynniku załamania n_g .

Reflektometr jest miernikiem mocy rozproszonej P_{rw} proporcjonalnej do mocy szczytowej impulsu P_o , w odległości x od reflektometru i czasu trwania impulsu (długości impulsu), czyli pola impulsu.

Zależność mocy rozproszonej od parametrów światłowodu opisuje równanie [142]:

$$P_{rw}(x) = S \cdot \alpha_s \cdot \Delta x \cdot P_o \cdot k \cdot 10^{-\frac{2 \cdot \alpha \cdot x}{10}} \quad (5.39)$$

gdzie:

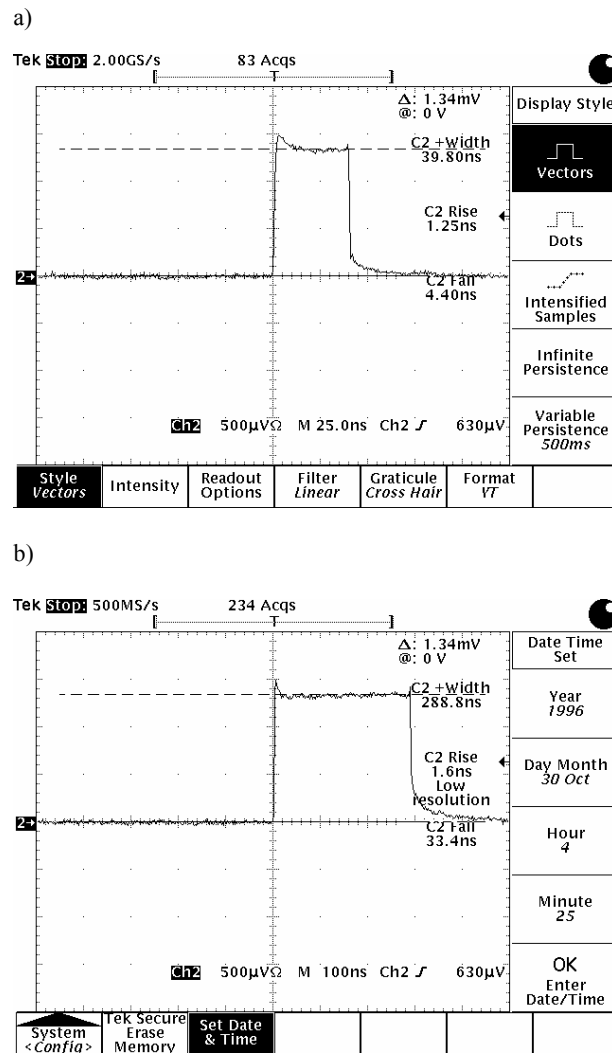
$$x = \frac{t \cdot v_g}{2},$$

- v_g – prędkość grupowa impulsu optycznego w światłowodzie,
- t – czas przejścia przez światło drogi $2x$,
- P_o – szczytowa moc impulsu wstrzykniętego do światłowodu,
- S – bezwymiarowy współczynnik rozpraszania wstecznego,
- α_s – współczynnik rozpraszania Rayleigha [1/km],
- α – tłumienność jednostkowa światłowodu [1/km],
- k – sprawność odbioru optycznego,
- $\Delta x = \Delta t \cdot v_g$ – długość impulsu,
- Δt – czas trwania impulsu.

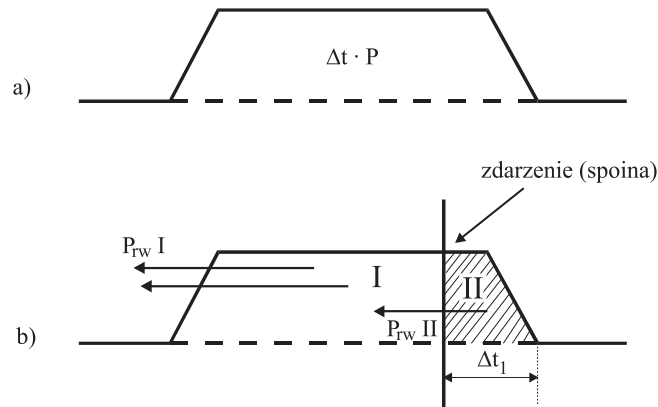
Reflektometry charakteryzują się minimalnym poziomem mocy odbieranej, poniżej którego nie odróżniają sygnału mocy rozproszonej od szumu. Jest to związane z czułością odbiornika optycznego zastosowanego w reflektometrze.

Określona czułość odbiornika zastosowanego w danym typie reflektometru oraz czasy narostu impulsów optycznych (rysunki 5.12 i 5.13) są przyczynami obserwowanych zmian mierzonych długości odcinków spajanych światłowodów w stosunku do ich rzeczywistej długości.

Moc rozproszona docierająca do reflektometru, zgodnie z wyrażeniem (5.39), jest proporcjonalna do powierzchni impulsu, co zostało pokazane na rysunku 5.13 przedstawiającym schematycznie zmiany mocy rozproszonej $P_{rw}(x)$. Reflektometr rejestruje czas wstrzyknięcia impulsu do światłowodu, zapamiętywany jest czas początku impulsu. Jeżeli na trasie impulsu nastąpi zdarzenie typu spoina, jest ono rejestrowane przez reflektometr jako zmniejszenie lub zwiększenie się mocy rozproszonej $P_{rw}(x)$ pochodzącej od impulsu. Zmiana mocy rozproszonej jest rejestrowana od momentu, w którym zmiana energii rozproszonej reprezentowanej przez pole II – rysunek 5.13b – przedstawia poziom energii możliwy do rejestracji przez reflektometr jako sygnał. Do tego momentu reflektometr nie rejestruje zdarzenia w postaci zmiany energii rozproszonej (układ odbiorczy i decyzyjny traktuje tę zmianę jako szum). Im większa czułość odbiornika optycznego, tym mniejsze pole II – rysunek 5.13b – zauważane jest jako zmiana. Tego typu odbiór powoduje, że czas rejestracji zdarzenia wydłuża się o $2 \Delta t_1$ – rysunek 5.13b. Zatem mierzona długość odcinka światłowodu wydłuża się, w stosunku do rzeczywistej długości, o odległość $\Delta l = \frac{2 \cdot \Delta t_1 \cdot v_g}{2}$.

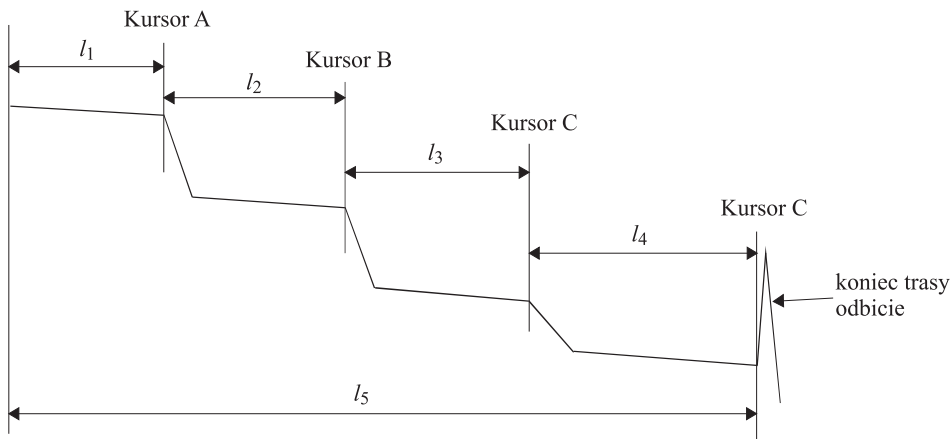


Rys. 5.12. Reflektometr EXFO FCS-100. Przykładowe kształty impulsów: a) $\Delta t = 30$ ns, b) $\Delta t = 275$ ns [wyniki własne]



Rys. 5.13. Schematyczne przedstawienie zmiany mocy rozpraszanej

Dla trasy złożonej z większej liczby niż dwa odcinki spajane wyżej przedstawione założenia prowadzą do uogólnionych wniosków dla n odcinków spajanych jednorodnych światłowodów mających różną długość i tłumienność. Wnioski te przedstawiono na przykładzie pomiarów czterech odcinków spajanych światłowodów o różnych długościach – rysunek 5.14.



Rys. 5.14. Schematyczne przedstawienie pomiarów długości czterech odcinków spajanych

Długość odcinka l_1 (kursor A) – rysunek 5.14 – ulegnie wydłużeniu o $\Delta l = \frac{2\Delta t_1 \cdot v_g}{2}$.

Odcinki między spoinami, tj. l_2 (AB) i l_3 (BC) ulegną nieznacznemu wydłużeniu lub skróceniu, w zależności od wielkości tłumienności jednostkowej odcinków światłowodów przed i za mierzonym odcinkiem w stosunku do tłumienności mierzonego odcinka (rysunek 5.14). Na przykład, jeżeli tłumienności odcinków l_1 i l_3 są równe tłumienności odcinka l_2 , to pierwsza spoina (kursor A) skracza długość l_2 o Δl (na skutek wydłużenia l_1), zaś na drugiej spoinie (kursor B) wydłużenie będzie większe

(niewiele) niż Δl , gdyż na skutek zwiększenia się x (wyrażenie (5.39)) zmniejsza się $P_{rw}(x)$, co prowadzi do zwiększenia Δt_1 – rys. 5.13b. W wyniku tego długość mierzonego odcinka l_2 ulegnie nieznacznemu wydłużeniu.

Na końcu trasy występuje skrócenie odcinka l_4 , gdyż ostatnia spoina skraca długość l_4 , a na końcu trasy następuje odbicie sygnału (rysunek 5.14), którego poziom mocy powracającej do reflektometru jest o kilkadziesiąt dB większy od mocy rozpraszanej, powodując, że pole II jest w tym przypadku minimalne – rysunek 5.13b.

Skrócenie ostatniego odcinka l_4 jest równe sumie zmian długości wszystkich odcinków spajanych, dlatego pomiar całej trasy odpowiada sumie rzeczywistych długości spajanych odcinków.

Metoda korekcji błędów w optycznych, reflektometrycznych w dziedzinie czasu, pomiarach długości odcinków spajanych telekomunikacyjnych światłowodów jednomodowych [72] oparta na przedstawionych założeniach pozwala na pomiar rzeczywistych długości odcinków spajanych, eliminując różnice w czułościach odbiorników optycznych stosowanych w reflektometrach, z dokładnością pomiaru nie inną niż wskazywaną przez reflektometry optyczne. Metoda ta może mieć szerokie zastosowanie, szczególnie przy precyzyjnych pomiarach długości tras światłowodowych stosowanych np. przy tworzeniu geodezyjnych map tras światłowodowych sieci telekomunikacyjnych, może również znaleźć zastosowanie podczas budowy, eksploatacji i pomiarów włókien i kabli światłowodowych oraz przy produkcji włókien i kabli światłowodowych. Metoda, opatentowana przez autora i współpracowników [72], polega na skalowaniu, oddzielnie w II i III oknie optycznym, reflektometru za pomocą wzorcowej trasy światłowodowej złożonej z minimum dwóch odcinków spajanych światłowodów o znanej długości i tłumienności, a następnie na tej podstawie obliczeniu współczynników korekcyjnych, zakładających stałość energii rozpraszanej, niezauważonej jako sygnał przez odbiornik optyczny danego reflektometru, pozwalających na korekcję pomiarów długości odcinków spajanych światłowodów jednomodowych oddzielnie dla II i III okna optycznego, dla dowolnej ilości odcinków spajanych o różnych długościach i dowolnej ich tłumienności jednostkowej.

W rozdziale przedstawiono teoretyczną i wynikającą z eksperymentów analizę jedno- i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych spoin światłowodów G.652, G.653, G.655 otrzymanych w różnych kombinacjach połączeń. W analizie uwzględniono zależność jedno- i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych tłumienia spoin od ilorazu promieni pól modowych i od przesunięcia osi łączonych włókien w funkcji długości fali pomiarowej. Umożliwia to identyfikację typów łączonych włókien. Przedstawiono analizę tłumienia połączeń zgrzewanych i makrozgięć oraz obrazów mikro-zgięć w jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych w zależności od wielkości pól modowych (długości fali) tych światłowodów. Zaprezentowano wyniki reflektometrycznych pomiarów mikro-, makrozgięć i połączeń zgrzewanych w jednomodowych światłowodach standardowych G.652 dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych $\lambda = 1310, 1450, 1550$ i 1625 nm. Stwierdzono, że pomiary reflektometryczne dla dodatkowej długości fali, tj. $\lambda = 1625$ nm, pozwalają na precyzyjne i jednoznaczne określenie zdarzeń, szczególnie strat wynikających z mikro- i makrozgięć. Przedstawiono metodę korekcji błędów w pomiarach długości odcinków spajanych jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych.

6. Optymalizacja procesu zgrzewania, badanie dyfuzyjnego obszaru przejściowego

Eksperymentalne badania optymalizacji procesu zgrzewania światłowodów telekomunikacyjnych mają bogatą bibliografię. Ze względu na swoją praktyczną użyteczność i potrzebę zastosowania w momencie wprowadzania nowych typów włókien, najczęściej wyprzedzały one badania i analizy teoretyczne [25÷36, 63]. Pierwsze badania autora dotyczące termicznego łączenia włókien koncentrowały się na eksperymencie i pomiarach spoin [51÷59, 63], lecz dopiero wyniki teoretycznych badań nad dyfuzją domieszek rdzeniowych i obliczeniami tłumienia obszaru TRD pozwalają na precyzyjne określanie warunków optymalizacji procesu zgrzewania różnych typów światłowodów telekomunikacyjnych.



W rozdziale przedstawiono reflektometryczną metodę oceny procesu optymalizacji i powstawania obszaru przejściowego oraz badania wpływu warunków klimatycznych na proces zgrzewania, wytrzymałości spoin na zrywanie, mikroobserwacje i mikroanalizę rentgenowską spoin. Oprócz podstawowego kryterium, jakim jest tłumienie, badania te charakteryzują wymiary spoin, ich strukturalną jakość – tak dla standardowych, jak i optymalizowanych warunków łączenia.

6.1. Zgrzewanie światłowodów o porównywalnych promieniach pola modu

Termiczne łączenie metodą spajania w łuku elektrycznym światłowodów telekomunikacyjnych o porównywalnych promieniach pola modu i utrzymujących parametry geometryczne teoretycznie nie wymaga procesu optymalizacji – rozdział 3. Poniższe badania miały na celu eksperymentalną weryfikację tego założenia oraz porównanie reflektometrycznych pomiarów jedno- i dwukierunkowego tłumienia takich spoin z analizą teoretyczną przedstawioną w rozdziale 5. Drugim celem było zbadanie wpływu czasu spajania takich włókien na tłumienie spoin.

Łączono ze sobą światłowody MC SMF i DC SMF o parametrach podanych w tabeli 6.1. Stosowano spawarkę (zgrzewarkę) FSU 925RTC. Zmieniano czas i prąd zgrzewania drugiego, zasadniczego etapu spajania, tzw. czas 2 i prąd 2. Należy podkreślić, że standardowy prąd (utrzymujący temperaturę $\approx 2000^{\circ}\text{C}$) i czas spajania, dla włókien MC SMF i DC SMF, wynoszą $I = 16\div 17$ mA i $t = 2$ sekundy [96, 118, 119]. Zastosowane do badań programy zgrzewania zaprezentowano w tabeli 6.2.

Tabela 6.1. Parametry łączonych włókien

| Typ włókna | Profil współczynnika załamania | $2W _{1310\text{ nm}}$ [μm] | $2W _{1550\text{ nm}}$ [μm] | Technologia wykonania |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| MC SMF |  | $9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$ | $10,5 \pm 1 \mu\text{m}$ | MCVD |
| DC SMF |  | $8,8 \pm 0,7 \mu\text{m}$ | $9,8 \pm 1 \mu\text{m}^*$ | MCVD |

* wielkość szacowana

Światłowody łączono w trzech kombinacjach: MC SMF – MC SMF, MC SMF – DC SMF i DC SMF – DC SMF. Stabelaryzowane wyniki pomiarów reflektometrycznych tłumienia spoin dla powyższych kombinacji połączeń i dla 63 programów zgrzewania – tabela 6.2 – przedstawiono w załączniku 1. Pomiary wykonywano reflektometrem MW9070B firmy Anritsu.

Tabela 6.2. Parametry i numery 63 programów zgrzewania

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nr | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Czas 2 [s] | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| Prąd 2 [mA] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 |
| Nr | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| Czas 2 [s] | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 1 |
| Prąd 2 [mA] | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16,5 |
| Nr | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Czas 2 [s] | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 |
| Prąd 2 [mA] | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Nr | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
| Czas 2 [s] | 4 | 4,5 | 5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 1 | 1,5 |
| Prąd 2 [mA] | 17 | 17 | 17 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 18 | 18 |
| Nr | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | | | | | | | |
| Czas 2 [s] | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | | | | | | | |
| Prąd 2 [mA] | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | | | | | | | |

Wyniki pomiarów tłumienia teoretycznie identycznych światłowodów MC SMF – MC SMF (załącznik 1 – tabela 1) wykazują ujemne jednokierunkowe tłumienia A_{12} dla $\lambda = 1310$ nm i $\lambda = 1550$ nm i jest to wynik łączenia światłowodów tych samych typów, które mają różne promienie pól modowych W_1 i W_2 w ramach dopuszczalnych rozrzutów – tabela 6.1. Przykładowo, przy centrycznym łączeniu dwóch światłowodów MC-SMF o $W_1 = 9,3$ μm i $W_2 = 9,0$ μm $A_{12} = -0,138$ dB i $A_{21} = 0,146$ dB. Jest to teoretyczny, przedstawiony w punkcie 5.1.2 przypadek **I.4**.

Wyniki pomiarów tłumienia światłowodów MC SMF – DC SMF (załącznik 1 – tabela 2) odpowiadają teoretycznej analizie przedstawionej jako przypadek **I.3** w punkcie 5.1.2.

Wyniki pomiarów tłumienia teoretycznie identycznych światłowodów DC SMF – DC SMF (załącznik 1 rozprawy – tabela 3) wykazują tylko dodatnie jednokierunkowe tłumienia A_{12} i A_{21} dla $\lambda = 1310$ nm i $\lambda = 1550$ nm i jest to wynik łączenia światłowodów tych samych typów, które mogą mieć (choć nie muszą) różne promienie pól modowych W_1, W_2 i w ramach dopuszczalnych rozrzutów (tabela 6.1) dodatkowo występuje przesunięcie osi d . Odpowiada to teoretycznej analizie przedstawionej jako przypadki **II.1** lub **II.4** w punkcie 5.1.2.

Zmiany czasów i prądów zgrzewania (powyżej przewidzianych do zgrzewania światłowodów MC SMF) praktycznie nie wpływają na jedno- i dwukierunkowe tłumienie spoin światłowodów łączonych w kombinacjach MC SMF – MC SMF, MC SMF –

DC SMF i DC SMF – DC SMF. Jest to zgodne z obliczeniami teoretycznymi, gdyż dla temperatury $\approx 2000^\circ\text{C}$, maksymalnego czasu spajania $t = 5$ s i dużego, jak na włókna G.652, współczynnika dyfuzji GeO_2 $D = 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ transmisyjne tłumienie $-10 \log T_f$, wynikające z wymiarów obszaru TRD, wynosi tylko 0,0022 dB.



Z doświadczeń autora wynika, że tłumienia spoin szacowane przez spawarkę (złącznik 1) na podstawie obrazów termoluminescencji [96, 98, 118] mają charakter jakościowy. Szacowana wartość tłumienia powyżej 0,15 dB może być wskaźnikiem (dla spoin światłowodów tych samych typów) do powtórzenia zgrzewania. Natomiast mała wartość tłumienia (setne części decybel) nie zawsze oznacza, że spoina jest dobrej jakości i rzeczywiście wykazuje małe tłumienie.

We wszystkich wyżej zaprezentowanych pomiarach nie zauważono strat odbiciowych. Przedstawione wnioski dotyczą również połączeń światłowodów tych samych typów, z tym że wykonanych technologiami OVD i VAD. Zostało to przedstawione w publikacjach autora [61÷66].

6.2. Zgrzewanie światłowodów istotnie różniących się promieniami pola modu

Do badań optymalizacji termicznego łączenia, jako przykład realizacji obliczeń przedstawionych w rozdziale 3, użyto światłowodów NZDS-SMF typu TrueWave i MC-SMF 1528 o parametrach podanych w tabeli 6.3 i zastosowano spawarki FSU 925RTC Ericsson i Furukawa S175.

Tabela 6.3. Parametry łączonych włókien [138]

| Typ włókna | Profil współczynnika załamania | $2W _{1310 \text{ nm}}$ [μm] | $2W _{1550 \text{ nm}}$ [μm] | Technologia wykonania |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| MC SMF |  | $9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$ | $10,5 \pm 1 \mu\text{m}$ | OVD |
| NZDS SMF |  | $6,64 \mu\text{m}^*$ | $8,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$ | MCVD |

* pomiar – rozdział 4.

Bez procesu optymalizacji, mającego na celu dopasowanie pól modowych, teoretyczne tłumienie takiego połączenia (5.15) wynosi $A_s|_{1310 \text{ nm}} = 0,454 \text{ dB}$

i $A_s|_{1550 \text{ nm}} = 0,214 \text{ dB}$, a jednokierunkowe reflektometryczne tłumienia (5.13),

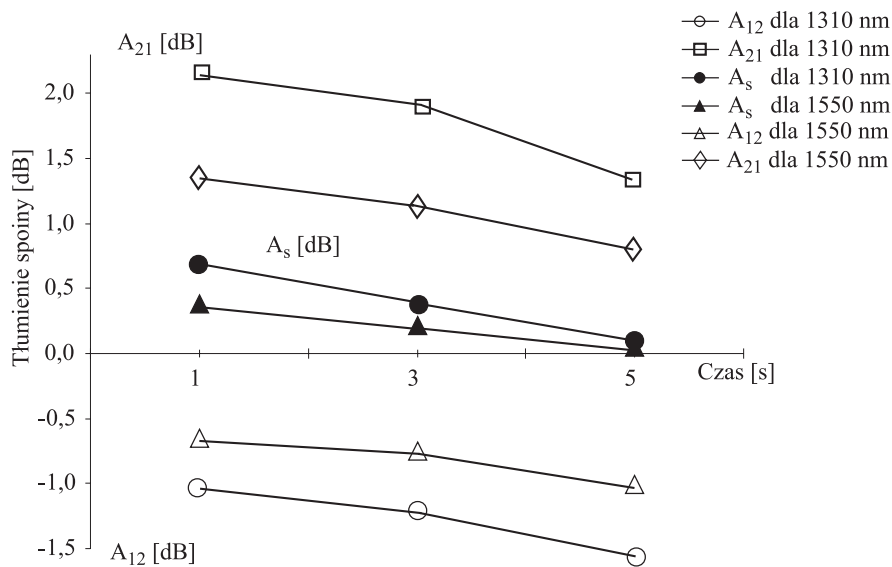
(5.14): $A_{12}|_{1310 \text{ nm}} = -0,962 \text{ dB}$, $A_{21}|_{1310 \text{ nm}} = 1,87 \text{ dB}$, $A_{12}|_{1550 \text{ nm}} = -0,755 \text{ dB}$

i $A_{21}|_{1550 \text{ nm}} = 1,183 \text{ dB}$.

Optymalizacja procesu zgrzewania światłowodów istotnie różniących się parametrami polega na zwiększaniu prądu (temperatury) lub czasu zgrzewania albo obydwu parametrów równocześnie [32, 63, 96] – w stosunku do prądów i czasów zgrzewania światłowodów standardowych SMF. Celem zwiększania czasu i prądu zgrzewania jest rozdyfundowanie domieszki rdzeniowej w łączonych włóknach, tak aby wyrównać

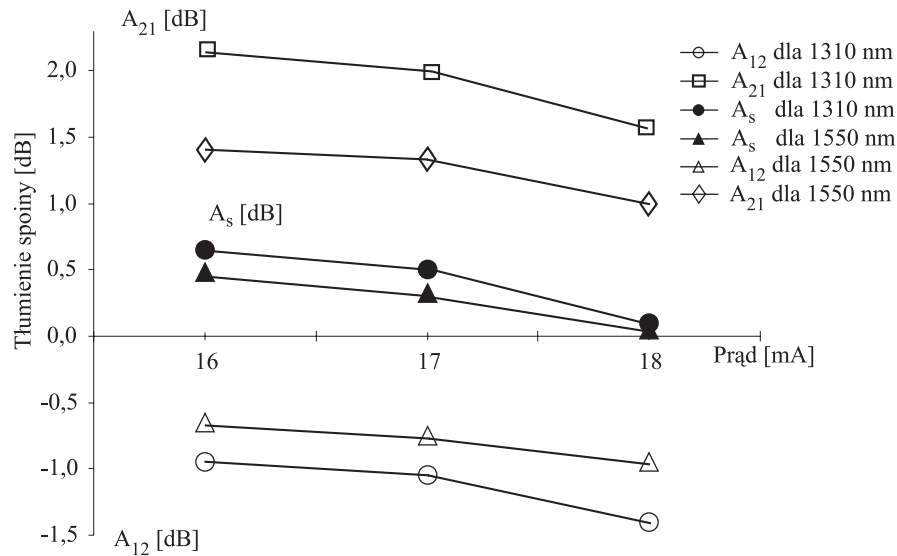
promienie pól modowych W_1 i W_2 w obrębie spoiny – rozdział 3. Bardziej bezpieczne jest jednak tylko wydłużanie czasu zgrzewania, gdyż zwiększanie prądu powoduje wzrost temperatury i może doprowadzić do stopienia a nie zespolenia włókien.

Proces zgrzewania spawarką FSU 925RTC Ericsson optymalizowano, zmieniając czas – rysunek 6.1 – lub prąd zgrzewania zasadniczego – rysunek 6.2. Czas zgrzewania zmieniano od 1 do 5 s przy prądzie 17 mA – rysunek 6.1, co odpowiada temperaturze zgrzewania $\approx 2000^\circ\text{C}$ [32, 96].



Rys. 6.1. Zależność tłumienia (pomiar reflektometryczny) spoin światłowodów MC-SMF ($2W_1|_{1310\text{ nm}} = 9,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$, $2W_1|_{1550\text{ nm}} = 10,5 \pm 1 \mu\text{m}$) i NZDS-SMF typu TrueWave ($2W_2|_{1310\text{ nm}} \approx 6,7 \mu\text{m}$, $2W_2|_{1550\text{ nm}} = 8,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$) od czasu zgrzewania – spawarka Ericsson 925RTC; prąd zgrzewania $I = 17\text{ mA}$, stosowano reflektometr Exfo FCS-100 [wyniki własne]

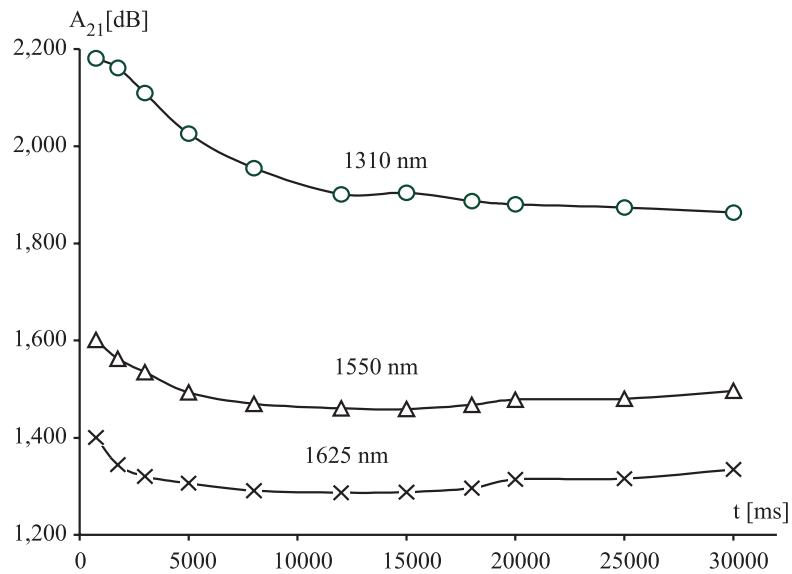
Zastosowany zakres czasu spajania zawierał warunki optymalizacji procesu dyfuzji dla współczynników dyfuzji z przedziału $D = 10^{-12} \div 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ – punkt 3.5.6. Wyniki dla każdej spoiny są średnią z 4 prób zgrzewania – rysunki 6.1 i 6.2. W drugim przypadku prąd łuku zmieniano od 15 do 18 mA, a czas zgrzewania wynosił 2 sekundy – rysunek 6.2. Stosując spawarkę Furukawa S175, zmieniano czas zgrzewania bez zmiany prądu zgrzewania zasadniczego, gdyż w tym przyrządzie nie ma możliwości zmiany prądu. Czasy zgrzewania, przy których następuje zmniejszenie tłumienia spoiny są tutaj większe – rysunki 6.3÷6.5, odpowiada to warunkom symulacji dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 5 \times 10^{-14} \div 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, tj. dla niższej temperatury spajania ($\approx 1900^\circ\text{C}$) – punkt 3.5.6.



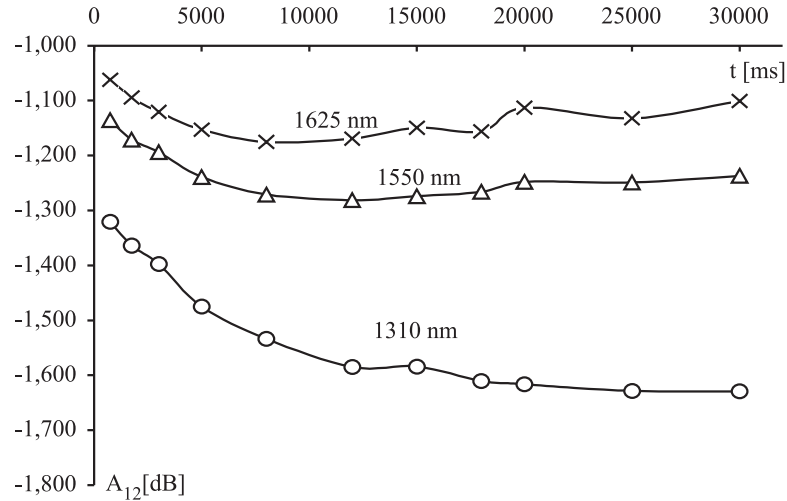
Rys. 6.2. Zależność tłumienia (pomiar reflektometryczny) spoin światłowodów MC-SMF ($2W_1|_{1310\text{ nm}} = 9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$, $2W_1|_{1550\text{ nm}} = 10,5 \pm 1 \mu\text{m}$) i NZDS-SMF typu TrueWave ($2W_2|_{1310\text{ nm}} \approx 6,7 \mu\text{m}$, $2W_2|_{1550\text{ nm}} = 8,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$) od prądu zgrzewania – spawarka Ericsson 925RTC, czas zgrzewania $t = 2$ s, stosowano reflektometr Exfo FCS-100 [wyniki własne]

6.2.1. Reflektometryczna metoda oceny procesu optymalizacji

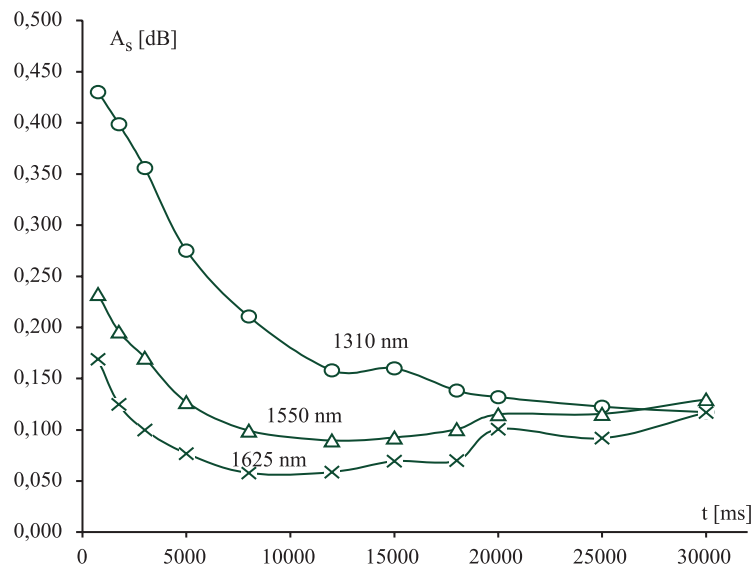
Na rysunkach 6.3 i 6.4 przedstawiono pomiary jednokierunkowego tłumienia A_{12} i A_{21} spoin światłowodów NZDS SMF – MC SMF w funkcji czasu zgrzewania, a na rysunku 6.5 tłumienia rzeczywistego A_s dla tychże czasów zgrzewania. Wyniki, dla każdej spoiny, są średnią z 10 prób zgrzewania. Odpowiada to przypadkom teoretycznym łączenia **I.2 (II.2)** przedstawionym w punkcie 5.1.2. Pomiary wykonano reflektometrem MW9076D/D1 firmy Anritsu dla trzech długości pomiarowych: $\lambda = 1310$ nm, $\lambda = 1550$ nm, $\lambda = 1625$ nm. Pomiary dla trzech długości fal – rysunki 6.3÷6.5 potwierdzają analizę teoretyczną, tj. przypadki **I.2 (II.2)**, zmniejszanie się tłumienia A_{12} , A_{21} i A_s wraz ze wzrostem długości fali dla tego typu światłowodów, to samo dotyczy wyników przedstawionych na rysunkach 6.1 i 6.2.



Rys. 6.3. Zależność jednokierunkowego tłumienia A_{21} (dla trzech długości fal pomiarowych) spoin światłowodów NZDS SMF – MC SMF od czasu zgrzewania – spawarka Furukawa S175, pomiary wykonano reflektometrem MW9076D/D1 firmy Anritsu [wyniki własne]



Rys. 6.4. Zależność jednokierunkowego tłumienia A_{12} (dla trzech długości fal pomiarowych) spoin światłowodów NZDS SMF – MC SMF od czasu zgrzewania – spawarka Furukawa S175, pomiary wykonano reflektometrem MW9076D/D1 firmy Anritsu [wyniki własne]



Rys. 6.5. Zależność rzeczywistego tłumienia A_s (dla trzech długości fal pomiarowych) spoin światłowodów NZDS SMF – MC SMF od czasu zgrzewania – spawarka Furukawa S175 [wyniki własne]

Rzeczywiste tłumienie spoin A_s , w określonym zakresie czasu i prądu, maleje wraz ze wzrostem czasu – rysunki 6.1, 6.5 – i prądu zgrzewania – rysunek 6.2. Teoretycznie oznacza to dopasowanie pól modowych łączonych włókien wskutek rozdyfundowania domieszki, natomiast tłumienie obszaru TRD wynikające ze wzrostu jego rozmiarów poprzecznych rośnie.

Jednoznacznym dowodem na to, że w procesie optymalizacji, (wydłużanie czasu i zwiększanie prądu zgrzewania), dochodzi do dopasowania promieni pól modowych $W_1 \leftrightarrow W_2$, są powtarzające się wyniki przebiegów jednokierunkowych pomiarów tłumienia A_{12} i A_{21} w funkcji czasu zgrzewania – rysunki 6.3 i 6.4. Podobny przebieg mają pomiary jednokierunkowe przedstawione na rysunkach 6.1 i 6.2 – zależności A_{12} i A_{21} od prądu zgrzewania. Otóż można zauważyć, że $A_{21}^{(+)}$ (dodatnie) maleje, a $A_{12}^{(-)}$ (ujemne) rośnie ze wzrostem czasu zgrzewania – rysunki 6.1, 6.3÷6.4 – i prądu zgrzewania – rysunek 6.2.

Dla prostego styku, bez obszaru przejściowego, A_{12} i A_{21} opisują wyrażenia (5.13)

i (5.14) – podrozdział 5.1. W tych wyrażeniach składniki: $10 \log \frac{n_2}{n_1} + 10 \log \frac{W_2}{W_1}$ dla A_{12}

i $10 \log \frac{n_1}{n_2} + 10 \log \frac{W_1}{W_2}$ dla A_{21} wynikają z metody pomiarowej i nie mogą podlegać

optymalizacji, gdyż zależą od rozpraszania wstecznego w użytych do zgrzewania świa-

łowodach – podrozdział 5.1: wyrażenia (5.6), (5.7), (5.11). Zmieniają się tylko składniki wynikające ze sprzężenia mocy optycznej pomiędzy łączonymi światłowodami, tj. $20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right]$, lub $20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right)$ w przypadku przesunięcia osi łączonych włókien, tak dla A_{12} , jak i dla A_{21} .

W przypadku analizy reflektometrycznych pomiarów spoiny TRD należy dodatkowo uwzględnić transmisyjne straty wynikające z wymiarów dyfuzyjnego obszaru przejściowego:

$$A_{12} = 10 \log \frac{n_2}{n_1} + 10 \log \frac{W_2}{W_1} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) + C_{12} \quad (6.1)$$

$$A_{21} = 10 \log \frac{n_1}{n_2} + 10 \log \frac{W_1}{W_2} + 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) + C_{21} \quad (6.2)$$

$$A_s = \frac{A_{12} + A_{21}}{2} = 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) + C \quad (6.3)$$

gdzie:

C_{12} – zawsze dodatnia transmisyjna strata w pomiarze z kierunku 1 do 2,

C_{21} – zawsze dodatnia transmisyjna strata w pomiarze z kierunku 2 do 1,

$$C = \frac{C_{12} + C_{21}}{2} = -10 \log T_f \quad (3.62) \text{ stąd } A_s = A_\alpha - 10 \log T_f.$$

Zatem jeżeli (tak jak na rysunkach 6.1 i 6.4) $|A_{12}^{(-)}|$ rośnie (na rysunku 6.4, dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$, w pełnym zakresie zastosowanych czasów, a dla $\lambda = 1550 \text{ nm}$ i $\lambda = 1625 \text{ nm}$ od 750 do 15000 ms) oznacza to, że ponieważ $10 \log \frac{n_2}{n_1} + 10 \log \frac{W_2}{W_1}$ pozostaje stałe, ujemne, to zawsze dodatnie $20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + C_{12}$ lub

$20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) + C_{12}$ w przypadku przesunięcia osi, musi

maleć. A to z kolei oznacza, że $\frac{W_1}{W_2}$ dąży do jedynki – następuje dopasowanie pól modowych.

W wyniku rozdyfundowania domieszki rdzeniowej W_1 dąży do W_2 , ale równocześnie zwiększają się promienie pól modowych w obrębie spoiny, co powoduje, że

$4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right)$ (jeżeli występuje przesunięcie osi łączonych włókien) również maleje.

Wniosek o dopasowaniu promieni pól modowych wzmacnia fakt, że dodatnie C_{12} rośnie wraz z czasem dyfuzji, gdyż wtedy zwiększają się wymiary poprzeczne obszaru TRD.

Równocześnie dodatnie $A_{21}^{(+)}$ maleje (na rysunku 6.3 dla $\lambda = 1310$ nm w pełnym zakresie zastosowanych czasów, dla $\lambda = 1550$ nm i $\lambda = 1625$ nm od 750 do

15000 ms) – rysunki 6.1 i 6.3. Ponieważ $10 \log \frac{n_1}{n_2} + 10 \log \frac{W_1}{W_2}$ pozostaje stałe dodat-

nie, więc musi maleć zawsze dodatnie $20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + C_{21}$ lub

$20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\frac{W_1}{W_2} + \frac{W_2}{W_1} \right) \right] + 4,34 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) + C_{21}$ w przypadku przesunięcia osi łączo-

nych włókien. Jest to jednoznaczne z tym, że $\frac{W_1}{W_2}$ dąży do jedynki – następuje dopasowanie pól modowych.

Tak jak powyżej wniosek o dopasowaniu promieni pól modowych wzmacnia fakt, że dodatnie C_{12} rośnie wraz z czasem dyfuzji, gdyż wtedy zwiększają się wymiary poprzeczne obszaru TRD.

Wzrost tłumienia przy przekroczeniu czasu zgrzewania ok. 15000 milisekund dla $\lambda = 1550$ nm i $\lambda = 1625$ nm, przy równoczesnym wejściu w nasycenie tłumienia dla $\lambda = 1310$ nm – rysunek 6.5, jest spowodowany, zdaniem autora, wpływem ujawniających się defektów i zaburzeń konstrukcji włókna, które mogą powstawać w płaszczu przy długim czasie zgrzewania. Przy wzroście λ rośnie pole modu i dlatego zaburzenia w płaszczu zwiększają tłumienie połączenia dla większych długości fal pomiarowych. Jest to również wskaźnik oceny jakości spoiny i sygnał do zaprzestania zwiększania czasu lub prądu zgrzewania.

Dla wszystkich długości fal pomiarowych czasy zgrzewania, przy których następuje zmniejszanie tłumienia spoin, są dla spawarki Furukawa S175 znacznie większe (ok. 15000 ms) – rysunki 6.3÷6.5 niż dla spawarki FSU 925RTC – rysunek 6.1. Odpowiada to teoretycznym warunkom symulacji łączenia włókien NZDS SMF (DS SMF) – MC SMF dla współczynników dyfuzji z zakresu $D = 5 \times 10^{-14} \div 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, tj. dla niższej temperatury spajania ($\approx 1900^\circ\text{C}$) – rysunek 3.31 (punkt 3.5.6). Stąd należy wnosić,

że temperatura zgrzewania w spawarce Furukawa S175 wynosi $\approx 1900^{\circ}\text{C}$. W celu porównania wyników symulacji łączenia, opierających się na obliczeniach i ekstrapolacji współczynników dyfuzji oraz ocenie długości obszaru przejściowego $2L$ (uzyskanych za pomocą obrazów termoluminescencji w temperaturze $\approx 2000^{\circ}\text{C}$ – spawarka FSU 925RTC – punkty 3.5.1, 3.5.2 i 3.5.6) z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi przy zastosowaniu spawarki Furukawa S175, w tabeli 6.4 przedstawiono zestawienie wyników teoretycznych i eksperymentalnych strat w spoinach podczas termicznego łączenia włókien NZDS SMF (DS SMF) – MC SMF.

Tabela 6.4. Zestawienie teoretycznych: A_{α} , $-10 \log T_f$, $\Sigma = A_{\alpha} - 10 \log T_f$ ($\lambda = 1310 \text{ nm}$, $t \approx 1900^{\circ}\text{C}$, $D = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ dla NZDS SMF i DS SMF, $D = 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ dla MC SMF) i eksperymentalnych A_s – rysunek 6.5 – wyników tłumienia spoin

| Czas łączenia [ms] | A_{α} (3.55) [dB] | $-10 \log T_f$ (3.62) [dB] | $\Sigma = A_{\alpha} - 10 \log T_f$ (3.67) [dB] | A_s – rysunek 6.5 [dB] |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| 750 | 0,396 | 0,000023 | 0,396 | 0,435 |
| 1750 | 0,372 | 0,00013 | 0,372 | 0,391 |
| 3000 | 0,344 | 0,00040 | 0,344 | 0,350 |
| 5000 | 0,302 | 0,0012 | 0,303 | 0,275 |
| 8000 | 0,247 | 0,0035 | 0,250 | 0,211 |
| 12000 | 0,187 | 0,0090 | 0,196 | 0,158 |
| 15000 | 0,150 | 0,016 | 0,166 | 0,160 |
| 18000 | 0,118 | 0,026 | 0,144 | 0,138 |
| 20000 | 0,100 | 0,035 | 0,135 | 0,129 |
| 25000 | 0,064 | 0,064 | 0,128 | 0,123 |
| 30000 | 0,037 | 0,107 | 0,144 | 0,125 |
| 35000 | 0,019 | 0,168 | 0,187 | – |
| 40000 | 0,0075 | 0,25 | 0,257 | – |
| 50000 | 0,000038 | 0,492 | 0,492 | – |

Wyniki eksperymentalne tłumienia A_s wykazują dobrą korelację z wynikami symulacji dla $\Sigma = A_{\alpha} - 10 \log T_f$. Minimum tłumienia, dla $\lambda = 1310 \text{ nm}$, uzyskuje się w eksperymencie i symulacji dla tego samego czasu dyfuzji, tj. 25000 milisekund, a różnica uzyskanych wartości tłumienia w tym punkcie wynosi 0,005 dB. Biorąc pod uwagę fakt, że czułość pomiarów reflektometrycznych wynosiła 0,02 dB, wynik dla minimum tłumienia można uznać za identyczny.

Dla analizowanych wzrostów czasów łączenia – tabela 6.4 – charakterystyczny jest również wzrost transmisyjnego tłumienia $-10 \log T_f$, z równoczesnym spadkiem tłumienia A_{α} związanym z dopasowaniem promieni pól modowych. Było to już przedstawione na wykresach w punktach 3.5.5 i 3.5.6.

Zgodność i korelacja wyników teoretycznych (opartych na danych eksperymentalnych uzyskanych za pomocą spawarki FSU 925RTC) i eksperymentalnych wyników zgrzewania dla spawarki Furukawa S175 – tabela 6.4 – świadczy również o tym, że uzyskane teoretyczne wyniki optymalizacji tłumienia spoin (przedstawione w podrozdziale 3.5) nie są konsekwencją doboru sprzętu, a mają charakter ogólny.

6.3. Wpływ warunków klimatycznych na termiczne łączenie włókien

Istotne dla praktyki połączeń spajanych są warunki klimatyczne, w jakich wykonywany jest ten proces. Opisane w podrozdziałach 6.1 i 6.2 procesy optymalizacji zgrzewania odbywały się w warunkach laboratoryjnych, gdzie temperatura zmieniała się w zakresie $t = 18 \div 24^\circ\text{C}$, a wilgotność względna powietrza $\text{RH} = 30 \div 70\%$. W praktyce zdarza się wykonywać połączenia w warunkach odbiegających od laboratoryjnych, dlatego autor przeprowadził badania zgrzewania światłowodów w takich warunkach [64].

Spajanie przeprowadzano w komorze klimatycznej, zmieniając temperaturę w zakresie $t = -2 \div 32^\circ\text{C}$ i wilgotność względną $\text{RH} = 70 \div 92\%$. Stosowano spawarkę Ericsson 925RTC i programy automatycznego oraz optymalizowanego (podrozdział 6.2) – dla światłowodów istotnie różniących się promieniami rdzeni i aperturami numerycznymi – zgrzewania. Wyniki pomiarów tłumienia spoin dla programów standardowych i programów optymalizowanych przedstawiono w tabeli 6.5. Pomiary tłumienia spoin wykonano za pomocą reflektometru Exfo FCS-100. Ponieważ niezwykle trudno było uzyskać wysoką stabilność wilgotności i temperatury otoczenia podczas spajania (w komorze znajdował się autor, szpule ze światłowodami, przyrządy do zgrzewania i pomiarów reflektometrycznych), dlatego w tabeli 6.5 przy każdym wyniku tłumienia określono warunki klimatyczne.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można sformułować praktyczny wniosek.

Wzrost tłumienia spoin jest spowodowany przede wszystkim dużą wilgotnością powietrza $\text{RH} > 90\%$ – przy niskich temperaturach: $t = -2 \div 1^\circ\text{C}$. Najlepiej charakteryzuje to odległość temperatury punktu rosy od temperatury otoczenia podczas procesu spajania. Jeżeli ta odległość jest mniejsza niż $1 \div 2^\circ\text{C}$, to spoiny wykazują duże tłumienie – rzędu 0,2 dB – niezależnie od stosowanych programów zgrzewania.

6.3.1. Badania wytrzymałości mechanicznej spoin na zrywanie

Opracowane przez autora warunki optymalizacji zgrzewania światłowodów różnych typów istotnie zmieniały parametry spajania standardowego, należało więc wykonać pomiary wytrzymałości mechanicznej tych spoin. Zgodnie z [151] wytrzymałość mechaniczna spoin na zrywanie powinna wynosić $F \geq 5 \text{ N}$.

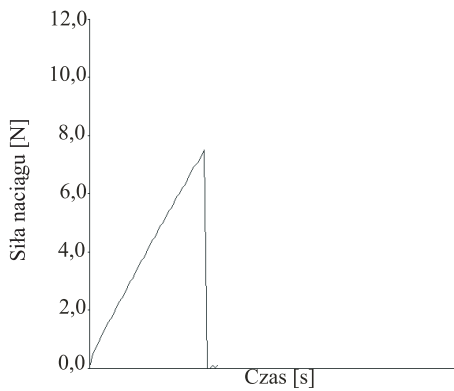
Pomiary wytrzymałości mechanicznej na zrywanie przeprowadzono dla połączeń spajanych przedstawionych w podrozdziałach 6.1÷6.3, tak dla programów standardowych, jak i opracowanych przez autora. Przykładowe wyniki pomiarów wytrzymałości mechanicznej na zrywanie tych spoin zaprezentowano na rysunkach 6.6 a÷6.6 f.

Do badań użyto zrywarkę EFR 100 firmy Ericsson sprzężonej z systemem komputerowym pozwalającym na wizualizację pomiaru.

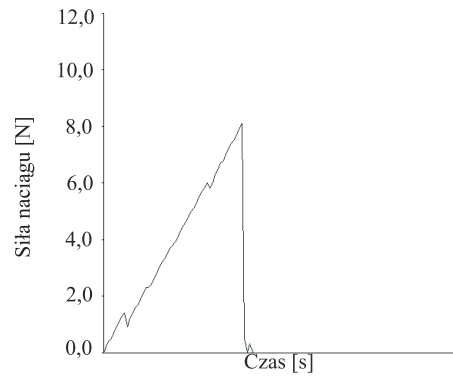
Tabela 6.5. Wyniki reflektometrycznych pomiarów tłumienia spoin wykonanych programami standardowymi oraz optymalizowanymi [wyniki własne]

| Typy włókien | λ | | MC-SMF Siecor (OVD) | | MC-SMF Fiber Optics (OVD) | | MC-SMF Fujikura (VAD) | | MC-SMF Lycom (MCVD) | | NZDS-SMF Lucent Tech. (MCVD) TrueWave® | |
|-------------------------------------------|-----------|-------|------------------------|--------|------------------------------|-------|--------------------------|------|------------------------|------|-------------------------------------------------|--|
| | [nm] | [dB] | t , RH | [dB] | t , RH | [dB] | t , RH | [dB] | t , RH | [dB] | t , RH | |
| MC-SMF Siecor (OVD) | 1310 | – | | 0,035 | 16°C | 0,24 | –2°C | – | – | 0,22 | 6,5°C | |
| | 1550 | – | | 0,05 | 70% | 0,19 | 91,8% | – | – | 0,07 | 90% | |
| MC-SMF Fiber Optics (OVD) | 1310 | 0,04* | 1,6°C | 0,12 | 0,5°C | 0,05 | 18°C | 0,01 | 17°C | 0,22 | 10°C | |
| | 1550 | 0,04* | 70% | 0,18 | 92% | 0,01 | 82% | 0,02 | 80% | 0,06 | 91% | |
| MC-SMF Fujikura (VAD) | 1310 | 0,22* | –2°C | 0,015* | 28°C | – | | – | – | 0,15 | 30°C | |
| | 1550 | 0,21* | 91,8% | 0,06* | 80% | – | | – | – | 0,07 | 81% | |
| MC-SMF Lycom (MCVD) | 1310 | – | | 0,01 | 17°C | – | | – | – | – | | |
| | 1550 | – | | 0,03 | 80% | – | | – | – | – | | |
| NZDS-SMF Lucent Tech. TrueWave® (MCVD) | 1310 | 0,11* | 6,5°C | 0,04* | 10°C | 0,08* | 32°C | – | – | – | | |
| | 1550 | 0,07* | 90% | 0,04* | 91% | 0,07* | 70% | – | – | – | | |

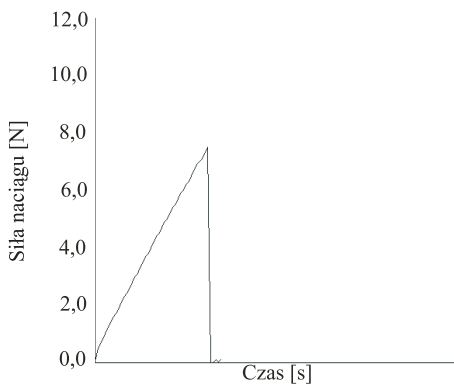
* program optymalizowany



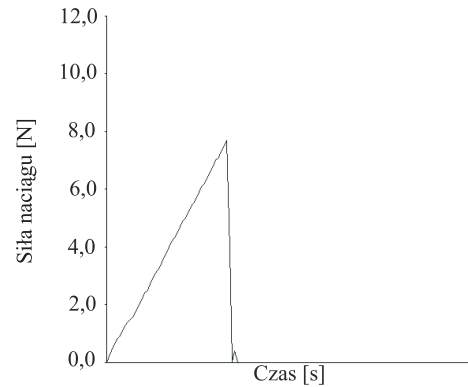
a) MC-SMF (OVD) – MC-SMF (OVD)
program standardowy ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA)
RH = 92%; $t = 0,5^{\circ}\text{C}$



b) NZDS TrueWave – MC-SMF (OVD)
program optymalizowany ($t = 5$ s, $I = 17$ mA)
RH = 90%; $t = 6,5^{\circ}\text{C}$



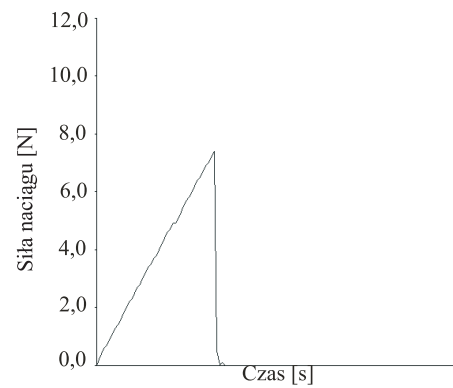
c) MC-SMF (OVD) – DS-SMF (MCVD)
program standardowy ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA)
RH = 89%; $t = 17,7^{\circ}\text{C}$



d) NZDS TrueWave – MC-SMF (OVD)
program standardowy ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA)
RH = 91%; $t = 10^{\circ}\text{C}$



e) NZDS LEAF – NZDS TrueWave
program standardowy ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA)
RH = 53%; $t = 21^{\circ}\text{C}$



f) NZDS LEAF – NZDS TrueWave
program optymalizowany ($t = 5$ s, $I = 17$ mA)
RH = 53%; $t = 21^{\circ}\text{C}$

Rys. 6.6. Wyniki pomiarów wytrzymałości mechanicznej na zrywanie wybranych spoin [wyniki własne]

Wytrzymałość mechaniczna na zrywanie wszystkich spoin otrzymanych programami standardowymi i optymalizowanymi, dla laboratoryjnych i „ekstremalnych” warunków klimatycznych, jest $F \geq 5$ N. Nie stwierdzono wpływu technologii wykonania włókien na wytrzymałość mechaniczną na zrywanie spoin. Wskazuje to również na jednolitość struktury SiO_2 w obrębie spoin i potwierdza badania strukturalne spoin metodą dyfrakcji rentgenowskiej przeprowadzone przez Petykiewicza i innych [152], w których nie stwierdzono wtrąceń odrębnych od struktury amorficznej SiO_2 w spoinach otrzymanych przy dużych poziomach wilgotności powietrza.

Nie wyjaśniono przyczyny istotnego zwiększenia tłumienia spoin wykonanych przy wilgotnościach powietrza zbliżonych do punktu rosy.

6.4. Mikroobserwacje i mikroanaliza dyfuzyjnych obszarów przejściowych

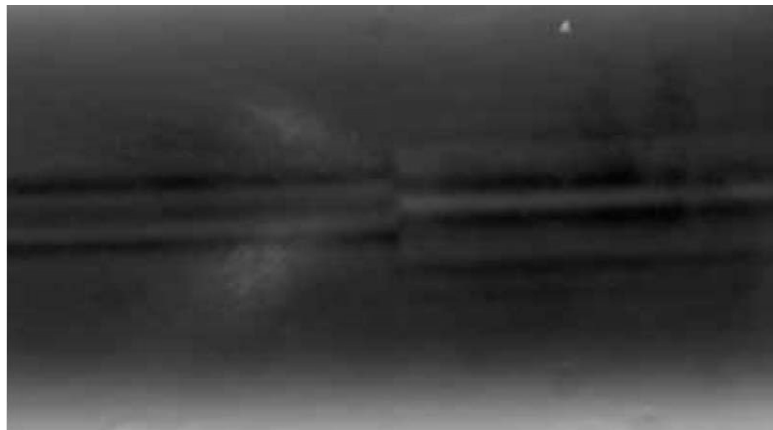
Analiza jednokierunkowych pomiarów reflektometrycznych, przedstawiona w punkcie 6.2.1 rozprawy wykazała, że w procesie optymalizacji dochodzi do wyrównania promieni półmodowych łączonych włókien. Jest to, oprócz obliczeń i symulacji procesów dyfuzji zaprezentowanych w rozdziale 3 rozprawy, potwierdzanie powstawania obszaru TRD.

Mikroobserwacje i mikroanaliza spoin mogły bezpośrednio dostarczyć informacji o wymiarach i składzie przejściowego obszaru TRD, a także wykazać ciągłość struktury w obrębie spoiny [153] i brak odrębnych od struktury amorficznej SiO_2 wtrąceń, dlatego autor podjął te istotne badania, współpracując z Instytutem Technologii Elektronowej (obecnie Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki) i Instytutem Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej [68, 76].

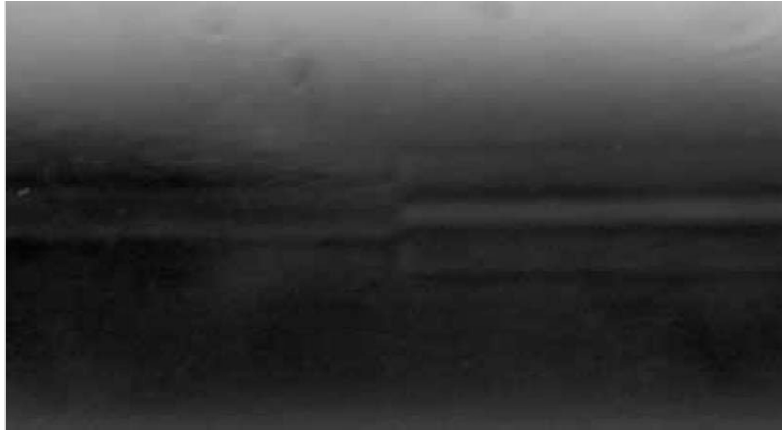
6.4.1. Badania mikroskopem optycznym i ich analiza

Wybrane mikroskopowe obrazy spoin i ich obróbkę cyfrową przedstawiono na rysunkach 6.7÷6.10.

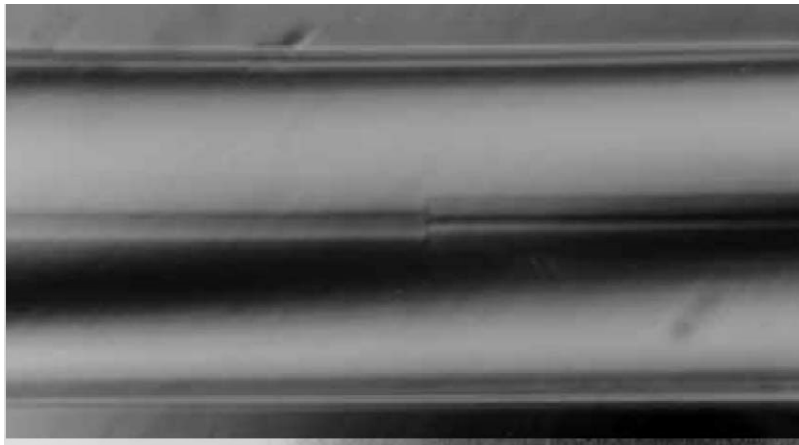
Obserwacje wykonano interferencyjno-polaryzacyjnym mikroskopem Bipolar PI.



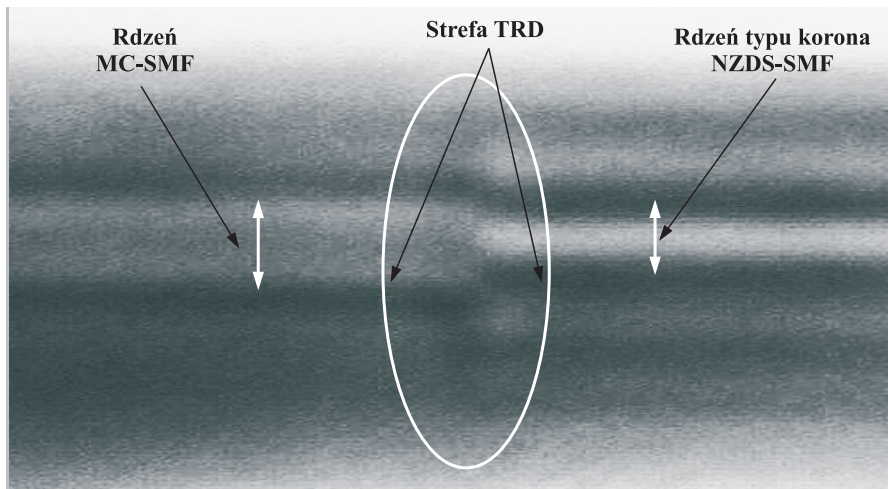
Rys. 6.7. Połączenie zgrzewane: prawy NZDS-SMF o profilu typu korona (MCVD) – lewy MC-SMF o skokowym profilu (OVD) – standardowe warunki spajania ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA) [wyniki własne]



Rys. 6.8. Połączenie zgrzewane: prawy NZDS-SMF o profilu typu korona (MCVD) – lewy MC-SMF o skokowym profilu (MCVD) – standardowe warunki spajania ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA) [wyniki własne]



Rys. 6.9. Połączenie zgrzewane – mikroskopowy obraz rdzeni: prawy NZDS-SMF o profilu typu korona (MCVD) – lewy DS-SMF (MCVD) – trójkątny o skokowym profilu współczynnika załamania – standardowe warunki spajania ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA) [wyniki własne]



Rys. 6.10. Obróbka cyfrowa zdjęcia dla połączenia zgrzewanego: prawy NZDS-SMF typu korona (MCVD) – lewy MC-SMF skokowy profil (OVD) – optymalizowane warunki spajania ($t = 5$ s, $I = 17$ mA) – wyraźna utrata ostrości w obszarze spoiny (TRD) może świadczyć o dyfuzji domieszki rdzeniowej [wyniki własne]

Obserwacje mikroskopowe spoin łączonych światłowodów potwierdzają dobrą centryczność połączeń oraz rdzeni względem płaszczy w stosowanych do badań światłowodach. Wyniki te są zgodne z przeprowadzonymi w rozdziale 4 badaniami centryczności rdzeni, w stosowanych do spajania światłowodach. Dla spoin wykonanych w optymalizowanych warunkach zgrzewania mikroskopowe obrazy i ich obróbka cyfrowa wykazały wyraźną utratę ostrości w obrębie TRD – rysunek 6.10 – i brak utraty ostrości dla standardowych warunków. Może to świadczyć o rozdyfundowaniu domieszki rdzeniowej w obrębie spoiny.






Obserwacje mikroskopem optycznym nie wykazały zmian strukturalnych w obrębie spoin.

6.4.2. Badania elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM), mikroanaliza rentgenowska

Obserwacje mikroskopem optycznym można uznać za zgrubne. Precyzyjne obserwacje i mikroanalizę składu spoin przeprowadzono mikroskopem skaningowym wyposażonym w spektrometr rentgenowski.

Do badań użyto spoin światłowodów przedstawionych w tabeli 6.6. Spoiny wykonywano standardowymi programami automatycznego spajania światłowodów jednomodowych i opracowanymi przez autora programami z optymalizacją parametrów.

Tabela 6.6. Typy włókien użytych do badań

| Numery włókien | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Parametry | MC-SMF Siecor (OVD) | MC-SMF Optical Fi- bres (OVD) | DC-SMF Lycom (MCVD) | MC-SMF Lycom (MCVD) | NZDS-SMF Lucent Technologies (MCVD) |
| Profil współczynnika załamania |  |  |  |  |  |
| Apertura numeryczna | ≈ 0,13 | 0,13 ÷ 0,14 | ≈ 0,13 | ≈ 0,13 | ≈ 0,15 |
| Średnica rdzenia 2a [μm] | ≈ 8,5 | ≈ 8,3 | ≈ 9,2 | ≈ 9,2 | ≈ 5,5 |

Wszystkie spoiny otrzymano w tzw. „pokojowych” warunkach klimatycznych, odpowiadających następującym parametrom: temperatura spajania $t = 21 \pm 3^\circ\text{C}$, względna wilgotność otoczenia $\text{RH} = 50 \pm 20\%$. Stosowano spawarkę FSU 925RTC.

Próbki spoin oznaczono $(X-Y)_Z$, gdzie X, Y numery włókien z tabeli 6.6, $Z = A_{\text{ut}}$ dla standardowych warunków zgrzewania światłowodów MC-SMF ($t = 2$ s, $I = 16,3$ mA) i $Z = O_{\text{pt}}$ dla optymalizowanych warunków zgrzewania ($t = 3 \div 5$ s, $I = 17$ mA), opracowanych na podstawie analizy procesów dyfuzji domieszki rdzeniowej – rozdział 3.

Przygotowanie próbek

Spoiny szlifowano w celu dojścia do ich obszaru rdzeniowego. Do szlifowania stosowano specjalny uchwyt umożliwiający precyzyjne usuwanie warstw materiału i utrzymanie płaskości powierzchni. Głębokość szlifowania kontrolowano zgrubnie za pomocą mikroskopu metalograficznego. Dokładnego sprawdzenia, czy przekrój przechodzi przez rdzeń, dokonywano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego JSM5800L firmy JEOL w modzie niskopróżniowym, umożliwiającym obserwacje izolatorów bez pokryć pierwotnych. Po dojściu do obszaru rdzeniowego próbkę wyjmowaną z uchwytu i polerowano ręcznie pastą diamentową.

Badania mikroskopowe

Obserwacje spoin i mikroanalizę rentgenowską ich składu wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego JSM5800L firmy JEOL (Japonia), wyposażonego w spektrometr rentgenowski EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*) – spektrometr z dyspersją energii – model ISIS300 firmy Oxford (Wielka Brytania). Detektor w spektrometrze wyposażony jest w ultracienkie okienko i umożliwia analizę pierwiastków lekkich.

Próbki badano w modzie niskopróżniowym – bez pokrycia przewodzącego – lub w modzie wysokopróżniowym po uprzednim pokryciu ich warstwą węgla poprzez naporowanie w napyłarce próżniowej.

Do obserwacji w obydwu przypadkach używano półprzewodnikowego detektora kontrastu materiałowego. Kontrast na próbce powstaje pomiędzy obszarami o różnym składzie chemicznym (pierwiastki cięższe dają większy sygnał i są jaśniejsze na zdjęciach). Kontrast pomiędzy rdzeniem a płaszczem jest bardzo mały (mała zawartość germanu w rdzeniu), stosowano więc bardzo duże wzmocnienie detektora, dlatego też na

zdjęciach widoczny jest również kontrast topograficzny. Obserwacje wykonano przy napięciu przyspieszającym 20 kV, w celu uzyskania wystarczająco silnego kontrastu.

Ciśnienie w komorze mikroskopu, w modzie niskopróżniowym wynosiło 45 Pa, a w modzie wysokopróżniowym około 10^{-2} Pa. Powietrze jonizowane przez wiązkę elektronową i elektrony emitowane z powierzchni próbki neutralizuje ujemny ładunek powstający w próbkach nieprzewodzących. Mikroanalizę rentgenowską wykonano na próbkach pokrytych węglem w modzie wysokopróżniowym. Stosowano napięcie przyspieszające 6 kV, które umożliwia efektywne wzbudzenie obserwowanych linii promieniowania rentgenowskiego (linie K dla Si i O oraz linia L dla Ge), znacznie mniejsza jest również niż przy 20 kV objętość, w jakiej rozpraszane są elektrony i generowane jest promieniowanie rentgenowskie. Przeprowadzano tylko mikroanalizę jakościową.

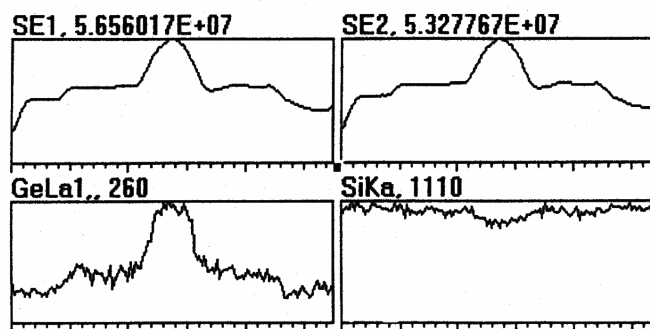
Wykonano głównie analizy w punktach – otrzymuje się wtedy widmo promieniowania rentgenowskiego w danym punkcie. Przeprowadzono również dla próbki nr (5-5)_{Aut} analizę rozmieszczenia Ge i Si wzdłuż przekroju włókna – rysunek 6.11 – oraz dla próbki nr (1-5)_{Opt} mapę rozmieszczenia Ge na powierzchni przekroju – rysunek 6.12. Koncentracja Ge jest mała i sygnał rentgenowski od niego jest bardzo słaby, stąd też analiza wzdłuż linii i mapy rozmieszczenia wychodzą słabo, tym niemniej wyraźnie widać rozmycie Ge w obrębie spoiny.

Dla próbek nr (1-2)_{Aut} – rysunek 6.13, nr (1-2)_{Opt} – rysunek 6.14, nr (5-5)_{Opt} – rysunek 6.15 wykonano zdjęcie tylko w modzie niskopróżniowym, dla próbki nr (1-3)_{Opt} – rysunek 6.16 – tylko w modzie wysokopróżniowym.

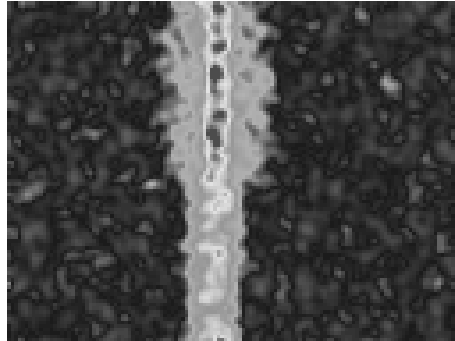
Dla próbek nr (5-5)_{Aut} – rysunek 6.17, nr (1-5)_{Opt} – rysunek 6.18, nr (1-4)_{Opt} – rysunek 6.19 wykonano zdjęcie w modzie niskopróżniowym oznaczone na rysunkach „stare” oraz po dodatkowym przepolerowaniu i pokryciu węglem w modzie wysokopróżniowym oznaczone na rysunkach „nowe”.

Rentgenowska mikroanaliza składu spoin

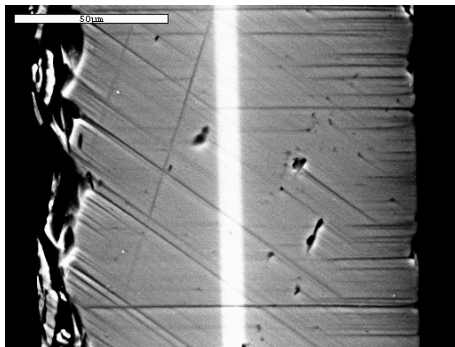
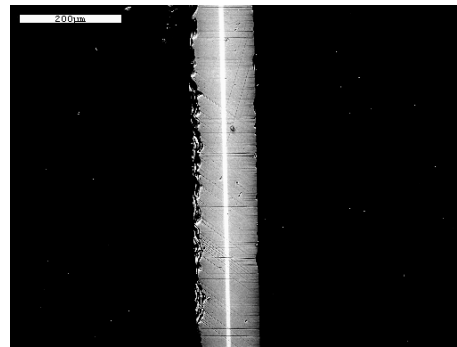
Mikroanalizy wykonano dla czterech próbek: nr (5-5)_{Aut} – rysunek 6.20, nr (1-5)_{Opt} – rysunek 6.21, nr (1-4)_{Opt} – rysunek 6.22, nr (1-3)_{Opt} – rysunek 6.23. Analizy punktowe wykonano w środku rdzeni łączonych włókien, na brzegu rdzenia oraz w płaszczu (rysunki 6.21÷6.22). Analiza ma charakter jakościowy, gdyż zgrubna czułość przyrządu wynosiła 1at%.



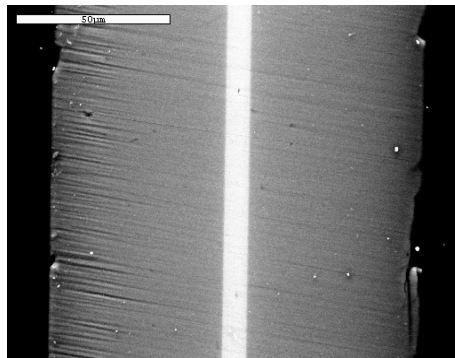
Rys. 6.11. Próбка (5-5)_{Aut} (tabela 6.6) – analiza rozmieszczenia Ge i Si wzdłuż przekroju włókna NZDS-SMF: SE1, SE2 – zmiany sygnału elektronowego, GeLa1 – zmiany intensywności promieniowania rentgenowskiego Ge, SiKa – zmiany intensywności promieniowania rentgenowskiego Si wzdłuż przekroju [wyniki własne]

Próbka (1-5)_{Opt}

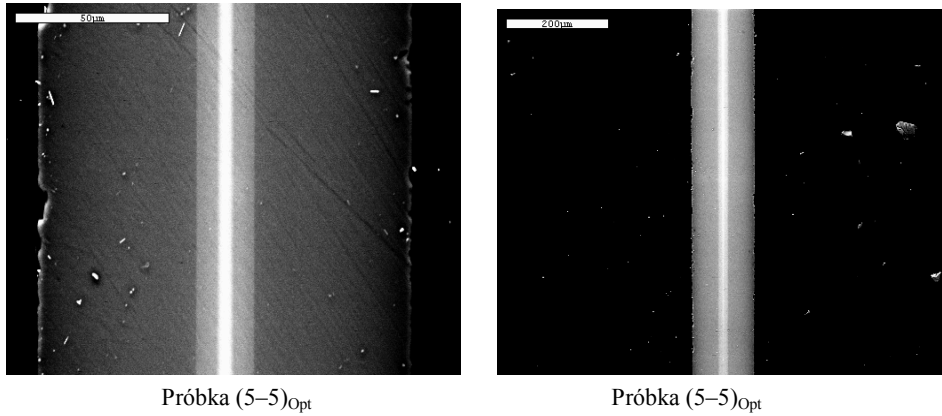
Rys. 6.12. Próbka (1-5)_{Opt} (tab. 6.6) – mapa rozmięszczenia Ge na powierzchni przekroju obszaru spoiny [wyniki własne]

Próbka (1-2)_{Aut}Próbka (1-2)_{Aut}

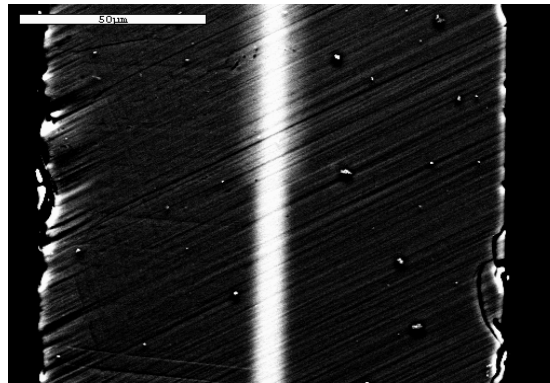
Rys. 6.13. Próbka (1-2)_{Aut} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia obszaru spoiny w modzie niskopróżniowym [wyniki własne]

Próbka (1-2)_{Opt}

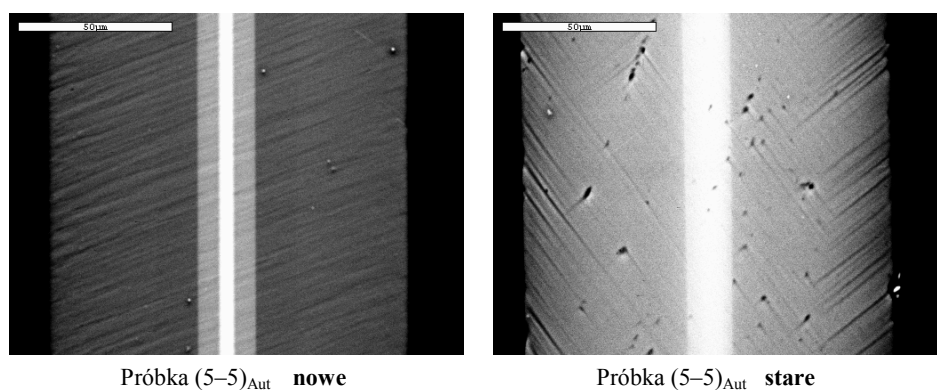
Rys. 6.14. Próbka (1-2)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia obszaru spoiny w modzie niskopróżniowym [wyniki własne]



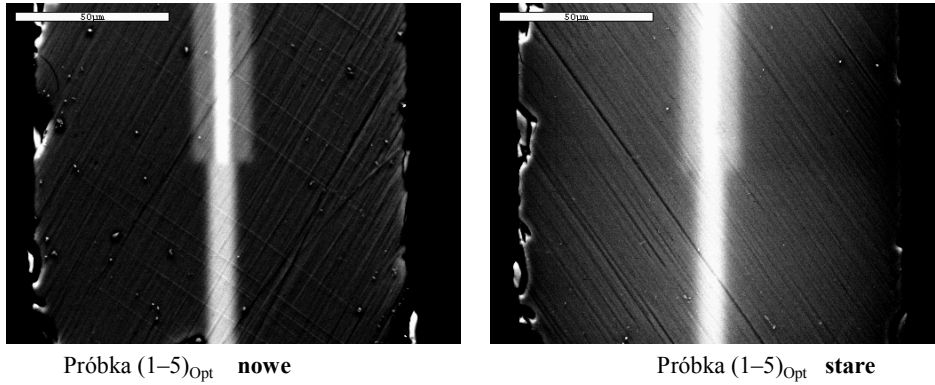
Rys. 6.15. Próbka (5-5)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia obszaru spoiny w modzie niskopróżniowym [wyniki własne]



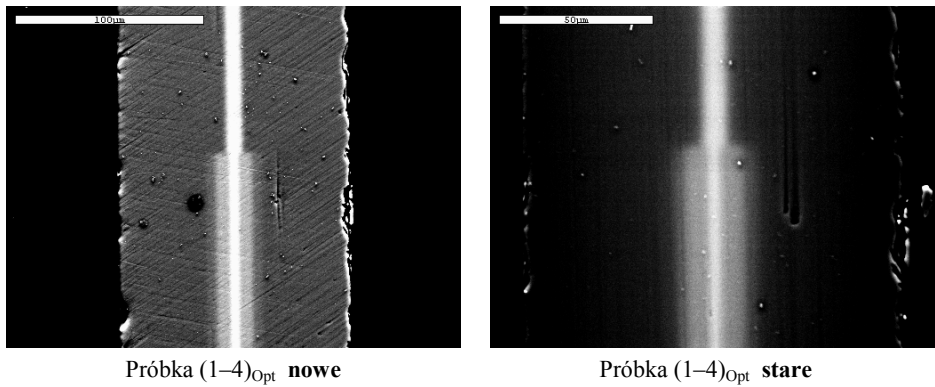
Rys. 6.16. Próbka (1-3)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia w modzie wysokopróżniowym [wyniki własne]



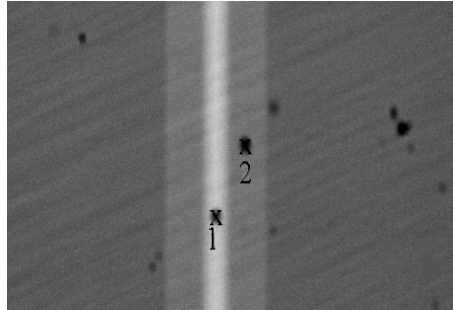
Rys. 6.17. Próbka (5-5)_{Aut} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia w modzie niskopróżniowym (stare) i wysokopróżniowym (nowe) [wyniki własne]



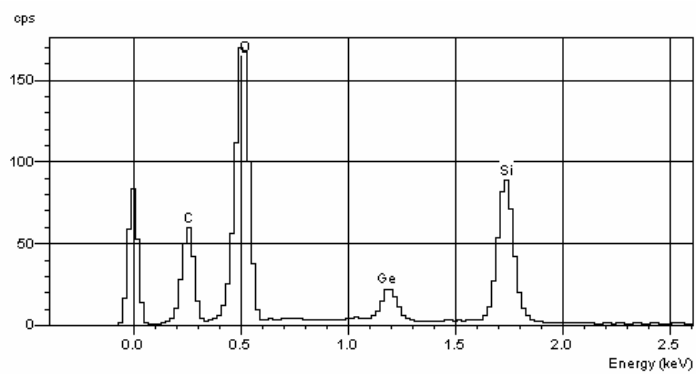
Rys. 6.18. Próbka (1-5)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia w modzie niskopróżniowym (stare) i modzie wysokopróżniowym (nowe) [wyniki własne]



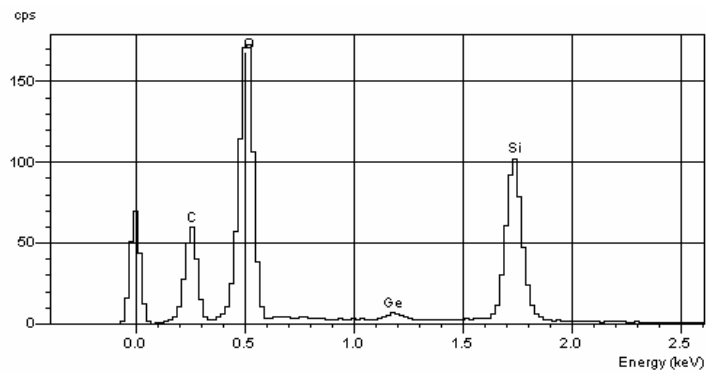
Rys. 6.19. Próbka (1-4)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroskopowe zdjęcia w modzie niskopróżniowym (stare) i modzie wysokopróżniowym (nowe) [wyniki własne]



Próbka (5-5)_{Aut} – miejsca mikroanalizy

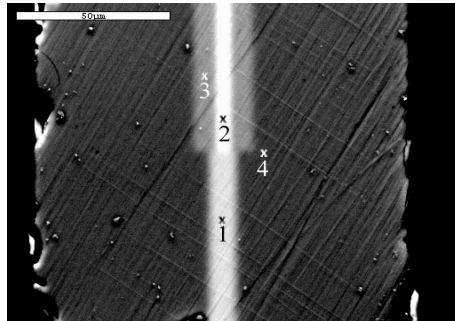


Próbka (5-5)_{Aut} – środek rdzenia (w miejscu 1)

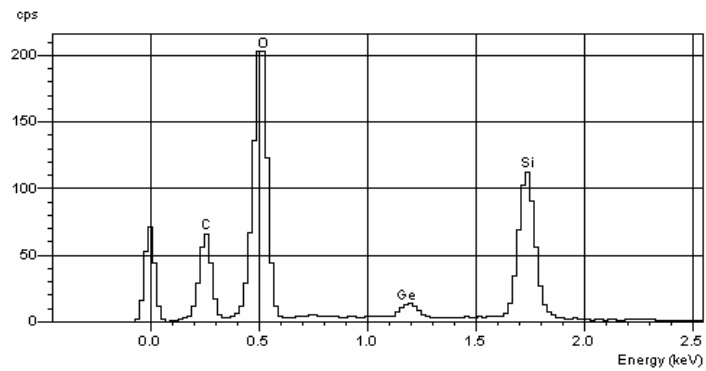


Próbka (5-5)_{Aut} – obok rdzenia (w miejscu 2)

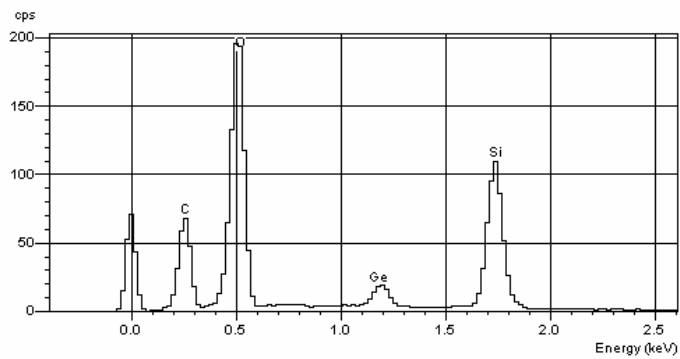
Rys. 6.20. Próbka (5-5)_{Aut} (tab. 6.6) – mikroanaliza składu w punktach zaznaczonych na zdjęciu (węgiel obecny w składzie pochodzi z pokrycia) [wyniki własne]



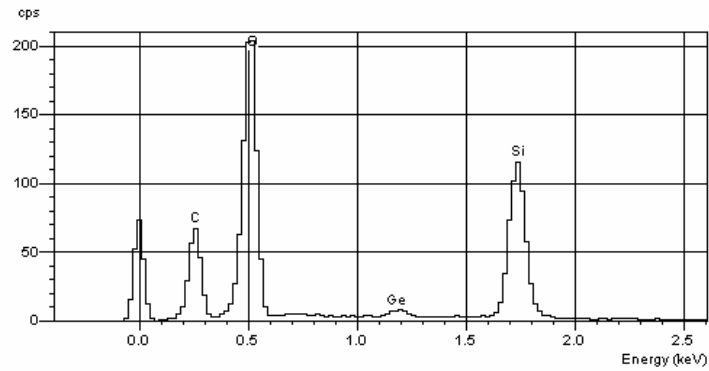
Próbka (1-5)_{Opt} – miejsca mikroanalizy



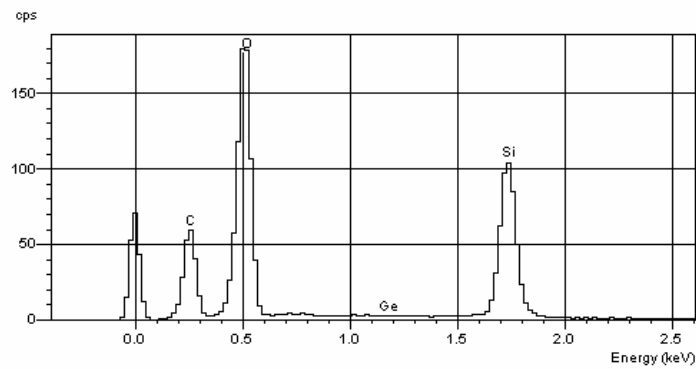
Próbka (1-5)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 1



Próbka (1-5)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 2

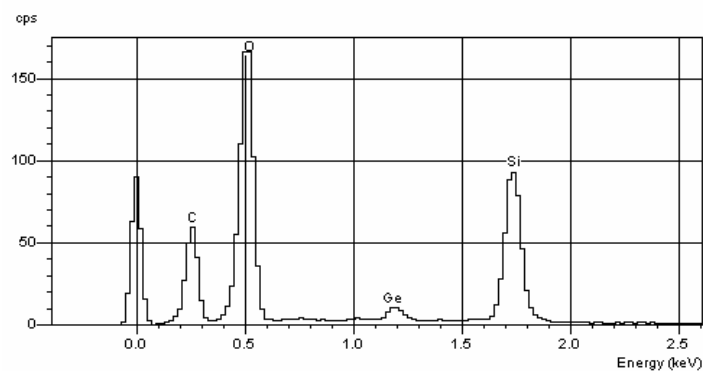


Próbka (1-5)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 3

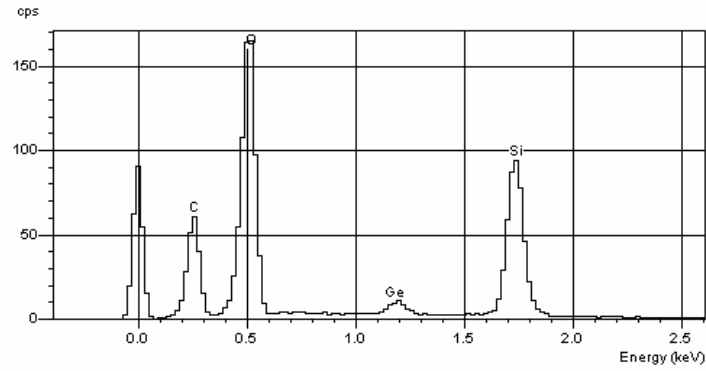
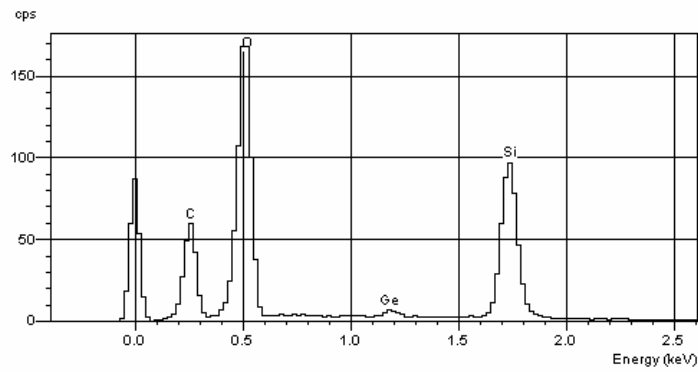
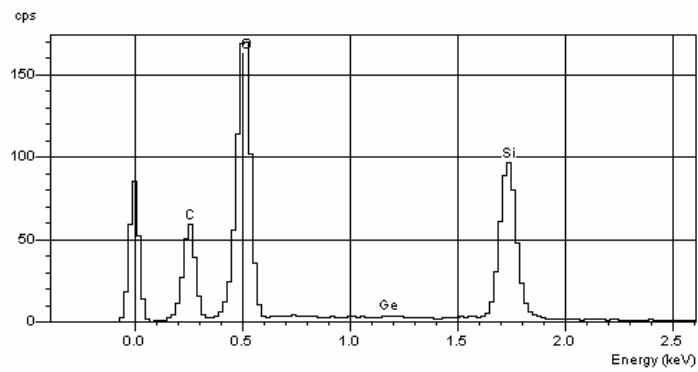


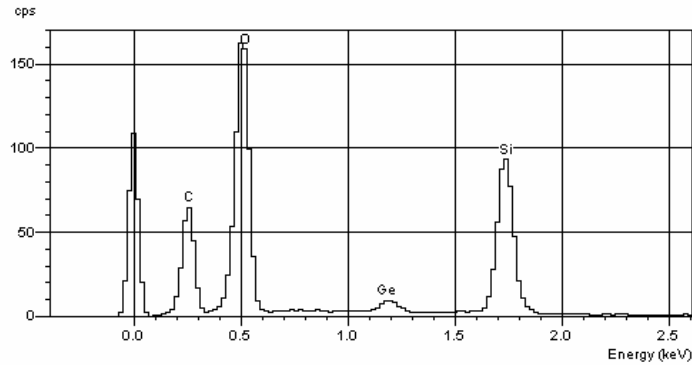
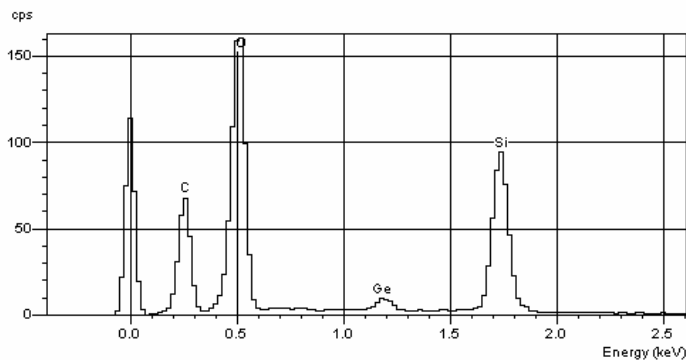
Próbka (1-5)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 4

Rys. 6.21. Próbka (1-5)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroanaliza składu w zaznaczonych punktach [wyniki własne]



Próbka (1-4)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 1

Próbka (1-4)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 2Próbka (1-4)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 3Próbka (1-4)_{Opt} – mikroanaliza w miejscu 4Rys. 6.22. Próbka (1-4)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroanaliza składu w punktach jak na rysunku 6.21 [wyniki własne]

Próbka (1-3)_{Opt} – mikroanaliza w rdzeniu DC-SMF LycomPróbka (1-3)_{Opt} – mikroanaliza w rdzeniu SMF SiecorRys. 6.23. Probka (1-3)_{Opt} (tab. 6.6) – mikroanaliza składu w środkach rdzeni łączonych włókien [wyniki własne]

Na podstawie obserwacji spoin za pomocą mikroskopów optycznego i skaningowego oraz mikroanalizy rentgenowskiej połączeń (szczególnie mapy rozmieszczenia Ge na powierzchni przekroju spoiny – rysunek 6.12 – można tylko jakościowo potwierdzić rozdyfundowanie GeO_2 w procesie termicznego łączenia.

Rentgenowska mikroanaliza składu w miejscu 4 – rysunek 6.21 – wykazała brak obecności Ge, a z obliczeń wynika, że powinien się tam znajdować – podrozdział 3.5. Przyczyną była dokładność identyfikacji pierwiastków w zastosowanej rentgenowskiej mikroanalizie składu, która wynosiła 1at%. Otóż, jeżeli przyjąć model dyfuzji z warstwy o grubości skończonej – podrozdział 3.5, określony współczynnik i czas dyfuzji, to można obliczyć koncentrację Ge w dowolnym punkcie światłowodu, w tym, w miejscu 4 na rysunku 6.21. Takzwane miejsce 4 znajduje się w odległości około 15 μm od środka rdzenia, w płaszczyźnie spoiny – rysunek 6.21, standardowego światłowodu MC-SMF (G.652) o $NA \approx 0,11$, tj. $N_0 = 6,79 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ – rysunek 3.13. Przyjmując maksymalny obliczony współczynnik dyfuzji $D = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ – punkt 3.5.2 i czas dyfuzji $t = 5 \text{ s}$, tj. czas spajania próbki (1-5)_{Opt}, na podstawie (3.77) otrzymuje się koncentrację Ge w miejscu 4: $N(r = 15 \mu\text{m}, t = 5 \text{ s}) = 1,93 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, co stanowi 0,0088at% zawartości Ge w SiO_2 . Jest to wielkość znacznie poniżej czułości metody, która wynosi 1at%.

Wyniki optymalizacji procesów zgrzewania połączeń światłowodów MC-SMF, DC-SMF, DS-SMF, NZDF-SMF o profilach współczynnika załamania skokowym, typu W, trójkątnym i typu korona wskazują, że możliwa jest optymalizacja procesu zgrzewania we wszystkich kombinacjach połączeń, tak aby spoiny spełniły wymagania telekomunikacyjne na tłumienie $A \leq 0,08$ dB, reflektancję $RL > 60$ dB i wytrzymałość mechaniczną na zrywanie $F > 5$ N [151].

Proces optymalizacji zgrzewania światłowodów istotnie różniących się parametrami można weryfikować jednokierunkowymi reflektometrycznymi pomiarami tłumienia spoin. Analiza tych pomiarów, szczególnie dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych, pozwala jednoznacznie określić, czy zachodzi proces dopasowywania pól modowych łączonych włókien, oraz kiedy proces optymalizacji zakończyć ze względu na degradację spoin.

Wartość jednokierunkowego tłumienia spoiny nie może być przyczyną dyskwalifikowania połączenia jako nie spełniającego norm, np. [151], gdyż wynika przede wszystkim z rozpraszania wstecznego. Optymalizowane połączenia światłowodów istotnie różniących się parametrami charakteryzują się dużymi ujemnymi $A_{12}^{(-)}$ i dodatnimi $A_{21}^{(+)}$ jednokierunkowymi tłumieniami i jednocześnie małym, spełniającym wymagania, tłumieniem rzeczywistym A_s . Międzynarodowe i krajowe normy oraz zalecenia odnoszące się do wartości jednokierunkowych tłumień spoin mogą jedynie przestrzegać przed połączeniami włókien różnych typów, a nie przesądzać o rzeczywistym tłumieniu i jakości spoin.

Zaproponowane warunki optymalizacji warunków zgrzewania nie obniżają wytrzymałości mechanicznej spoin na zrywanie, co świadczy o ciągłości struktury w obrębie spoiny i braku odrębnych od struktury amorficznej SiO_2 wtrąceń. Nie stwierdzono różnic wytrzymałości mechanicznej spoin światłowodów wykonanych technologiami MCVD, OVD i VAD w standardowych warunkach zgrzewania – przeznaczonych dla światłowodów jednomodowych tych samych typów, jak i w opracowanych przez autora optymalizowanych warunkach zgrzewania przeznaczonych dla różnych kombinacji połączeń światłowodów jednomodowych.

Wzrost tłumienia spoin otrzymanych w niekorzystnych warunkach klimatycznych jest spowodowany przede wszystkim dużą wilgotnością powietrza $RH > 90\%$ przy niskich temperaturach: $t = -2 \div 1^\circ\text{C}$. Charakteryzuje to odległość temperatury punktu rosy od temperatury otoczenia podczas procesu spajania. Jeżeli ta odległość jest mniejsza niż $1 \div 2^\circ\text{C}$, spoiny wykazują duże tłumienie – rzędu 0,2 dB – niezależnie od stosowanych algorytmów spajania.

Obserwacje mikroskopami optycznym i skaningowym wykazały ciągłość i brak zmian struktury w obszarze spoin wykonanych programami standardowymi, jak i optymalizowanymi – opracowanymi przez autora. Potwierdziły również wysoką kolistość płaszczy włókien, centryczność położenia rdzeni względem płaszczy oraz bardzo dużą precyzję wykonanych połączeń. Nie zauważono różnic przy spajaniu światłowodów wykonanych różnymi technologiami. Nie jest możliwe znalezienie płaszczyzny spoiny połączeń światłowodów tych samych typów – rysunki 6.13, 6.14, 6.15 i 6.17, co potwierdza powyższe wnioski. Badania umożliwiły również obserwacje charakterystycznego obniżonego płaszcza w światłowodzie DC-SMF – rysunek 6.16, a także zmiany koncentracji Ge – rysunki 6.18, 6.19 – w złożonym profilu współczynnika załamania (typu korona), w światłowodzie NZDS-SMF.

7. Dyspersja chromatyczna i polaryzacyjna w termicznie łączonych jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych

7.1. Dyspersja chromatyczna

Podstawowym materiałem, z którego wytwarzane są światłowody telekomunikacyjne, jest szkło krzemionkowe. Charakteryzuje się ono zmiennością własności w zależności od długości propagującej w nim fali [1]. Pojawia się zatem zjawisko dyspersji częstotliwościowej materiału, czyli zależności parametrów ośrodka od długości fali, zwane również dyspersją materiałową. Nadajniki promieniowania nie są jednoczęstotliwościowe, a dodatkowo podczas modulacji powstają pasma boczne, więc każda składowa spektralna sygnału porusza się w szkło krzemionkowym z prędkością fazową [1]:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n} \quad (7.1)$$

gdzie:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad \beta = kn, \quad k = \omega/c.$$

Prędkość fazowa określa prędkość, z jaką porusza się powierzchnia stałej fazy sygnału w szkło.

Wspomniano już, że nie ma fal monochromatycznych, zatem energia sygnału przenoszona jest w ośrodku przez paczkę fal z prędkością grupową [1]:

$$v_g = \frac{dz}{dt} = \frac{1}{\frac{d\beta}{d\omega}} = \frac{c}{n_g} \quad (7.2)$$

gdzie:

$$n_g = \frac{d\beta}{dk} \text{ i jest grupowym współczynnikiem załamania, przy czym:}$$

$$n_g = n + \omega \frac{dn}{d\omega} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (7.3)$$

Prędkość grupowa ma kierunek zgodny z prędkością fazową i w ośrodkach o zerowej dyspersji częstotliwościowej jest jej równa. Opóźnienie grupowe wynikające

z prędkości grupowej wynosi $\tau_g = \frac{L}{v_g}$.

Z zależności (7.2) i (7.3) wynika, że:

$$\frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{L\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \quad (7.4)$$

stąd dla małych zmian długości fali $\Delta\lambda$ otrzymuje się:

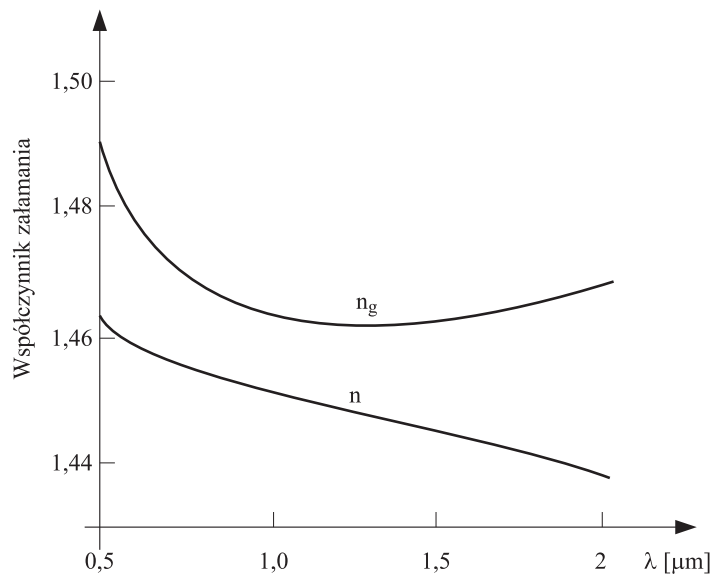
$$\Delta\tau_g = -\Delta\lambda \frac{L\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial\lambda^2} = D_m L \Delta\lambda \quad (7.5)$$

gdzie:

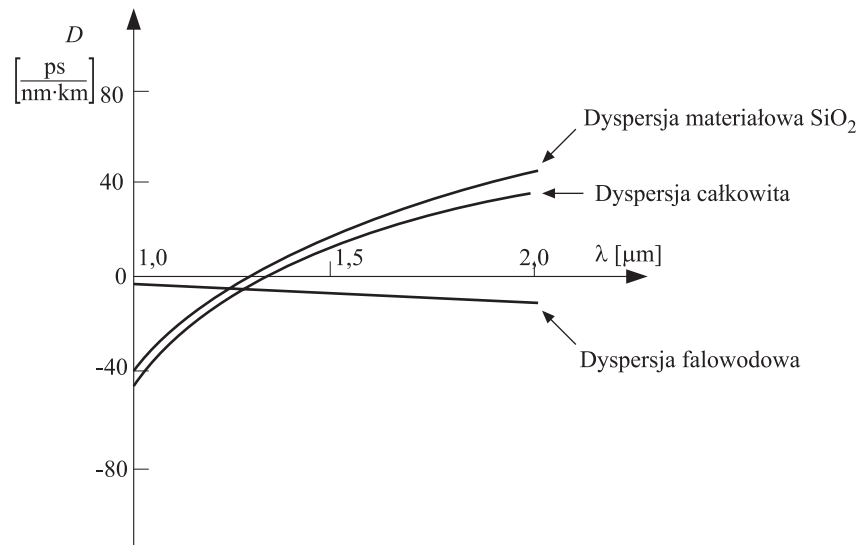
$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial\lambda^2}$ – parametr (współczynnik) dyspersji materiałowej, podawany w ps/nm·km,

$\Delta\tau_g$ – opóźnienie, jakiego doznaje obwódka fali na odcinku o długości L w wyniku dyspersji materiałowej.

Na rysunku 7.1 przedstawiono zależność współczynników załamania n i n_g dla czystego SiO₂. Grupowy współczynnik załamania dla niedomieszkowanego szkła krzemionkowego osiąga wartość minimalną dla $\lambda = 1,28 \mu\text{m}$ – rysunek 7.1 [154], a dyspersja materiałowa wynosi dla tej długości fali zero – rysunek 7.2 [154].



Rys. 7.1. Współczynnik załamania n i grupowy współczynnik załamania n_g czystego SiO₂ w funkcji długości fali λ [154]



Rys. 7.2. Typowe wartości dyspersji dla standardowego światłowodu ze skokowym profilem współczynnika załamania [154]

Domieszkując szkło krzemionkowe, można zmieniać współczynnik załamania zgodnie ze wzorem Sellmeiera (5.20), a tym samym nieco modyfikować długość fali, dla której występuje zero dyspersji materiałowej.

Natomiast w światłowodzie prędkość grupowa modu zależy nie tylko od dyspersji materiałowej ośrodka, ale również od struktury światłowodu. Struktura światłowodu daje podobny efekt jak dyspersja materiałowa i dlatego nazywany jest on dyspersją falowodową. Dyspersja falowodowa wywołana jest zmianą rozkładu mocy promieniowania między rdzeniem a płaszczem, przy zmianie długości fali. Zależy od wymiarów światłowodu, formy profilu i wartości współczynnika załamania, długości fali propagującej w światłowodzie [1]. Pozwala to na przesuwanie długości fal, przy których następuje „wyzerowanie” wartości dyspersji światłowodu, w stronę większych od $\lambda = 1,28 \mu\text{m}$ długości, np. w okolicę $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ – rysunek 7.2.

W literaturze często używane jest pojęcie tzw. dyspersji chromatycznej, czyli związanej z niezerową szerokością widmową źródła światła, która obejmuje zarówno zjawiska związane z dyspersją falowodową, jak i materiałową. Zero dyspersji chromatycznej jest głównym parametrem wyznaczającym typy światłowodów telekomunikacyjnych [8, 10, 14].

Dla światłowodu jednomodowego (brak dyspersji międzymodowej) grupowe opóźnienie wynika z tych dwóch rodzajów dyspersji i jest opisywane tzw. dyspersją chromatyczną:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda} \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}} \right] \quad (7.6)$$

Dyspersja ta powoduje rozszerzenie czasowe impulsów w światłowodzie i wobec tego zmniejsza dopuszczalną prędkość transmisji, a w konsekwencji zmniejsza przepustowość informacyjną łącza optycznego.

Współczynnik dyspersji chromatycznej D wyznacza rozszerzenie czasowe impulsu (w pikosekundach) po przejściu 1 km odcinka światłowodu przy szerokości linii widmowej źródła światła równej 1 nm. Przy innych długościach światłowodu L i innych szerokościach linii widmowych $\Delta\lambda$ rozszerzenie czasowe impulsu Δt wyraża się wzorem:

$$\Delta t = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (7.7)$$

Należy również dodać, że wpływ na dyspersję, a więc na szerokość pasma transmisyjnego światłowodu mają również inne zjawiska, np. zmiana polaryzacji, nierówne tłumienie różnych modów, zjawisko sprzęgania się modów, z którymi bezpośrednio związana jest dyspersja polaryzacyjna PMD (*Polarization Mode Dispersion*).

7.1.1. Dyspersja chromatyczna – ograniczenia transmisyjne

Dyspersja (7.6) wyraża się w pikosekundach przez kilometr razy nanometr. Przykładowo, jeżeli $D = 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$ oznacza to, że dla dwóch impulsów o różnicy długości

fali $\lambda_1 - \lambda_2 = 1$ nm, wprowadzonych równocześnie do światłowodu o długości 1 km, różnica ich czasów przejścia wyniesie na końcu włókna $\tau_1 - \tau_2 = 17$ ps. Równocześnie, jeżeli źródło światła ma szerokość spektralną $\Delta\lambda$ równą 1 nm, to na jednym kilometrze światłowodu poszerzenie czasowe impulsu, rozumiane jako różnica czasów przejścia fali najszybszych i najwolniejszych, wyniesie 17 ps.

Dyspersja, zgodnie z (7.6), może być dodatnia lub ujemna. Dodatnia jest wtedy, gdy fale dłuższe rozchodzą się wolniej niż krótsze, ujemna – gdy jest odwrotnie. Dla poszerzenia impulsów znak dyspersji nie ma znaczenia.

Poszerzenie impulsu Δt (7.7) prowadzi do spadku mocy sygnału. Dopuszczalny spadek czułości odbiornika zwykle ustawia się na 1 dB [154]. Całkowita dyspersja linii wyrażana w [ps/nm] jest proporcjonalna do długości łącza, spadek ten ogranicza jego długość.

Należy przy tym pamiętać, że wypadkowa szerokość linii widmowej $\Delta\lambda$ nigdy nie będzie mniejsza od widma modulacji strumienia danych. Szerokość widma modulacji wprowadza fundamentalne ograniczenia na odległość transmisji, wywołane zjawiskiem dyspersji.

Maksymalny zasięg transmisji ograniczonej dyspersją można przedstawić wyrażeniem [154]:

$$L_{\max} = \frac{c}{x \cdot D \lambda_0^2 B^2} \quad (7.8)$$

gdzie:

- x – mnożnik dla zastosowanego kodu transmisyjnego,
- B – prędkość transmisji,
- D – współczynnik dyspersji światłowodu,
- c – prędkość światła w próżni,
- λ_0 – nominalna długość fali.

Przykładowo [154]: dla kodu NRZ-M lub NRZ-S, częstotliwościowe pasmo jest w przybliżeniu $x \approx 1,2$ razy większe od szybkości transmisji B . Zatem stosując światłowód standardowy SMF G.652 o dyspersji, dla $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, $D = 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$ do transmisji takiego sygnału o przepływności $B = 10 \text{ Gbit/s}$, otrzymuje się (7.8) $L_{\text{max}} = 61 \text{ km}$. Dla prędkości transmisji $B = 2,5 \text{ Gbit/s}$ ta odległość jest 16 razy większa i wynosi $L_{\text{max}} = 976 \text{ km}$. Ograniczenie (7.8) jest ograniczeniem fundamentalnym. Nie można zwiększyć zasięgu ponad L_{max} poprzez zmniejszenie linii widmowej lasera. Istnieje konieczność kompensacji dyspersji we włóknach G.652, szczególnie przy prędkościach transmisji $\geq 10 \text{ Gbit/s}$.

Istniejące w sieciach standardowe włókna G.652 można z powodzeniem wykorzystywać do transmisji wielofalowej WDM, tj. zwiększenia pojemności informacyjnej systemu [67, 69, 73]. Położenie nowych kabli z włóknami specjalnie przystosowanymi do dalekosiężnej, o dużych przepływnościach transmisji WDM, tj. z włóknami G.655 [14], które przy tym są około 3 razy droższe od światłowodów G.652, jest bardzo drogie i stanowi do około 80% kosztów całości inwestycji.

Standardowe włókno jednomodowe SMF, z zerem dyspersji w II oknie optycznym, posiada prostą konstrukcję o skokowym profilu współczynnika załamania i bardzo niską tłumienność $0,15 \div 0,25 \text{ dB/km}$ w III oknie optycznym [8]. Podatność włókna na powstawanie efektów nieliniowych jest również bardzo niska, ponieważ odznacza się ono dużą powierzchnią efektywną $A_{\text{eff}} \sim 80 \mu\text{m}^2$ [155]. Jak wspomniano wyżej, dysper-

sja standardowego włókna jednomodowego w III oknie wynosi około $D = 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$

i może ograniczać wielkość iloczynu przepływności bitowej i odległości. Jednak techniki kompensacji dyspersji są w stanie znacznie zredukować to ograniczenie. Standardowe włókno jednomodowe, optymalizowane dla transmisji jednofalowej w II oknie optycznym, jest wyjątkowo dobrze przystosowane do transmisji wielofalowej WDM w III oknie optycznym. Oprócz małego współczynnika nieliniowego, wysoka dyspersja włókna stanowi korzystną cechę, która umożliwia likwidację przeników spowodowanych mieszaniami czterofalowym FWM (*Four Wave Mixing*) i skrośną modulacją fazy CPM (*Cross Phase Modulation*) [156].

Uwzględniając wymogi dalekosiężnych systemów transmisyjnych WDM o wysokiej przepływności bitowej, włókno telekomunikacyjne powinno mieć niską tłumienność w pasmie wzmocnienia wzmacniacza EDFA, niską dyspersję dla umożliwienia realizacji łączy dalekosiężnych, wysoką lub przynajmniej różną od zera dyspersję w pasmie wzmocnienia dla likwidacji mieszania czterofalowego (FWM) i skrośnej modulacji fazy (CPM) oraz niski współczynnik nieliniowy, co przede wszystkim oznacza dużą powierzchnię efektywną A_{eff} .

Podsumowując, standardowe włókno jednomodowe G.652 [8] jest wyjątkowo dobrze przystosowane do zastosowań WDM w III oknie optycznym.

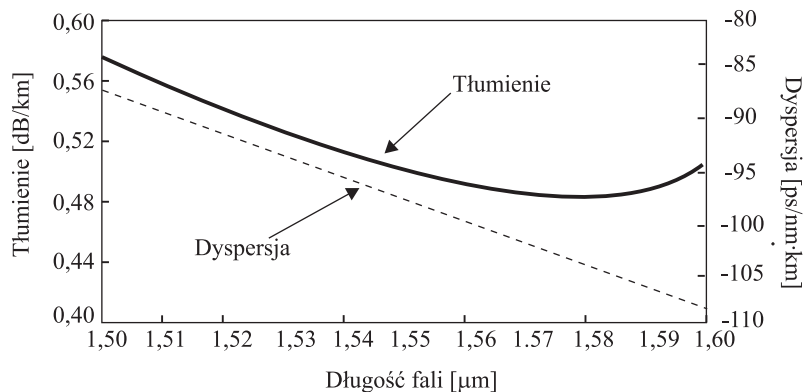
W USA włókna G.655 [14] są wykorzystywane do łączy dalekosiężnych. Wydaje się jednak, że europejscy operatorzy będą budowali nadal jednolitą sieć światłowodową, używając standardowych włókien jednomodowych G.652, z zastosowaniem WDM dla

zwiększenia całkowitej przepływności bitowej. Przy dużych prędkościach transmisji w tych włóknach należy jednak mierzyć i kompensować dyspersję.

Najczęściej stosowaną metodą kompensacji dyspersji jest rozdzielanie światłowodów z dodatnią dyspersją włóknami o ujemnej dyspersji, tzw. włóknami kompensującymi dyspersję – DCF (*Dispersion Compensation Fiber*) [157].

Włókna DCF mają dużą dyspersję ujemną. Średnia wartość współczynnika dyspersji takiego włókna wynosi około $-100 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \times \text{km}}$. Użycie 1 km takiego włókna

w połączeniu kaskadowym z 5 km włókna standardowego G.652 pozwala na prawie całkowitą kompensację dyspersji chromatycznej. Na rysunku 7.3 przedstawiono wykres zależności współczynnika dyspersji chromatycznej D i tłumienności DCF w funkcji częstotliwości. Osiągane wartości dyspersji całkowitej DCF wahają się od -40 do -1300 ps/nm w zależności od potrzeb kompensacji.



Rys. 7.3. Przykładowe wartości dyspersji chromatycznej i tłumienia włókien kompensujących dyspersję chromatyczną w funkcji częstotliwości [157]

Dyspersja chromatyczna jest sumą dyspersji falowodowej i materiałowej. Wartość dyspersji falowodowej zależy bezpośrednio od różnicy współczynników załamania płaszczka i rdzenia, zwiększając Δn można w prosty sposób uzyskać dużą ujemną dyspersję chromatyczną. Dodatkowo takie włókna muszą mieć mniejszą średnicę rdzenia, aby utrzymać żadaną dla transmisji jednomodowość. Zwiększa to tłumienność włókna. Jako parametr jakościowy używa się tutaj współczynnika FOM (*Figure of Merit*), który jest stosunkiem uzyskiwanej dyspersji całkowitej do tłumienia. Im większy jest współczynnik FOM, tym większą skuteczność kompensacji osiąga włókno. Moduły kompensacji mają największe znaczenie w systemach WDM przy dużych przepływnościach i bezregeneracyjnych odległościach transmisji. Jednak ich stosowanie wiąże się z dużym wprowadzanym tłumieniem, dlatego też tak istotna jest wartość współczynnika FOM.

7.1.2. Dyspersja chromatyczna w spajanych liniach światłowodowych

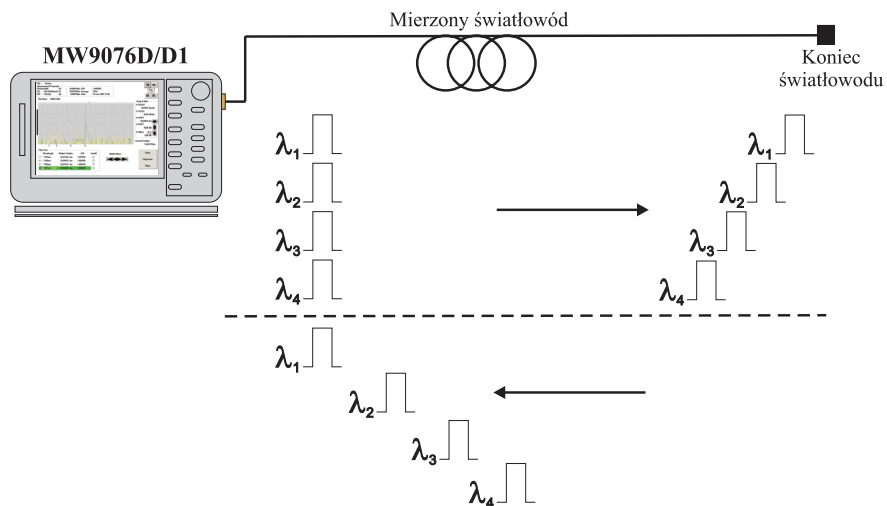
Linie światłowodowe przeznaczone do eksploatacji składają się z wielu odcinków włókien, łączonych najczęściej termicznie metodą spajania w łuku elektrycznym. Mimo że dyspersja chromatyczna zależy od właściwości materiału oraz od struktury światłowodu, to nie ma teoretycznych przesłanek, aby quasi-punktowe zmiany właściwości

szkła czy struktury (konstrukcji) włókna wpływały na wartość dyspersji chromatycznej trasy. Potwierdziły to pomiary dyspersji chromatycznej tras wykonane przez autora i współpracowników [69, 73].

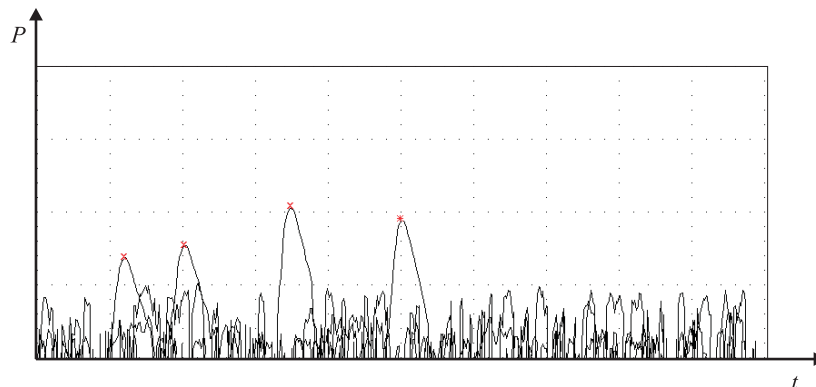
Dyspersję chromatyczną można mierzyć wieloma metodami [158]. Metoda pomiaru opóźnienia impulsu, użyta przez autora do pomiarów tras, jest klasyczną metodą opartą na pomiarach zmian czasu powrotu sygnałów optycznych dla kilku długości fal. Stosuje się ją przy pomiarach światłowodów jednomodowych i wielomodowych w warunkach polowych.

Do pomiarów dyspersji chromatycznej tras światłowodowych użyto przenośnego miernika dyspersji chromatycznej MW9076D/D1 firmy Anritsu.

Dyspersja chromatyczna odnosi się do zjawiska, w którym impulsy o różnych długościach fal doznają różnych opóźnień we włóknie optycznym. Zgodnie z tą definicją impulsy optyczne, w przypadku MW9076D/D1 są to impulsy o czterech długościach: $\lambda = 1310, 1410$ lub $1450, 1550$ i 1625 nm, wprowadzane do światłowodu, propagują przez włókno optyczne, a następnie mierzy się różnice w ich czasie przybycia do miernika po odbiciu od końca światłowodu (odbicie Fresnela) – rysunki 7.4÷7.5.



Rys. 7.4. Różnice w czasie przybycia impulsów o różnych długościach fali [159]



Rys. 7.5. Różnice w czasie przybycia impulsów o różnych długościach fali – pomiar [wyniki własne]

Zmierzone grupowe opóźnienie sygnału może być znacznie zróżnicowane na skutek zakłóceń, dlatego wartości opóźnień dla określonej długości fali są obliczane poprzez dopasowanie do krzywej aproksymacyjnej opisanej równaniami Sellmeiera [158]. Typ równania dopasowujący charakterystykę opóźnienia dobiera się w zależności od typu mierzonego światłowodu. Trójczłonowe równanie Sellmeiera jest używane zwykle dla standardowego włókna G.652 z nie przesuniętą dyspersją:

$$\tau_g(\lambda) = A \cdot \lambda^2 + B + C \cdot \lambda^{-2} \quad (7.9)$$

Równanie kwadratowe wykorzystuje się przeważnie do określenia opóźnienia w włóknach z przesuniętą dyspersją G.653, G.655:

$$\tau_g(\lambda) = A \cdot \lambda^2 + B \cdot \lambda + C \quad (7.10)$$

Inne, pięcioczłonowe równanie Sellmeiera stosuje się dla specjalnych przypadków:

$$\tau_g(\lambda) = A \cdot \lambda^4 + B \cdot \lambda^2 + C + D \cdot \lambda^{-2} + E \cdot \lambda^{-4} \quad (7.11)$$

Pięć składowych dostarcza więcej stopni swobody, jednakże jest ono bardziej wrażliwe na zakłócenie sygnału i niestałość parametrów w mierzonej ścieżce optycznej.

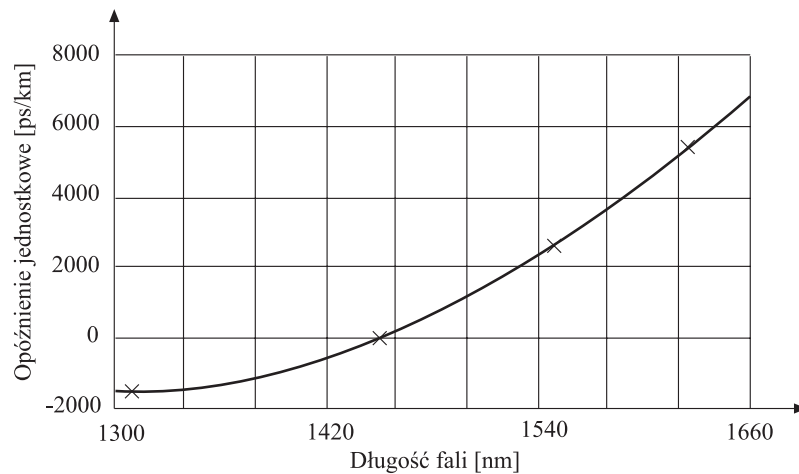
Podczas pomiaru wybiera się długość fali odniesienia, dla której najdokładniej znany jest grupowy współczynnik załamania w rdzeniu mierzonego światłowodu. Dla tej długości fali mierzona jest długość światłowodu, a następnie jednostkowy czas

przejścia impulsów optycznych o różnych długościach fali $\tau_{jg}(\lambda) = \frac{\tau_g(\lambda)}{L}$ [ps/km].

Do wartości: $\tau_{jg}(1310 \text{ nm})$, $\tau_{jg}(1410 \text{ nm lub } 1450 \text{ nm})$, $\tau_{jg}(1550 \text{ nm})$ i $\tau_{jg}(1625 \text{ nm})$ używa się dopasowania formułami matematycznymi (7.9)÷(7.11).

Zróżniczkowanie krzywej aproksymacyjnej $\frac{d\tau_{jg}(\lambda)}{d\lambda}$ uzyskanej z wyrażen (7.9)÷(7.11)

– w zależności od typu światłowodu – rysunek 7.6 (dla G.652), daje w wyniku wartość współczynnika dyspersji chromatycznej – zależność (7.6).



Rys. 7.6. Opóźnienie jednostkowe τ_{jg} w funkcji długości fali – pomiar, tutaj długość fali odniesienia 1450 nm [wyniki własne]

Dalsze różniczkowanie $\frac{dD(\lambda)}{d\lambda}$ określa nachylenie dyspersji. Przemnożenie

współczynnika dyspersji $D(\lambda)$ przez długość światłowodu L daje w wyniku tzw. dyspersję całkowitą włókna [ps/nm].

Istnieje konieczność kompensacji dyspersji chromatycznej we włóknach G.652 szczególnie przy prędkościach transmisji ≥ 10 Gbit/s. Znając wyżej wymienione wielkości, można świadomie zastosować odpowiednie do danego włókna algorytmy kompensacji dyspersji i przeprowadzić dalekosiężną transmisję, nawet przy prędkości transmisji powyżej 10 Gbit/s w jednym kanale optycznym systemów WDM, dla określonej trasy światłowodowej.

Oznacza to konieczność przeprowadzenia pomiarów dyspersji chromatycznej w istniejących lub nowo powstających sieciach, które powinny być przygotowane do zmian prędkości transmisji i maksymalnego wykorzystania dostępnego pasma. Do 2003 r. wykonano pomiary reflektometryczne i dyspersji chromatycznej trzech największych w Polsce światłowodowych sieci szkieletowych zbudowanych na światłowodach G.652. Autor niniejszej rozprawy brał udział w analizie wszystkich pomiarów tych sieci. Zmierzone i przeanalizowano parametry ponad 50.000 km włókien światłowodowych w ponad 14.000 km kabli. Dało to podstawę do przygotowania tych sieci do dalekosiężnej transmisji WDM, DWDM o przepływnościach ≤ 10 Gbit/s w kanale optycznym.

Podsumowanie wyników pomiarów dyspersji chromatycznej

Pomiary dyspersji chromatyczne wykonano, przyjmując długość fali odniesienia $\lambda = 1310$ nm, przyjęto grupowy współczynnik załamania $n_g = 1,4675$. Dokładność pomiaru zera dyspersji wynosiła $\pm 0,5$ nm, natomiast współczynnika dyspersji $\pm 0,2$ ps/nm \times km. Wyniki badań pomiarów dyspersji chromatycznej umożliwiły sformułowanie niżej przedstawionych wniosków.

Długość fabrykacyjna kabli telekomunikacyjnych kanałowych i podwieszanych wynosi 2150 ± 50 lub 4100 ± 50 metrów. Oznacza to, że na trasie 50-kilometrowej znajduje się standardowo od 12 do 25 spoin. W pomiarach reflektometrycznych nie wszystkie spawy są widoczne, część z nich nie wykazuje żadnych strat – rozdział 5. W związku z tym badanie wpływu ilości połączeń termicznych na dyspersję chromatyczną jest możliwe tylko przy porównaniu tras z dużą i małą ilością spoin wykazujących małe lub duże tłumienie bądź też ujemne jednokierunkowe tłumienie wskazujące na łączenie światłowodów najczęściej nieznacznie różniących się parametrami.

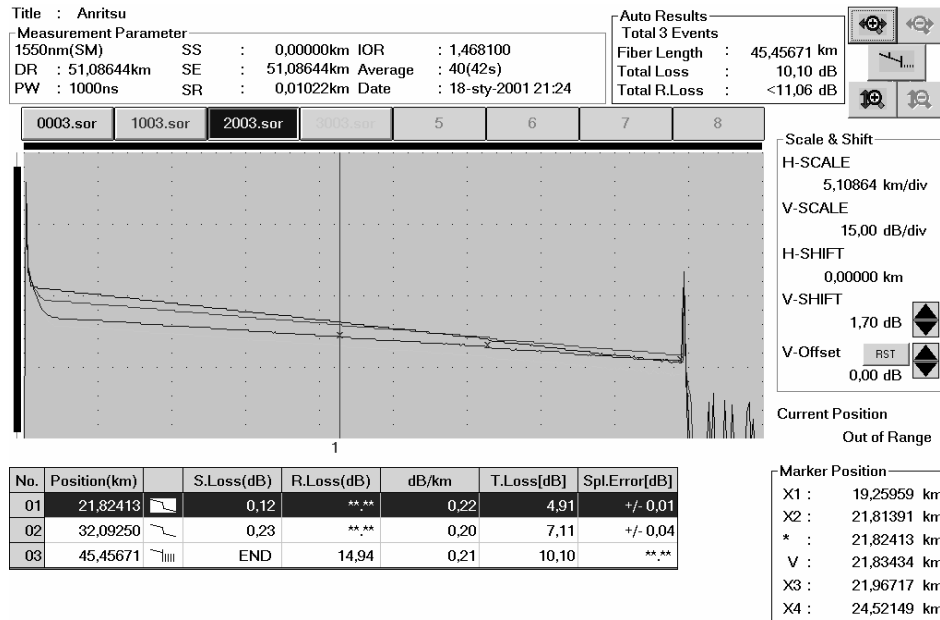
Wartości współczynnika dyspersji pomierzonych tras są typowe dla pojedynczych światłowodów G.652. Nie zauważono wpływu ilości i jakości połączeń spawanych na wartości współczynników dyspersji chromatycznej. Wartości współczynnika dyspersji (dla $\lambda = 1550$ nm) są zawsze mniejsze niż 20 ps/nm \times km – wielkość maksymalna określona w [160]. W 99% przypadków pomiarów tras wartości współczynnika dyspersji mieszczą się, dla $\lambda = 1550$ nm, w zakresie $16\div 17$ ps/nm \times km, bez względu na długość linii oraz liczbę i przede wszystkim jakość spoin [71]. Przykładowe pomiary reflektometryczne i dyspersji chromatycznej dwóch tras o porównywalnych długościach, ale o różnej liczbie i jakości połączeń spawanych przedstawiono na rysunkach 7.7 i 7.8. Trasy, w granicach błędu, wykazują identyczny współczynnik dyspersji chromatycznej.

Zero dyspersji chromatycznej mieści się w zakresie $1300\div 1324$ nm, co odpowiada zaleceniu G.652 [8], według którego zero dyspersji dla tych światłowodów powinno zawierać się w przedziale $1300\div 1324$ nm. Nachylenie dyspersji, w zerze dyspersji, jest $\leq 0,093$ ps/nm \times nm \times km, co jest również zgodne z zaleceniem [8].

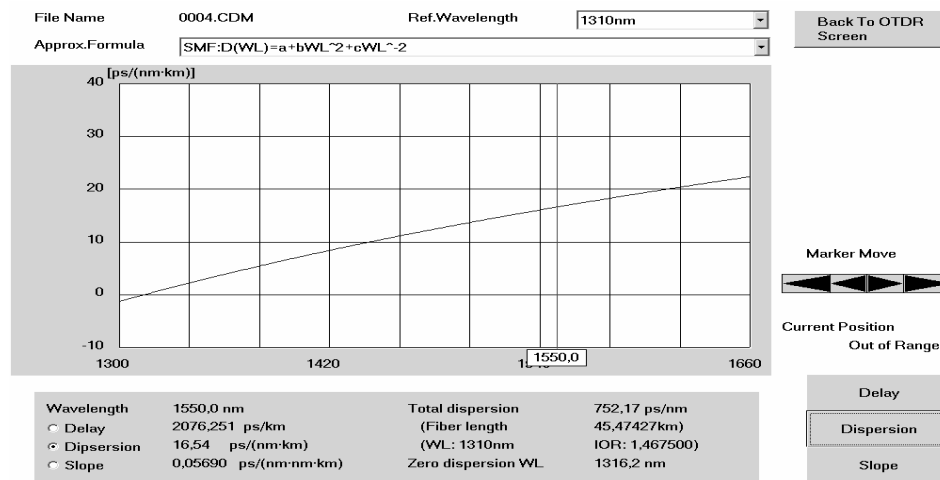
Nie stwierdzono wpływu temperatury na dyspersję chromatyczną mierzonych, łączonych włókien, mimo że pomiary przeprowadzono w różnej temperaturze otoczenia (od -20°C do $+30^{\circ}\text{C}$), w tym w kablach podwieszanych. Oznacza to, dla badanego zakresu temperatur, proporcjonalność zmian grupowych opóźnień dla różnych λ w funkcji temperatury. Jest to rezultat zgodny z wynikami prac [161, 162].

Nie stwierdzono wpływu kablowania i naprężeń (podrozdział 5.2) występujących w światłowodach na dyspersję chromatyczną mierzonych włókien.

a)

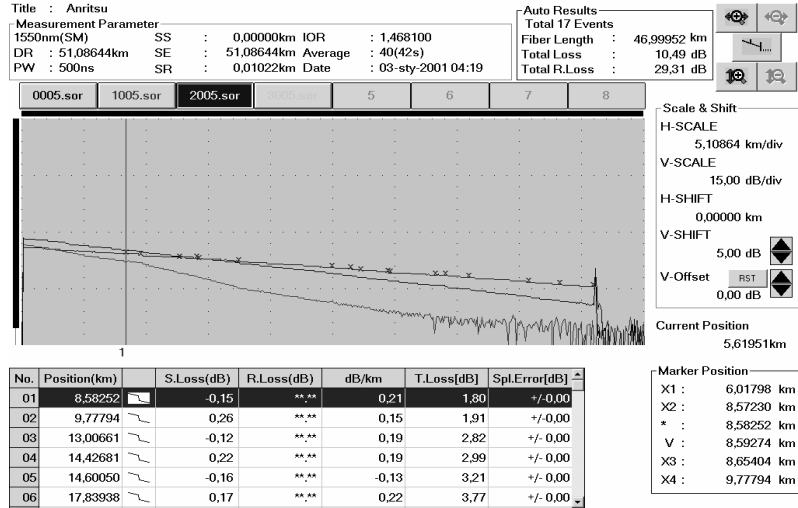


b)

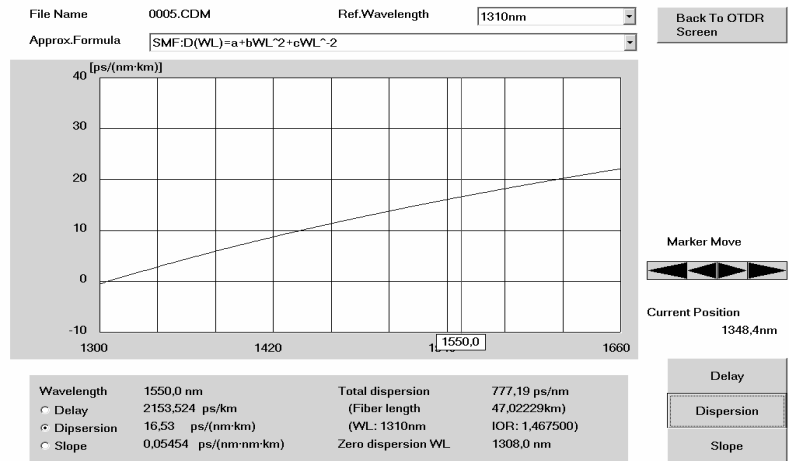


Rys. 7.7. Pomiar reflektometryczny trasy (45,45 km, $\lambda = 1550$ nm) z dwoma dobrej jakości spawami – a) i b) pomiar współczynnika dyspersji (dla $\lambda = 1550$ nm, $D = 16,54$ ps/nm \times km) dla tej trasy

a)



b)



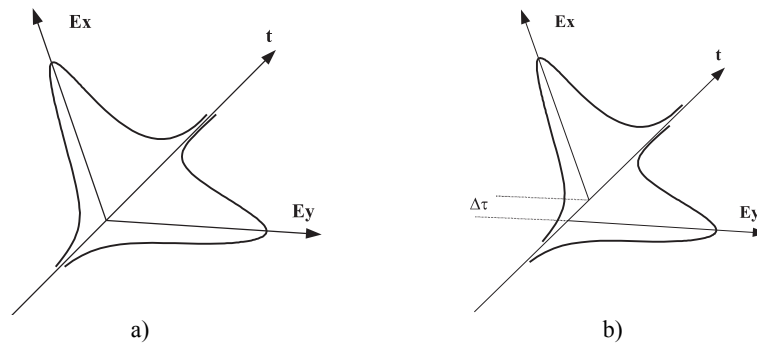
Rys. 7.8. Pomiar reflektometryczny trasy (46,99 km, $\lambda = 1550$ nm) z szesnastoma spawami, w tym wykazującymi ujemne jednokierunkowe tłumienie – a) i b) pomiar współczynnika dyspersji (dla $\lambda = 1550$ nm, $D = 16,53$ ps/nm×km) dla tej trasy

7.2. Dyspersja polaryzacyjna

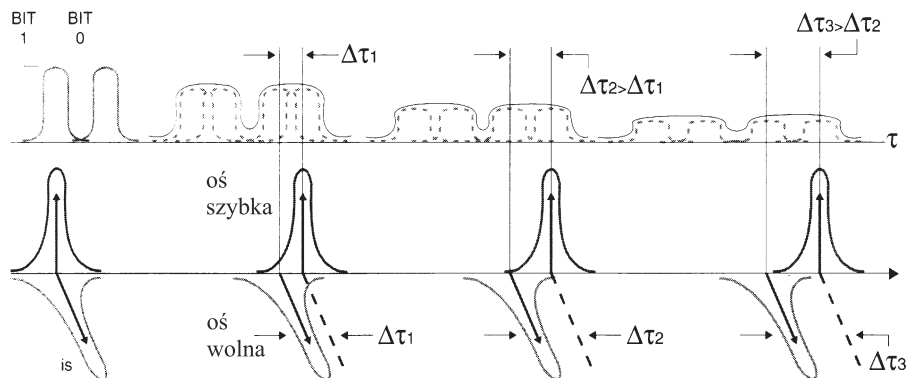
Propagujący w światłowodzie jednomodowym mod podstawowy HE_{11} jest modem liniowo spolaryzowanym LP_{01} [1]. Mod LP_{01} ma trzy składowe pola: E_x , E_y i E_z . W światłowodach o słabym przewodzeniu, a do takich światłowody telekomunikacyjne należą, przeważają składowe E_x lub E_y , a składowa E_z jest znacznie mniejsza [1] i można przyjąć [103], że $E_z \approx 0$. Wzajemne sprzężenie modów powoduje jednak, że

bez względu na wzbudzenie transmisja sygnału optycznego jest dwumodowa. Mod podstawowy jest zatem superpozycją dwóch ortogonalnie względem siebie spolaryzowanych modów i w idealnym włóknie oba mody propagują z tą samą prędkością, a ich superpozycja daje stałą polaryzację światła wzdłuż falowodu – rysunek 7.9a.

W rzeczywistych światłowodach nie jest zachowana idealna symetria kołowa konstrukcji, profilu współczynnika załamania i naprężeń poprzecznych. Produkowane włókna zawsze wykazują pewne fluktuacje w geometrii rdzenia (eliptyczność) lub wewnętrzne naprężenia struktury szkła, powstające podczas wyciągania włókna. Indukuje to dwójłomność włókna – podstawowe zjawisko, które przyczynia się do pojawiania się dyspersji polaryzacyjnej. Powoduje to zróżnicowanie grupowych prędkości propagacji ortogonalnych modów i ich wzajemne opóźnienie – rysunek 7.9b, 7.10. Prowadzi do zmiany polaryzacji światła i poszerzenia impulsu świetlnego [143]. Zjawisko to nazywane jest dyspersją polaryzacyjną PMD (*Polarization Mode Dispersion*). Parametrem opisującym PMD jest czas opóźnienia pomiędzy ortogonalnymi modami, nazywany także różnicowym opóźnieniem grupowym DGD (*Differential Group Delay*), oznaczanym $\Delta\tau$ lub $\Delta\tau_g$.



Rys. 7.9. Mody ortogonalnie spolaryzowane w światłowodzie: a) o zerowej dwójłomności, b) o niezerowej dwójłomności [158]



Rys. 7.10. Dyspersja polaryzacyjna sygnału optycznego w systemie cyfrowym [163]

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych i eksperymentów, np. [164÷166] dowiedziono, że rozkład opóźnienia grupowego DGD w czasie, pomiędzy dwoma modami polaryzacji ma charakter maxwellowski. Wartość średnia DGD zwana jest opóźnieniem PMD, wyrażana za pomocą współczynnika PMD: PMD_{coeff} , a jego jednostką jest ps/\sqrt{km} .

Wartość PMD nie wzrasta więc liniowo, lecz proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z długości odcinka, na którym transmitowane są sygnały optyczne:

$$\Delta\tau = \sqrt{L}PMD_{coeff} \quad (7.12)$$

W rozkładzie Maxwella wariancja σ jest proporcjonalna do średniej (PMD); $\sigma/PMD \sim 0,42$. Fakt ten ma bardzo ważne konsekwencje:

- im większa PMD, tym większa wariancja,
- wariancja i średnia są tego samego rzędu wielkości, zatem:
- dla dokładnego pomiaru PMD wymagane jest wykonanie dużej ilości pomiarów,
- dla przewidywanego maksymalnego DGD wymagana jest bardzo mała wartość PMD.

W światłowodach dwójłomność, będąca bezpośrednim powodem występowania DGD, jest mała i rozłożona losowo. Dla małych długości światłowodu opóźnienie grupowe akumuluje się w sposób deterministyczny i proporcjonalny do długości. W zakresie dużych długości akumulacja DGD jest losowa, a jej wartość średnia jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z długości [167].

Długość, przy której PMD przechodzi z proporcjonalności do długości do proporcjonalności do pierwiastka z długości, nazywana jest długością sprzęgania.

Innymi słowy, długość sprzęgania l_c jest długością włókna lub kabla, w której zaczyna występować sprzęganie pomiędzy dwoma stanami polaryzacji. Jeżeli długość włókna L spełnia warunek $L \ll l_c$, wówczas można pominąć zjawisko sprzęgania modów, a wyrażenie definiujące współczynnik PMD jest następujące:

$$PMD_{SLcoeff} = \Delta\tau / L \quad (7.13)$$

gdzie:

- $PMD_{SLcoeff}$ – współczynnik PMD dla krótkich włókien,
- $\Delta\tau$ – wartość średniokwadratowa (RMS) rozszerzenia impulsu (DGD).

Jednak włókna, w zastosowaniach praktycznych, prawie zawsze posiadają długość L dużo większą od długości sprzęgania, czyli $L \gg l_c$, a sprzęganie modów jest silne. Dla zjawiska sprzęgania modów, będącego tak samo jak $\Delta\tau$ wartością losową, wyrażenie definiujące współczynnik PMD wyrażane jest następująco:

$$PMD_{LLcoeff} = \Delta\tau / \sqrt{L} \quad (7.14)$$

gdzie:

- $PMD_{LLcoeff}$ – współczynnik PMD dla długich włókien.

Waga długości sprzęgania jest oczywista: PMD dla tego samego włókna może się zmieniać niemal o dwa rzędy wielkości zależnie od długości sprzęgania.

- Włókno o dobrej geometrii może wykazywać długość sprzęgania o wartości:
- kilkaset metrów bez obecności naprężeń (np. w dobrym kablu),
 - kilku metrów przy obecności naprężeń (np. na szpuli transportowej) [167].

7.2.1. PMD – ograniczenia transmisyjne, pomiary linii spajanych

Dyspersja polaryzacyjna jest kolejnym zjawiskiem, po tłumienności i dyspersji chromatycznej, ograniczającym maksymalną szybkość i odległość transmisji. Prowadzi ona do degradacji transmitowanego sygnału optycznego, objawiającej się poszerzeniem i słabieniem impulsu świetlnego. W systemach cyfrowych dyspersja zniekształca impuls światła, zamazując tym samym różnicę pomiędzy cyfrowymi „0” i „1” – rysunek 7.10. Proces decyzyjny w odbiorniku odbywa się z większym prawdopodobieństwem błędu. Zjawisko to jest znane jako „zamykanie oka”, z odpowiednim zwiększeniem stopy błędu BER (*Bit Error Ratio*). Przy dużej odległości transmisji może to spowodować poważne problemy z odbiorem informacji. Aplikacje pracujące na długich łączach światłowodowych G.652 wykorzystują III okno optyczne, gdyż występuje tam stosunkowo mała tłumienność włókna $0,17 \pm 0,25$ dB/km [8]. Zjawisko PMD było pomijane w przypadku włókien z relatywnie wysoką dyspersją chromatyczną w III oknie do momentu wprowadzenia wysokiej jakości laserów oraz technik kompensacji dyspersji.

Dyspersja polaryzacyjna powoduje rozszerzenie impulsu optycznego. Poszerzenie impulsu $\Delta\tau$ prowadzi do spadku mocy sygnału. Dopuszczalny spadek czułości odbiornika zwykle ustawia się na 1 dB. Aby utrzymać stratę poniżej 1 dB, przyjmuje się, że $\Delta\tau$ powinno wynosić 0,1 okresu bitowego T_{bit} [168]:

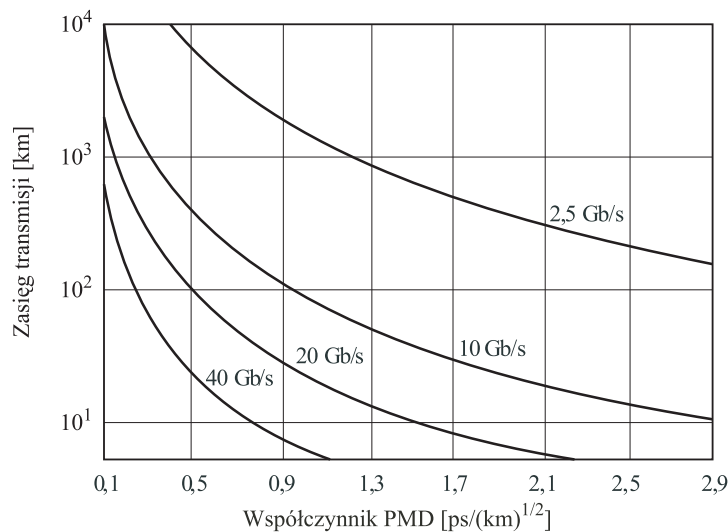
$$\Delta\tau_{max} \leq T_{bit} / 10 \quad (7.15)$$

Podstawiając $T_{bit} = 1/B$, gdzie B prędkość transmisji [bit/s], i wykorzystując wyrażenia (7.14) i (7.15), otrzymujemy długość [km] łącza ograniczonego PMD:

$$L \leq \frac{1}{100B^2 (PMD_{LLcoef})^2} \quad (7.16)$$

Na rysunku 7.11 przedstawiono zależność długości łącza od współczynnika PMD przy różnych prędkościach transmisji.

Standardowe jednomodowe światłowody telekomunikacyjne G.652 A [8], zgodnie z zaleceniem, powinny mieć współczynnik $PMD_{LLcoef} \leq 0,5$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Dla prędkości transmisji 2,5, 10 i 40 Gbit/s maksymalne rozszerzenie impulsu $\Delta\tau_{max}$ wynosi odpowiednio 40, 10 i 2,5 ps i teoretycznie dla $PMD_{LLcoef} = 0,5$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ogranicza to odległość transmisji do 6400 km dla STM-16, do 400 km dla STM-64 i do 25 km dla STM-256.



Rys. 7.11. Zależność maksymalnych odległości transmisji od współczynnika PMD przy różnych prędkościach transmisji [168]

Należy jednak podkreślić, że większość renomowanych wytwórców włókien telekomunikacyjnych G.652 (A, B, C, D) [8], G.655 [14] czy G.656 [169] wykazuje mniejsze wartości PMD niż obowiązujące w normach i zaleceniach, tj. $PMD_{LLcoeff} \leq 0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ dla pojedynczych światłowodów i $PMD_{LLcoeff} \leq 0,06 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ w kablach [170, 171].

Nie należy jednak lekceważyć znaczenia tego zjawiska w łączach istniejących, gdyż może się ono okazać zjawiskiem w pewnym stopniu limitującym zarówno zasięg, jak i prędkość transmisji. Z pomiarów PMD wykonanych w Polsce (wyniki przedstawione niżej i w pracy Cąkały i wsp. [172]) oraz przez Deutsche Telekom w RFN [173] wynika, że dosyć często zdarzają się włókna, nawet w jednym kablu, dla których współczynnik PMD jest znacznie większy od dopuszczalnej wartości $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, osiągając wartości $PMD_{LLcoeff} = 2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ i więcej, a dla $PMD_{LLcoeff} = 2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ograniczenie długości łącza przy 10 Gbit/s wynosi tylko do 25 km.

Znaczna część sieci światłowodowych zbudowanych przed 1995 rokiem jest przestarzała z powodu wysokiej PMD oraz dużej tłumienności – powyżej 1600 nm [18]. Dotyczy to szczególnie łączy poddawanych zmianom czynników atmosferycznych, w których występują eliptyczności rdzenia w światłowodach [74] oraz włókien pochodzących od nie renomowanych producentów [18].

Trzeba jednak zaznaczyć, iż PMD jest także znakomitym wyznacznikiem jakości kabli. W celu uzyskania bardzo małej wartości dyspersji polaryzacyjnej w kablu trzeba dysponować bardzo dobrym procesem technologicznym produkcji włókien światłowodowych, ale i również procesem wytwarzania kabli, w których nie występują naprężenia włókien wywołujące dwójłomność.

W praktyce, długodystansowe systemy optyczne są zbudowane z wielu włókien połączonych (spajanych) razem w jedno łącze (trasę). Dla zaprojektowania systemu istotne jest właściwe określenie wartości PMD dla łącza.

Dowiedziano [174, 175], iż wartość PMD scalanego z sekcji włókien łącza może być obliczona przez dodawanie wartości PMD poszczególnych sekcji światłowodu w kwadracie. Oznacza to, że dla łącza składającego się z n włókien, o długości l_i każde, współczynnik $PMD_{LLCcoeff}$ scalanego łącza jest równy:

$$PMD_{LLCcoeff} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum PMD_i^2} \quad (7.17)$$

gdzie:

PMD_i – wartość PMD pojedynczej części łącza.

Współczynnik pojedynczego światłowodu PMD_i ma rozkład losowy, w związku z tym współczynnik scalanego łącza jest również losowy. Scalane łącze posiada jednak mniejszą wariancję niż rozkład pojedynczego włókna z powodu uśrednienia, w momencie scalania włókien [174, 175].

Używanie przez projektanta sieci lub operatora wartości PMD powyżej najgorszego przypadku spowoduje w projektowanym systemie optycznym niepełne wykorzystanie pojemności światłowodu.

Dla przykładu, Jacobs [176] pomierzył 288 losowo wybranych włókien MC-SMF (G.652). Dla pojedynczych włókien uzyskał wynik w pobliżu $0,5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. Rozważając statystyczny rozkład PMD Jacobs określił maksymalną długość transmisji dla różnej długości pojedynczych włókien i prędkości transmisji – tabela 7.1 [176].

Tabela 7.1. Maksymalna długość transmisji dla różnej długości pojedynczych kabli i prędkości transmisji [176]

| Długość pojedynczego kabla [km] | Maksymalna długość transmisji ograniczona przez PMD [km] | |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|
| | 10 Gbit/s | 40 Gbit/s |
| 4 | 4445 | 189 |
| 8 | 4237 | 146 |
| 12 | 4080 | 116 |
| 16 | 3949 | 93 |

Z wyników przedstawionych w tabeli 7.1 wynika, że włókno, które pozwala przesyłać 10 Gbit/s na dystansie 400 km dla najgorszego przypadku, w rzeczywistości umożliwia pomyślną transmisję na odległość 10 razy większą; podobnie dla 40 Gbit/s – tylko 25 km dla obliczeń najgorszego przypadku, lecz w rzeczywistości 90÷180 km w zależności od długości indywidualnych włókien.

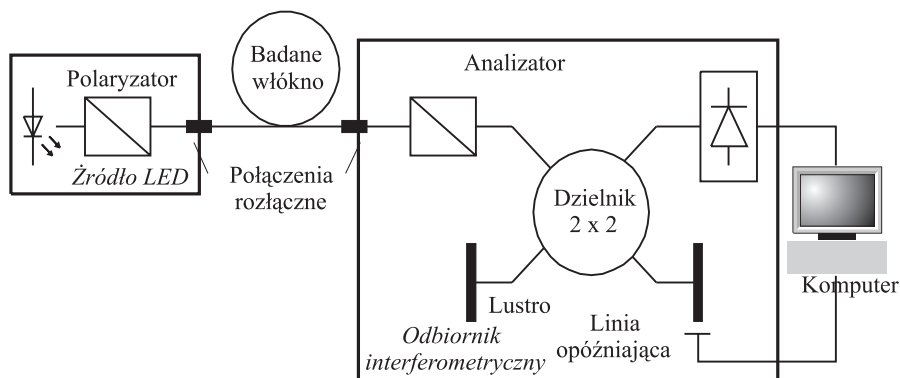
Model statystyczny bardziej realistycznie reprezentuje praktyczne zastosowania systemu niż model deterministyczny. W rezultacie pozwala to na przesunięcie granicy maksymalnej długości transmisji w stronę większych odległości. W tym sensie łączenie (w tym termiczne) krótkich sekcji światłowodów pozwala na zmniejszenie wpływu PMD na odległość transmisji. Dodatkowo termiczne łączenie włókien może wywoływać niejednorodności w geometrii rdzenia, asymetrię profilu współczynnika załamania lub wewnętrzne naprężenia struktury szkła, a tym samym indukować dodatkowe sprzężanie modów, powodując zmniejszenie $PMD_{LLCcoeff}$ [167, 177], teoretycznie tym więk-

szere im gorszej jakości są spoiny i im większa jest ich liczba na trasie o porównywalnej długości.

W celu charakteryzacji wpływu liczby i jakości spoin na PMD autor przeprowadził pomiary reflektometryczne z równoczesnymi pomiarami dyspersji polaryzacyjnej kilkunastu rzeczywistych traktów światłowodowych.

Do pomiarów reflektometrycznych użyto reflektometru MW9076D/D1 firmy Anritsu.

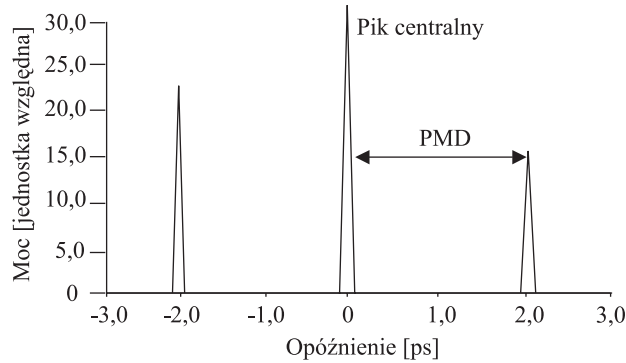
Pomiary dyspersji polaryzacyjnej wykonano za pomocą miernika Nexus-PMD firmy PerkinElmer Optoelectronics. Miernik ten pracuje w oparciu o metodę interferometryczną (interferometr Michelsona), wykorzystującą funkcję autokorelacji pola elektromagnetycznego na wyjściu włókna światłowodowego w czasie, gdy do jego drugiego końca zostało wprowadzone spolaryzowane światło emitowane przez szerokopasmowe (80 nm) źródła LED (1310 i 1550 nm) – rysunek 7.12.



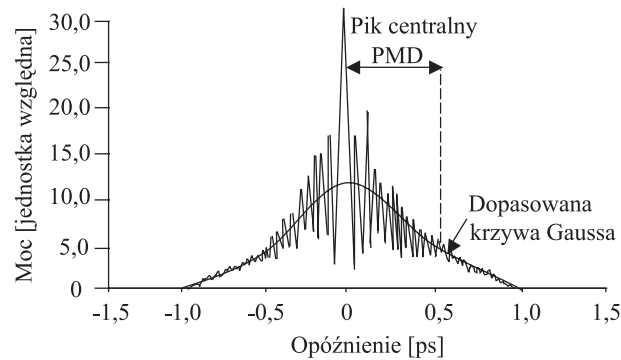
Rys. 7.12. Schemat blokowy systemu pomiarowego metodą interferometryczną [172]

Pomiar polega na rejestrowaniu poziomu mocy optycznej docierającej do detektora w trakcie zmian położenia ruchomego lustro interferometru. Zaletą pomiaru jest to, że jego czas jest bardzo krótki (<15 sekund [167]), a system pomiarowy może być używany w warunkach polowych. Różnicowe opóźnienie grupowe jest mierzone tą metodą w zakresie $0,06 \text{ ps} < \Delta\tau < 100 \text{ ps}$ [167]. Typowe wyniki uzyskiwane w pomiarach przedstawione są na rysunku 7.13 [158]. Centralny pik odzwierciedla sytuację, gdy długości ramion interferometru są jednakowe, natomiast boczne piki pojawiają się w wyniku przesunięcia ruchomego zwierciadła wprowadzone zostanie opóźnienie grupowe równe różnicowemu opóźnieniu grupowemu badanego włókna – rysunek 7.13a.

a)



b)



Rys. 7.13. Pomiar interferometryczny PMD: a) słabe sprzężenie modów, b) silne sprzężenie modów [158]

Interferometryczna odpowiedź dla przypadku silnego sprzężenia modów odpowiada (wykluczając pik centralny) krzywej Gaussa – rysunek 7.13b. PMD jest określane dwiema metodami – bezpośrednio z wymiarów krzywej Gaussa lub za pomocą algorytmu bazującego na obliczeniach pierwiastka kwadratowego z momentu bezwładności interferometrycznej odpowiedzi [158, 178].

Wymiary krzywej Gaussa są powiązane z DGD [179]:

$$\text{RMS DGD: } \langle \Delta \tau^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (7.18)$$

$$\text{średnie DGD: } \langle \Delta \tau \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \quad (7.19)$$

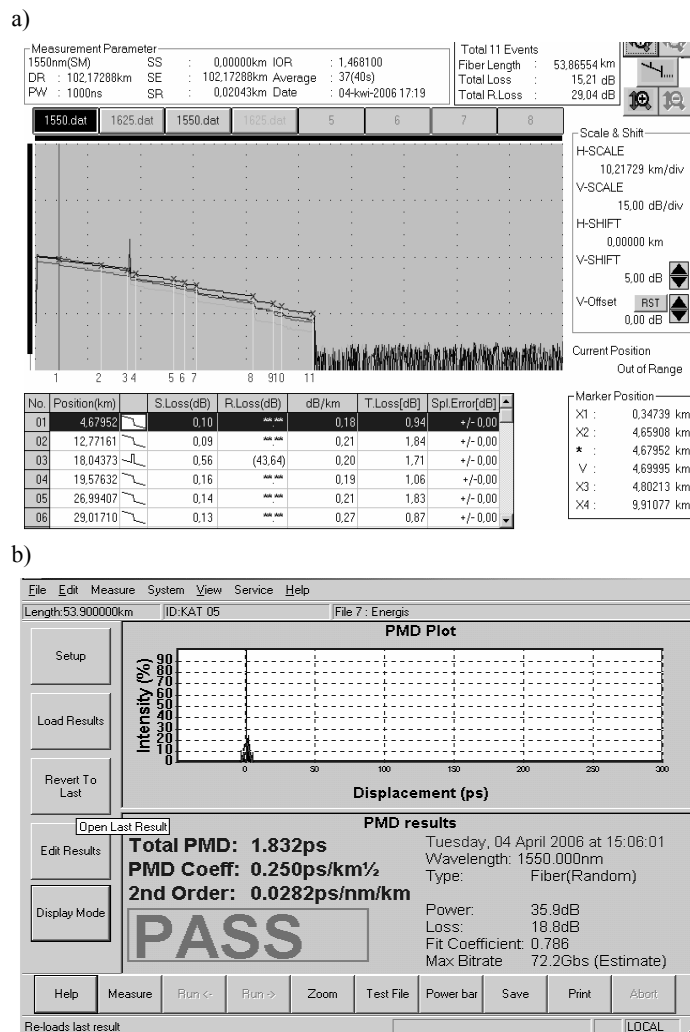
gdzie:

σ – standardowe odchylenie krzywej Gaussa otrzymywanej z interferogramu.

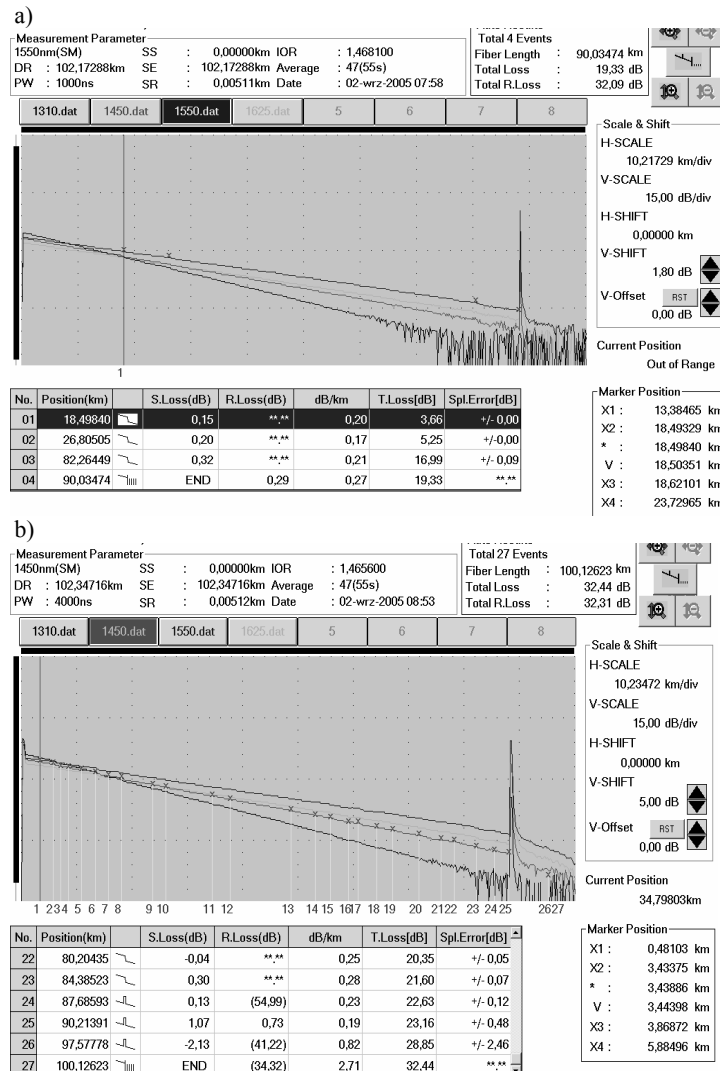
PMD fluktuuje losowo w czasie, kolejne pomiary tego samego włókna mogą różnić się nawet o 20% lub więcej [167]. Różnice w pomiarach występują bez względu na

zastosowaną metodę pomiaru [180]. Dlatego też poniżej przedstawione pomiary każdego włókna wykonywano czterokrotnie, a wynik uśredniano.

Liczba przeprowadzonych pomiarów dyspersji polaryzacyjnej (17 rzeczywistych tras optotelekomunikacyjnych zbudowanych na światłowodach MC-SMF G.652) nie pozwoliła (ograniczony dostęp autora do sprzętu pomiarowego PMD) na jednoznaczne wnioski co do wpływu liczby i jakości spoin na PMD w rzeczywistych trasach optotelekomunikacyjnych – przykładowy pomiar rysunek 7.14. Można było jednak stwierdzić, że duża liczba i zła jakość termicznych połączeń nie może być wskaźnikiem małej wartości PMD całej trasy, nawet dla tego samego typu światłowodów znajdujących się w jednym kablu i różniących się zdecydowanie liczbą i jakością spoin – rysunek 7.15.



Rys. 7.14. Okna pomiarowe: a) pomiar reflektometryczny trasy z widoczną obecnością złączy rozłącznych i 10 spoin – czułość pomiaru 0,02 dB, b) pomiar dyspersji polaryzacyjnej tejże trasy $PMD_{LLCcoeff} = 0,25 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ [praca pod kierunkiem autora]



Rys. 7.15. Pomiar reflektometryczny dwóch włókien w tym samym kablu: a) włókno z 3 spoinami – czułość pomiaru 0,02 dB – wykazujące (średnia z czterokrotnych pomiarów) $PMD_{LLC_{coeff}} = 0,1238 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, b) włókno z 25 spoinami – czułość pomiaru 0,02 dB – wykazujące (średnia z czterokrotnych pomiarów) $PMD_{LLC_{coeff}} = 1,1594 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ [wyniki własne]

Na rysunku 7.15a przedstawiono pomiar reflektometryczny włókna z wykazanymi 3 spoinami (czułość pomiaru 0,02 dB), dla którego $PMD_{LLC_{coeff}} = 0,1238 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ teoretycznie ograniczające transmisję 10 Gbit/s do 6525 km, a na rysunku 7.15b pomiar reflektometryczny innego włókna w tym samym kablu z wykazanymi 25 spoinami, w tym wykazującymi ujemne jednokierunkowe tłumienie (czułość pomiaru 0,02 dB),

dla którego $PMD_{LLCcoeff} = 1,1594 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ teoretycznie ograniczające transmisję 10 Gbit/s do 74 km.

W rzeczywistych traktach optotelekomunikacyjnych nie można zatem wnioskować o PMD na podstawie liczby i jakości termicznych połączeń. Duża liczba i zła jakość termicznych połączeń (spoin) nie może być wskaźnikiem małej wartości PMD całej trasy, nawet dla tego samego typu światłowodów znajdujących się w jednym kablu i różniących zdecydowanie liczbą i jakością spoin.

W ostatnich latach opublikowano szereg prac, w tym z udziałem autora [70, 181], dotyczących wpływu temperatury, barwienia, ściskania, skręcania, zginania, naprężeń, kablowania włókien na zmiany wartości PMD. Problem jednak polega na tym, iż do tej pory nie usystematyzowano tych zmiany tak, aby stały się one w pełni przewidywalne.

8. Zakończenie

Praca dotyczy jednomodowych światłowodów włóknistych o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym, tj. jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych i ich termicznych połączeń. Na początku omówiono teoretyczne podstawy teorii propagacji w takich włóknach i strat mocy optycznej przy ich łączeniu. Źródła strat wynikają z niedopasowania promieni pól modowych, przesunięcia osi, przerw lub pochylenia w łączonych światłowodach. Termiczne łączenie wyklucza przerwy lub pochylenia. Optymalizacja spoiny polega więc na dopasowaniu pól modowych i zminimalizowaniu przesunięcia osi łączonych włókien. Dopasowanie pól modowych uzyskuje się poprzez dyfuzję domieszek rdzeniowych światłowodów jednomodowych. Jest to możliwe, gdyż współczynniki dyfuzji zależą od koncentracji domieszek. Im większa koncentracja (mniejsza średnica rdzenia i pola modu), tym większe są wartości współczynników dyfuzji. Dyfuzja wprowadza jednak obszar przejściowy TRD (*Termicznie Rozdyfundowana Domieszka*) o określonych wymiarach. Obszar ten wnosi straty i wymaga optymalizacji. Oprócz dopasowania promieni pól modowych pozytywną cechą obszaru TRD jest praktycznie sprowadzenie do zera strat odbić fresnelowskich, gdyż następuje wyrównanie stałych propagacji w miejscu łączenia oraz mniejsza wrażliwość połączeń na przesunięcia osi i rozrzut geometrycznych wymiarów światłowodów.

Dyfuzyjne rozkłady domieszek rdzeniowych, które odpowiadają formom profili współczynników załamania, można aproksymować funkcją Gaussa. Dla gaussowskiego profilu współczynnika załamania nie istnieje analityczne rozwiązanie równania falowego. Natomiast dla tychże gaussowskich profili współczynników załamania szczególnie przydatny (dokładność kilku % [103]) jest gaussowski opis rozkładu pola modu podstawowego. Pole modu ma czysto gaussowski rozkład tylko dla nieograniczonego parabolicznego rozkładu współczynnika załamania. Stosowany jest również z powodzeniem do opisu pola modu dla światłowodów ze skokowym profilem współczynnika załamania.

Gaussowska forma profilu ma duże praktyczne znaczenie, gdyż po pierwsze odzwierciedla procesy dyfuzji domieszek między rdzeniem a płaszczem w procesie produkcji włókien, a po drugie można takim profilem aproksymować rozkłady współczynników załamania w obszarze przejściowym światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów łączonych metodami termicznymi. W tak łączonych włóknach można, dzięki odpowiedniemu rozdyfundowaniu domieszek, uzyskać obszar przejściowy TRD.

Pierwszym krokiem do analizy procesów dyfuzyjnych w obszarach TRD było określenie wartości współczynników dyfuzji GeO_2 w plastycznym ($t \approx 2000^\circ\text{C}$) szkle krzemionkowym SiO_2 . W tym celu opracowano metodę opartą na analizie obrazów termoluminescencji gorących spoin, umożliwiającą obliczenie, według wiedzy autora po raz pierwszy, współczynników dyfuzji GeO_2 w plastycznym SiO_2 oraz określenie typów domieszki: węzłowa, międzywęzłowa.

W pracy przedstawiono procesy dyfuzyjne w obszarach TRD. Znając współczynniki dyfuzji, zaprezentowano rozkłady dyfuzyjne domieszki rdzeniowej GeO_2 w spajanych światłowodach – obszarach TRD, w $t \approx 2000^\circ\text{C}$. Zaprezentowano gaussowską aproksymację rozkładów koncentracji domieszki rdzeniowej oraz współczynników załamania w obszarze termicznego łączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów. Przeanalizowano teoretycznie i obliczono tłumienie obszarów TRD łączonych termicznie światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów. W analizie uwzględniono straty wynikające z niedopasowania pól modowych łączonych

włókien i równocześnie wymiarów obszarów przejściowych. Przedstawiona analiza pozwala, przy znajomości wartości współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej, temperatury i czasu łączenia, przewidzieć tłumienie połączenia światłowodów włóknistych różnych typów. Stwierdzono zgodność teoretycznych wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi termicznego łączenia światłowodów telekomunikacyjnych istotnie różniących się parametrami.

W pracy, dla profili współczynników załamania skokowego, gaussowskiego i potęgowego, dla których rozkład pola modu podstawowego LP_{01} można aproksymować funkcją Gaussa, określono tzw. profile równej objętości. Dla tych form profili pokazano, że włókna pozostają jednomodowe niezależnie od zmieniających się wartości promieni rdzenia, np. po dyfuzji. Wykazano, że ponieważ profil gaussowski dobrze aproksymuje rozkład dyfuzyjny, tym samym termicznie rozdyfundowany obszar rdzenia, ze stałą ilością domieszki w obszarze dyfuzji, pozostaje jednomodowy.

Telekomunikacyjne światłowody z dużą powierzchnią efektywną A_{eff} zmniejszają, przede wszystkim w liniach dalekiego zasięgu, gęstość transmitowanej mocy optycznej i tym samym zmniejszają wpływ efektów nieliniowych na transmisję. Światłowody te charakteryzują się wieloskokowymi profilami współczynników załamania w rdzeniu domieszkowanym najczęściej naprzemiennie fluorem i GeO_2 . W pracy zaprezentowano symulację procesów termicznego łączenia światłowodów z dużą powierzchnią efektywną A_{eff} ze standardowymi światłowodami telekomunikacyjnymi. Celem symulacji było zaprojektowanie procesu dyfuzji w łączonych włóknach, tak aby nastąpiło wyrównanie promieni pól modowych łączonych włókien. Symulacja pokazała, że profile współczynników załamania tak we włóknach z wieloskokowym, jak i jednoskokowym (standardowe) profilami współczynników załamania osiągają po odpowiednio zaprojektowanym termicznym procesie taki rozkład dyfuzyjny, że można go aproksymować rozkładem gaussowskim. Zaprezentowano wyniki obliczeń tłumienia powyższych połączeń przed i po procesie dyfuzji.

Przed początkowymi badaniami eksperymentalnymi termicznego łączenia włókien, dla wybranych typów światłowodów, przeprowadzono pomiary profili współczynników załamania, wymiarów geometrycznych, średnicy pola modu, długości fali odcięcia, tłumienności i dyspersji chromatycznej. Wyniki zaprezentowano w pracy.

Zaprezentowano również technikę spajania w łuku elektrycznym oraz możliwości interpretacyjne wynikające z analizy obrazów termoluminescencji zdejmowanych podczas termicznego łączenia.

Do pomiaru tłumienia spoin używano reflektometrów optycznych OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). Praca zawiera, zdaniem autora, wzbogaconą w stosunku do przedstawianej w literaturze teoretyczną i wynikającą z eksperymentów, analizę jedno- i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych spoin światłowodów telekomunikacyjnych różniących się parametrami technologicznymi i transmisyjnymi. W analizie uwzględniono zależność jednokierunkowych i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych tłumienia spawów od ilorazu promieni pól modowych i od przesunięcia osi łączonych włókien w funkcji długości fali pomiarowej. Wykazano, że na podstawie analizy jednokierunkowych pomiarów tłumienia spoin można określić typy łączonych włókien. Ma to ważne praktyczne znaczenie ze względu na możliwość identyfikowania typów włókien odległych od miejsca pomiaru. Przedstawiono metodę, bazującą na analizie jednokierunkowych pomiarów reflektometrycznych, jednoznacznie stwierdzającą istnienie obszaru TRD w łączonych włóknach, tj. obszaru dopasowania średnic pól modowych. Zaprezentowano analizę i reflektometryczne pomiary mikro-

i makrozgieć w jednomodowych światłowodach standardowych dla poszerzonego zakresu długości fal pomiarowych $\lambda = 1310, 1450, 1550$ i 1625 nm. Efektem badań nad analizą pomiarów reflektometrycznych była opisana w pracy i opatentowana przez autora metoda korekcji błędów w reflektometrycznych pomiarach długości odcinków spawanych jednomodowych światłowodów włóknistych.

Na podstawie teoretycznych badań nad obszarami TRD przeprowadzono eksperymenty optymalizacji łączenia światłowodów standardowych MC-SMF i DC-SMF (G.652), z przesuniętą dyspersją DS SMF (G.653) i z niezerową dyspersją NZDS SMF (G.655). Zaprezentowano wyniki optymalizacji spawania dla różnych kombinacji połączeń powyższych światłowodów, które były zgodne z wynikami teoretycznymi. Nie stwierdzono wpływu technologii wykonania włókien na proces optymalizacji.

Należy podkreślić, że zgodność i korelacja teoretycznych wyników optymalizacji, opartych na danych eksperymentalnych uzyskanych za pomocą spawarki FSU 925RTC dla $t \approx 2000^\circ\text{C}$, i eksperymentalnych wyników zgrzewania spawarką Furukawa S175 dla $t \approx 1900^\circ\text{C}$ świadczą o tym, że teoretyczne wyniki optymalizacji tłumienia spoin mają charakter ogólny. Mogą zatem dotyczyć różnych warunków zgrzewania. Zdaniem autora, przedstawione w pracy teoretyczne i eksperymentalne metody badawcze można również bezpośrednio zastosować do optymalizacji termicznego łączenia – między sobą i z włóknami telekomunikacyjnymi – włókien specjalnych (domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich: Er, Pr, Nd, Yb), używanych najczęściej we wzmacniaczach i laserach światłowodowych.

Dla praktyki połączeń spajanych istotne są również warunki klimatyczne, w jakich wykonywany jest ten proces, dlatego też przeprowadzono badania wpływu temperatury i wilgotności otoczenia na proces termicznego łączenia światłowodów telekomunikacyjnych w łuku elektrycznym. Zaprezentowano wyniki optymalizacji procesów spawania jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych w warunkach klimatycznych odpowiadających temperaturze $t = -2 \div 32^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\text{RH} = 70 \div 92\%$. Zaprezentowano wyniki pomiarów tłumienia, reflektancji i wytrzymałości na zrywanie, spoin jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych wykonanych w ekstremalnych warunkach klimatycznych. Przedstawiono sposób określenia warunków klimatycznych łączenia, tj. temperatury, wilgotności względnej i punktu rosy wykluczających możliwość poprawnego wykonania spawów.

Badania mikroskopowe i mikroanaliza rentgenowska otrzymanych spoin miały na celu precyzyjne określenie rzeczywistych wymiarów obszarów TRD. Niestety dostępna czułość mikroanalizy składu ($1\text{at}\%$) nie pozwoliła na precyzyjne obserwacje obszaru TRD. Również badania wykonane za pomocą mikroskopów optycznych i elektronowego mikroskopu skaningowego nie dały jednoznacznej odpowiedzi co do wymiarów obszaru przejściowego.

Wyniki badań wytrzymałości spoin na zrywanie wskazały, dla połączeń włókien wytworzonych różnymi technologiami i wykonanych standardowo oraz z zastosowaniem procesu optymalizacji w różnych warunkach klimatycznych, na brak zmian lub wtrąceń strukturalnych w spoinach, co wykazały również wcześniejsze obserwacje mikroskopowe.

Charakteryzację termicznych połączeń jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych kończą w pracy badania wpływu spoin na dyspersję chromatyczną i polaryzacyjną w rzeczywistych, eksploatowanych traktach światłowodowych.

Dyspersja chromatyczna zależy od właściwości materiału oraz od struktury światłowodu, jednakże nie ma teoretycznych przesłanek, aby quasi-punktowe zmiany wła-

ściwości szkła czy struktury (konstrukcji) włókna wpływały na wartość dyspersji chromatycznej trasy. Potwierdziły to pomiary około 50.000 km linii złożonych z termicznie spajanych włókien, wykonane przez autora i współpracowników.

W celu określenia wpływu liczby i jakości spawów na PMD autor przeprowadził pomiary reflektometryczne z równoczesnymi pomiarami dyspersji polaryzacyjnej kilkunastu rzeczywistych traktów światłowodowych. Duża liczba i zła jakość spoin powinny powodować sprzężenie ortogonalnych modów, zmniejszając tym samym PMD. Z przeprowadzonych badań można było tylko stwierdzić, że duża liczba i zła jakość termicznych połączeń nie może być wskaźnikiem małej wartości PMD całej trasy, nawet dla tego samego typu światłowodów (co nie jest tożsame z identycznością), znajdujących się w jednym kablu i zdecydowanie różniących się liczbą i jakością spoin.

Załącznik 1

**Wyniki reflektometrycznych pomiarów tłumienia spoin światłowodów MC SMF
i DC SMF dla 63 programów zgrzewania – rozdział 6.1**

Tabela 1. Tłumienie spoin w połączeniach MC SMF – MC SMF

| Nr | Czas 2 | Prąd 2 | Spawarka | $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ | | | $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | |
|----|--------|--------|----------|------------------------------|------|-------|------------------------------|------|-------|
| | | | | A12 | A21 | As | A12 | A21 | As |
| 1 | 1 | 15 | 0,06 | -0,10 | 0,18 | 0,04 | -0,08 | 0,16 | 0,04 |
| 2 | 1,5 | 15 | 0,03 | -0,10 | 0,15 | 0,025 | -0,09 | 0,14 | 0,025 |
| 3 | 2 | 15 | 0,04 | -0,09 | 0,16 | 0,035 | -0,12 | 0,14 | 0,01 |
| 4 | 2,5 | 15 | 0,03 | -0,13 | 0,16 | 0,015 | -0,09 | 0,15 | 0,03 |
| 5 | 3 | 15 | 0,06 | -0,06 | 0,23 | 0,085 | -0,07 | 0,18 | 0,055 |
| 6 | 3,5 | 15 | 0,04 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,14 | 0,015 |
| 7 | 4 | 15 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,10 | 0,14 | 0,02 |
| 8 | 4,5 | 15 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,08 | 0,15 | 0,035 |
| 9 | 5 | 15 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,10 | 0,12 | 0,01 |
| 10 | 1 | 15,5 | 0,04 | -0,13 | 0,14 | 0,005 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 11 | 1,5 | 15,5 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 12 | 2 | 15,5 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,10 | 0,13 | 0,015 |
| 13 | 2,5 | 15,5 | 0,05 | -0,11 | 0,17 | 0,03 | -0,08 | 0,17 | 0,045 |
| 14 | 3 | 15,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 15 | 3,5 | 15,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 16 | 4 | 15,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 17 | 4,5 | 15,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,12 | 0 |
| 18 | 5 | 15,5 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 19 | 1 | 16 | 0,04 | -0,13 | 0,14 | 0,005 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 20 | 1,5 | 16 | 0,04 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,10 | 0,14 | 0,02 |
| 21 | 2 | 16 | 0,01 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 22 | 2,5 | 16 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 23 | 3 | 16 | 0,01 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,12 | 0 |
| 24 | 3,5 | 16 | 0,02 | -0,11 | 0,15 | 0,02 | -0,10 | 0,13 | 0,015 |
| 25 | 4 | 16 | 0,01 | -0,11 | 0,15 | 0,02 | -0,10 | 0,13 | 0,015 |
| 26 | 4,5 | 16 | 0,02 | -0,11 | 0,15 | 0,02 | -0,10 | 0,14 | 0,02 |
| 27 | 5 | 16 | 0,02 | -0,11 | 0,15 | 0,02 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 28 | 1 | 16,5 | 0,02 | -0,12 | 0,15 | 0,015 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 29 | 1,5 | 16,5 | 0,03 | -0,12 | 0,15 | 0,015 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 30 | 2 | 16,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 31 | 2,5 | 16,5 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 32 | 3 | 16,5 | 0,03 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,10 | 0,13 | 0,015 |
| 33 | 3,5 | 16,5 | 0,01 | -0,14 | 0,14 | 0 | -0,11 | 0,12 | 0,005 |
| 34 | 4 | 16,5 | 0,02 | -0,12 | 0,15 | 0,015 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 35 | 4,5 | 16,5 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,10 | 0,15 | 0,025 |
| 36 | 5 | 16,5 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 37 | 1 | 17 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 38 | 1,5 | 17 | 0,04 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 39 | 2 | 17 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 40 | 2,5 | 17 | 0,02 | -0,11 | 0,17 | 0,03 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 41 | 3 | 17 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 42 | 3,5 | 17 | 0,01 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 43 | 4 | 17 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,10 | 0,14 | 0,02 |
| 44 | 4,5 | 17 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,09 | 0,14 | 0,025 |
| 45 | 5 | 17 | 0,02 | -0,10 | 0,18 | 0,04 | -0,07 | 0,15 | 0,04 |
| 46 | 1 | 17,5 | 0,02 | -0,11 | 0,15 | 0,02 | -0,07 | 0,13 | 0,03 |
| 47 | 1,5 | 17,5 | 0,04 | -0,10 | 0,16 | 0,03 | -0,05 | 0,13 | 0,04 |
| 48 | 2 | 17,5 | 0,02 | -0,14 | 0,15 | 0,005 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 49 | 2,5 | 17,5 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,14 | 0,01 |
| 50 | 3 | 17,5 | 0,01 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,14 | 0,015 |
| 51 | 3,5 | 17,5 | 0,01 | -0,14 | 0,15 | 0,005 | -0,11 | 0,14 | 0,015 |
| 52 | 4 | 17,5 | 0,02 | -0,12 | 0,15 | 0,015 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 53 | 4,5 | 17,5 | 0,04 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,11 | 0,14 | 0,015 |
| 54 | 5 | 17,5 | 0,01 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,12 | 0,12 | 0 |
| 55 | 1 | 18 | 0,02 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,12 | 0,13 | 0,005 |
| 56 | 1,5 | 18 | 0,01 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 57 | 2 | 18 | 0,01 | -0,13 | 0,14 | 0,005 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 58 | 2,5 | 18 | 0,01 | -0,12 | 0,15 | 0,015 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 59 | 3 | 18 | 0,01 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 60 | 3,5 | 18 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,10 | 0,13 | 0,015 |
| 61 | 4 | 18 | 0,01 | -0,13 | 0,15 | 0,01 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |
| 62 | 4,5 | 18 | 0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,02 | -0,10 | 0,14 | 0,02 |
| 63 | 5 | 18 | 0,04 | -0,13 | 0,16 | 0,015 | -0,11 | 0,13 | 0,01 |

Tabela 2. Tłumienie spoin w połączeniach MC SMF – DC SMF

| Nr | Czas 2 | Prąd 2 | Spawarka | $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ | | | $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | |
|----|--------|--------|----------|------------------------------|------|-------|------------------------------|------|-------|
| | | | | A12 | A21 | As | A12 | A21 | As |
| 1 | 1 | 15 | 0,04 | -0,16 | 0,24 | 0,04 | -0,19 | 0,28 | 0,045 |
| 2 | 1,5 | 15 | 0,05 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 3 | 2 | 15 | 0,08 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 4 | 2,5 | 15 | 0,08 | -0,14 | 0,26 | 0,06 | -0,17 | 0,30 | 0,065 |
| 5 | 3 | 15 | 0,08 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 6 | 3,5 | 15 | 0,05 | -0,15 | 0,25 | 0,05 | -0,19 | 0,27 | 0,04 |
| 7 | 4 | 15 | 0,03 | -0,13 | 0,27 | 0,07 | -0,17 | 0,29 | 0,06 |
| 8 | 4,5 | 15 | 0,05 | -0,14 | 0,18 | 0,02 | -0,15 | 0,19 | 0,02 |
| 9 | 5 | 15 | 0,09 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,19 | 0,27 | 0,04 |
| 10 | 1 | 15,5 | 0,11 | -0,14 | 0,26 | 0,06 | -0,16 | 0,30 | 0,07 |
| 11 | 1,5 | 15,5 | 0,04 | -0,12 | 0,29 | 0,085 | -0,15 | 0,31 | 0,08 |
| 12 | 2 | 15,5 | 0,04 | -0,14 | 0,27 | 0,065 | -0,17 | 0,30 | 0,065 |
| 13 | 2,5 | 15,5 | 0,03 | -0,17 | 0,22 | 0,025 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 14 | 3 | 15,5 | 0,06 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 15 | 3,5 | 15,5 | 0,14 | -0,18 | 0,22 | 0,02 | -0,21 | 0,26 | 0,025 |
| 16 | 4 | 15,5 | 0,03 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 17 | 4,5 | 15,5 | 0,13 | -0,16 | 0,24 | 0,04 | -0,20 | 0,28 | 0,04 |
| 18 | 5 | 15,5 | 0,04 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 19 | 1 | 16 | 0,07 | -0,12 | 0,21 | 0,045 | -0,11 | 0,23 | 0,06 |
| 20 | 1,5 | 16 | 0,02 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,20 | 0,26 | 0,03 |
| 21 | 2 | 16 | 0,07 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 22 | 2,5 | 16 | 0,02 | -0,15 | 0,25 | 0,05 | -0,19 | 0,28 | 0,045 |
| 23 | 3 | 16 | 0,02 | -0,16 | 0,24 | 0,04 | -0,19 | 0,27 | 0,04 |
| 24 | 3,5 | 16 | 0,07 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 25 | 4 | 16 | 0,04 | -0,14 | 0,27 | 0,065 | -0,17 | 0,31 | 0,07 |
| 26 | 4,5 | 16 | 0,04 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 27 | 5 | 16 | 0,04 | -0,14 | 0,27 | 0,065 | -0,18 | 0,29 | 0,055 |
| 28 | 1 | 16,5 | 0,05 | -0,13 | 0,28 | 0,075 | -0,16 | 0,31 | 0,075 |
| 29 | 1,5 | 16,5 | 0,07 | -0,14 | 0,27 | 0,065 | -0,18 | 0,30 | 0,06 |
| 30 | 2 | 16,5 | 0,04 | -0,13 | 0,28 | 0,075 | -0,17 | 0,31 | 0,07 |
| 31 | 2,5 | 16,5 | 0,02 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 32 | 3 | 16,5 | 0,03 | -0,16 | 0,24 | 0,04 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 33 | 3,5 | 16,5 | 0,04 | -0,14 | 0,26 | 0,06 | -0,18 | 0,29 | 0,055 |
| 34 | 4 | 16,5 | 0,06 | -0,14 | 0,27 | 0,065 | -0,19 | 0,29 | 0,05 |
| 35 | 4,5 | 16,5 | 0,07 | -0,16 | 0,25 | 0,045 | -0,20 | 0,28 | 0,04 |
| 36 | 5 | 16,5 | 0,05 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,18 | 0,30 | 0,06 |
| 37 | 1 | 17 | 0,05 | -0,15 | 0,26 | 0,055 | -0,19 | 0,29 | 0,05 |
| 38 | 1,5 | 17 | 0,07 | -0,18 | 0,23 | 0,025 | -0,21 | 0,26 | 0,025 |
| 39 | 2 | 17 | 0,06 | -0,12 | 0,28 | 0,08 | -0,17 | 0,30 | 0,065 |
| 40 | 2,5 | 17 | 0,05 | -0,17 | 0,23 | 0,03 | -0,21 | 0,27 | 0,03 |
| 41 | 3 | 17 | 0,04 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 42 | 3,5 | 17 | 0,03 | -0,17 | 0,25 | 0,04 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 43 | 4 | 17 | 0,05 | -0,14 | 0,31 | 0,085 | -0,15 | 0,27 | 0,06 |
| 44 | 4,5 | 17 | 0,03 | -0,14 | 0,26 | 0,06 | -0,19 | 0,28 | 0,045 |
| 45 | 5 | 17 | 0,05 | -0,15 | 0,26 | 0,055 | -0,18 | 0,29 | 0,055 |
| 46 | 1 | 17,5 | 0,04 | -0,16 | 0,25 | 0,045 | -0,20 | 0,28 | 0,04 |
| 47 | 1,5 | 17,5 | 0,06 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,20 | 0,26 | 0,03 |
| 48 | 2 | 17,5 | 0,02 | -0,14 | 0,25 | 0,055 | -0,18 | 0,28 | 0,05 |
| 49 | 2,5 | 17,5 | 0,05 | -0,13 | 0,27 | 0,07 | -0,17 | 0,37 | 0,1 |
| 50 | 3 | 17,5 | 0,01 | -0,17 | 0,24 | 0,035 | -0,20 | 0,27 | 0,035 |
| 51 | 3,5 | 17,5 | 0,03 | -0,08 | 0,32 | 0,12 | -0,13 | 0,35 | 0,11 |
| 52 | 4 | 17,5 | 0,06 | 0,00 | 0,28 | 0,14 | -0,06 | 0,28 | 0,11 |
| 53 | 4,5 | 17,5 | 0,01 | -0,12 | 0,20 | 0,04 | -0,12 | 0,23 | 0,055 |
| 54 | 5 | 17,5 | 0,02 | -0,06 | 0,26 | 0,1 | -0,05 | 0,30 | 0,125 |
| 55 | 1 | 18 | 0,01 | -0,13 | 0,20 | 0,035 | -0,14 | 0,21 | 0,035 |
| 56 | 1,5 | 18 | 0,02 | -0,11 | 0,22 | 0,055 | -0,12 | 0,22 | 0,05 |
| 57 | 2 | 18 | 0,05 | -0,06 | 0,26 | 0,1 | 0,00 | 0,33 | 0,165 |
| 58 | 2,5 | 18 | 0,03 | -0,13 | 0,19 | 0,03 | -0,14 | 0,20 | 0,03 |
| 59 | 3 | 18 | 0,04 | -0,12 | 0,20 | 0,04 | -0,13 | 0,21 | 0,04 |
| 60 | 3,5 | 18 | 0,02 | -0,13 | 0,18 | 0,025 | -0,16 | 0,20 | 0,02 |
| 61 | 4 | 18 | 0,03 | -0,10 | 0,22 | 0,06 | -0,12 | 0,23 | 0,055 |
| 62 | 4,5 | 18 | 0,02 | -0,14 | 0,18 | 0,02 | -0,15 | 0,18 | 0,015 |
| 63 | 5 | 18 | 0,02 | 0,00 | 0,28 | 0,14 | 0,00 | 0,31 | 0,155 |

Tabela 3. Tłumienie spoin w połączeniach DC SMF – DC SMF

| Nr | Czas 2 | Prąd 2 | Spawarka | $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$ | | | $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ | | |
|----|--------|--------|----------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | | | | A21 | A12 | As | A21 | A12 | As |
| 1 | 1 | 15 | 0,08 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,14 | 0,06 | 0,1 |
| 2 | 1,5 | 15 | 0,2 | 0,24 | 0,12 | 0,18 | 0,21 | 0,12 | 0,165 |
| 3 | 2 | 15 | 0,09 | 0,26 | 0,14 | 0,2 | 0,23 | 0,13 | 0,18 |
| 4 | 2,5 | 15 | 0,24 | 0,24 | 0,11 | 0,175 | 0,19 | 0,10 | 0,145 |
| 5 | 3 | 15 | 0,1 | 0,19 | 0,06 | 0,125 | 0,15 | 0,07 | 0,11 |
| 6 | 3,5 | 15 | 0,14 | 0,18 | 0,08 | 0,13 | 0,21 | 0,09 | 0,15 |
| 7 | 4 | 15 | 0,1 | 0,18 | 0,06 | 0,12 | 0,14 | 0,06 | 0,1 |
| 8 | 4,5 | 15 | 0,08 | 0,18 | 0,06 | 0,12 | 0,15 | 0,06 | 0,105 |
| 9 | 5 | 15 | 0,06 | 0,22 | 0,09 | 0,155 | 0,17 | 0,09 | 0,13 |
| 10 | 1 | 15,5 | 0,21 | 0,17 | 0,04 | 0,105 | 0,14 | 0,05 | 0,095 |
| 11 | 1,5 | 15,5 | 0,13 | 0,25 | 0,12 | 0,185 | 0,18 | 0,11 | 0,145 |
| 12 | 2 | 15,5 | 0,1 | 0,19 | 0,06 | 0,125 | 0,15 | 0,07 | 0,11 |
| 13 | 2,5 | 15,5 | 0,12 | 0,16 | 0,04 | 0,1 | 0,15 | 0,05 | 0,1 |
| 14 | 3 | 15,5 | 0,15 | 0,23 | 0,10 | 0,165 | 0,19 | 0,10 | 0,145 |
| 15 | 3,5 | 15,5 | 0,06 | 0,17 | 0,04 | 0,105 | 0,12 | 0,05 | 0,085 |
| 16 | 4 | 15,5 | 0,15 | 0,22 | 0,09 | 0,155 | 0,18 | 0,09 | 0,135 |
| 17 | 4,5 | 15,5 | 0,06 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,15 | 0,05 | 0,1 |
| 18 | 5 | 15,5 | 0,08 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,13 | 0,04 | 0,085 |
| 19 | 1 | 16 | 0,14 | 0,17 | 0,04 | 0,105 | 0,14 | 0,04 | 0,09 |
| 20 | 1,5 | 16 | 0,15 | 0,12 | 0,03 | 0,075 | 0,15 | 0,02 | 0,085 |
| 21 | 2 | 16 | 0,12 | 0,23 | 0,10 | 0,165 | 0,18 | 0,10 | 0,14 |
| 22 | 2,5 | 16 | 0,07 | 0,21 | 0,08 | 0,145 | 0,16 | 0,07 | 0,115 |
| 23 | 3 | 16 | 0,16 | 0,19 | 0,06 | 0,125 | 0,15 | 0,07 | 0,11 |
| 24 | 3,5 | 16 | 0,14 | 0,23 | 0,10 | 0,165 | 0,17 | 0,07 | 0,12 |
| 25 | 4 | 16 | 0,16 | 0,16 | 0,06 | 0,11 | 0,20 | 0,07 | 0,135 |
| 26 | 4,5 | 16 | 0,12 | 0,25 | 0,13 | 0,19 | 0,18 | 0,10 | 0,14 |
| 27 | 5 | 16 | 0,12 | 0,09 | -0,04 | 0,025 | 0,08 | -0,03 | 0,025 |
| 28 | 1 | 16,5 | 0,1 | 0,17 | 0,05 | 0,11 | 0,13 | 0,02 | 0,075 |
| 29 | 1,5 | 16,5 | 0,28 | 0,17 | 0,05 | 0,11 | 0,13 | 0,04 | 0,085 |
| 30 | 2 | 16,5 | 0,12 | 0,17 | 0,04 | 0,105 | 0,12 | 0,03 | 0,075 |
| 31 | 2,5 | 16,5 | 0,14 | 0,21 | 0,08 | 0,145 | 0,16 | 0,06 | 0,11 |
| 32 | 3 | 16,5 | 0,07 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,14 | 0,04 | 0,09 |
| 33 | 3,5 | 16,5 | 0,09 | 0,23 | 0,10 | 0,165 | 0,19 | 0,09 | 0,14 |
| 34 | 4 | 16,5 | 0,16 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,14 | 0,05 | 0,095 |
| 35 | 4,5 | 16,5 | 0,15 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,14 | 0,05 | 0,095 |
| 36 | 5 | 16,5 | 0,13 | 0,29 | 0,15 | 0,22 | 0,21 | 0,12 | 0,165 |
| 37 | 1 | 17 | 0,06 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,16 | 0,04 | 0,1 |
| 38 | 1,5 | 17 | 0,16 | 0,22 | 0,09 | 0,155 | 0,17 | 0,08 | 0,125 |
| 39 | 2 | 17 | 0,1 | 0,20 | 0,07 | 0,135 | 0,16 | 0,06 | 0,11 |
| 40 | 2,5 | 17 | 0,15 | 0,30 | 0,17 | 0,235 | 0,23 | 0,14 | 0,185 |
| 41 | 3 | 17 | 0,14 | 0,20 | 0,08 | 0,14 | 0,16 | 0,06 | 0,11 |
| 42 | 3,5 | 17 | 0,08 | 0,14 | 0,02 | 0,08 | 0,11 | 0,02 | 0,065 |
| 43 | 4 | 17 | 0,08 | 0,21 | 0,09 | 0,15 | 0,20 | 0,10 | 0,15 |
| 44 | 4,5 | 17 | 0,09 | 0,14 | 0,01 | 0,075 | 0,13 | 0,01 | 0,07 |
| 45 | 5 | 17 | 0,08 | 0,24 | 0,11 | 0,175 | 0,17 | 0,09 | 0,13 |
| 46 | 1 | 17,5 | 0,11 | 0,20 | 0,07 | 0,135 | 0,15 | 0,06 | 0,105 |
| 47 | 1,5 | 17,5 | 0,08 | 0,20 | 0,07 | 0,135 | 0,16 | 0,06 | 0,11 |
| 48 | 2 | 17,5 | 0,08 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,14 | 0,06 | 0,1 |
| 49 | 2,5 | 17,5 | 0,07 | 0,19 | 0,06 | 0,125 | 0,14 | 0,05 | 0,095 |
| 50 | 3 | 17,5 | 0,15 | 0,24 | 0,11 | 0,175 | 0,19 | 0,09 | 0,14 |
| 51 | 3,5 | 17,5 | 0,12 | 0,16 | 0,04 | 0,1 | 0,12 | 0,03 | 0,075 |
| 52 | 4 | 17,5 | 0,09 | 0,15 | 0,03 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | 0,07 |
| 53 | 4,5 | 17,5 | 0,07 | 0,19 | 0,05 | 0,12 | 0,16 | 0,07 | 0,115 |
| 54 | 5 | 17,5 | 0,16 | 0,24 | 0,11 | 0,175 | 0,24 | 0,10 | 0,17 |
| 55 | 1 | 18 | 0,13 | 0,23 | 0,09 | 0,16 | 0,17 | 0,09 | 0,13 |
| 56 | 1,5 | 18 | 0,09 | 0,21 | 0,08 | 0,145 | 0,17 | 0,08 | 0,125 |
| 57 | 2 | 18 | 0,12 | 0,23 | 0,09 | 0,16 | 0,17 | 0,09 | 0,13 |
| 58 | 2,5 | 18 | 0,09 | 0,19 | 0,06 | 0,125 | 0,13 | 0,05 | 0,09 |
| 59 | 3 | 18 | 0,14 | 0,19 | 0,05 | 0,12 | 0,16 | 0,06 | 0,11 |
| 60 | 3,5 | 18 | 0,12 | 0,20 | 0,07 | 0,135 | 0,16 | 0,08 | 0,12 |
| 61 | 4 | 18 | 0,08 | 0,18 | 0,05 | 0,115 | 0,13 | 0,05 | 0,09 |
| 62 | 4,5 | 18 | 0,13 | 0,22 | 0,09 | 0,155 | 0,18 | 0,08 | 0,13 |
| 63 | 5 | 18 | 0,12 | 0,20 | 0,06 | 0,13 | 0,15 | 0,06 | 0,105 |

Literatura

- [1] A. Majewski, *Teoria i projektowanie światłowodów*, WNT, Warszawa 1991.
- [2] A. Kowalski, *Zastosowanie wielomianów Czebyszewa do analizy światłowodów telekomunikacyjnych*, Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska, Warszawa 1992.
- [3] K. Lyytikainen, S. Huntington, A. Carter, P. McNamara, S. Fleming, J. Abramczyk, I. Kaplin, G. Schötz, *Dopant diffusion during optical fibre drawing*, Optics Express, Vol. 12, No. 6, ss. 972-977, 2004.
- [4] I. Garrett, C. Todd, *Review: Components and systems for longwavelength mono-mode fiber transmission*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 14, ss. 95-143, 1982.
- [5] C.D. Hussey, F. Martinez, *Approximate analytic forms for the propagation characteristics of single-mode fibers*, Electronics Letters, Vol. 21, s. 1103, 1985.
- [6] L.B. Jeunhomme, *Single-Mode Fiber Optics*, Marcel Dekker Inc., New York 1990.
- [7] Y.W. Li, C.D. Hussey, *Depressed cladding single mode fibers for 1300 nm operation*, IEEE Proceedings-Optoelectronics, Vol. 141, No. 3, ss. 157-162, 1994.
- [8] Zalecenie ITU-T G.652: Transmission Media Characteristics: *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*, 2003.
- [9] B.J. Ainslie, C.R. Day, *A review of single-mode fibers with modified dispersion characteristics*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 4, ss. 967-979, 1986.
- [10] Zalecenie ITU-T G.653: Transmission Media Characteristics: *Characteristics of a dispersion shifted single mode optical fibre cable*, 1996.
- [11] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, Inc., San Diego, California, 1989.
- [12] A.R. Chraplyvy, *Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, ss. 1548-1557, October 1990.
- [13] D. Marcuse, A.R. Chraplyvy, R.W. Tkach, *Effect of fiber nonlinearity on long-distance transmission*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, ss. 121-128, January 1991.
- [14] Zalecenie ITU-T G.655: Transmission Media Characteristics: *Characteristics of a non-zero dispersion shifted single mode optical fibre cable*, 2003.
- [15] www.corning.com
- [16] J. Wójcik, UMCS Lublin – informacja prywatna.
- [17] E. Desurvire, *Erbium-Doped Amplifiers: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, New York 1994.
- [18] K. Borzycki, *Włókna światłowodowe dla sieci DWDM*, XVI Krajowa Szkoła Optoelektroniki, z. 3, 2001.

- [19] H.T. Hattori, *Low nonlinearity optical fibers for broadband and long-distance communications*, Dissertation for Ph. D, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg – Virginia 1998.
- [20] Y. Namihira, *Relationship between nonlinear effective area and modefield diameter for dispersion-shifted fibers*, Electronics Letters, Vol. 30, ss. 262-264, 1994.
- [21] P. Nouchi, P. Sansonetti, S. Landais, G. Barre, C. Brehm, J.Y. Boniort, B. Perrin, J.J. Girard, J. Auge, *Low-loss single-mode fiber with high nonlinear effective area*, OFC'95, San Diego, CA, Technical Digest, ss. 260-261, 1995.
- [22] Y. Liu, A.J. Antos, M.A. Newhouse, *Large effective area dispersion-shifted fibers with dual-ring index profiles*, OFC'96, San Jose, CA, Technical Digest, ss. 165-166, 1996.
- [23] M. Kato, K. Kurukawa, Y. Miyajima, *A new design for dispersion-shifted fiber with an effective core area larger than 100 μm^2 and good bending characteristics*, OFC'98, San Jose, CA, paper ThK1, 1998.
- [24] P. Nouchi, *Maximum effective area for nonzero dispersion-shifted fiber*, OFC'98, San Jose, CA, paper ThK3, 1998.
- [25] Materiały firmy Siecor: *Fiber Focus-Communication on Glas – 3/3 Design Considerations for Single Mode Fibers*, 1999.
- [26] J-I. Sakai, T. Kimura, *Splicing and bending losses of single-mode optical fibers*, Applied Optics, Vol. 17, No. 22, ss. 3653-3659, 1978.
- [27] K. Furuya, T.C. Chong, Y. Suematsu, *Loss-loss splicing of single-mode fibers by tapered-butt-joint methods*, IEICE Transactions on Communications (Japan), Vol. E61, s. 957, 1978.
- [28] S.I. Hosain, A. Sharma, A.K. Ghatak, *Splice-loss evaluation for single-mode graded-index fibers*, Applied Optics, Vol. 21, No. 15, ss. 2717-2720, 1982.
- [29] O. Kawata, *Statistical analysis of fusion splice losses for single-mode fibers*, Applied Optics, Vol. 23, No. 19, ss. 3289-3293, 1984.
- [30] A.K. Das, S. Bhattacharyya, *Low-loss fusion splices of optical fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 3, s. 83, 1985.
- [31] D.R. Dreyer, K.A. Emig, A.R. Minthorn, *Characterization of splice loss as a function of wavelength in step-index, single-mode, optical waveguide fibers*, Proceedings of the 35th International Wire and Cable Symposium, Reno Nevada, November, ss. 220-223, 1986.
- [32] J.T. Krause, W.A. Reed, K.L. Walker, *Splice loss of single-mode fiber as related to fusion time, temperature, and index profile alteration*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 4, s. 837, 1986.
- [33] N. Amitay, H.M. Presby, F.V. Diamarcello, K.T. Nelson, *Single-mode optical fiber tapers for self-aligned beam expansion*, Electronic Letters, Vol. 22, ss. 702-703, 1986.
- [34] K. Shigihara, K. Shiraishi, K. Kawakami, *Mode field transforming fiber between dissimilar waveguides*, Journal of Applied Physics, Vol. 60, ss. 4293-4298, 1986.

- [35] W. Zheng, *Loss estimation for fusion splices of single-mode fibers*, Proceedings of SPIE, Vol. 1580, ss. 380-390, 1992.
- [36] W. Zheng, *Real time control of arc fusion for optical fiber splicing*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, No. 4, ss. 548-553, 1993.
- [37] D. Marcuse, *Loss analysis of single-mode fiber splices*, Bell System Technical Journal, Vol. 56, ss. 703-718, 1977.
- [38] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd edition, Academic Press, New York 1991.
- [39] J-P. Meunier, S.I. Hosain, *Accurate splice loss analysis for single-mode graded-index fibers with mismatched parameters*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 11, s. 1521, 1992.
- [40] J-P. Meunier, Z.H. Wang, S.I. Hosain, *Evaluation of splice loss between two non-identical single-mode graded-index fibers*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 8, ss. 998-1000, 1994.
- [41] R.L. Gallawa, A. Kumar, A. Weisshaar, *Fiber splice loss: a simple method of calculation*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 26, ss. 165-172, 1994.
- [42] W. Zheng, O. Hulton, S. Esmaeli, *Splice-loss estimation for an automated ribbon-fiber fusion splicer*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 8, ss. 1366-1378, 1999.
- [43] M. Cheng, D. Jiang, *Loss measuring and process monitoring in splicing of two different fibers*, Proceedings of SPIE, Vol. 4077, ss. 97-100, 2000.
- [44] S. Yin, K.W. Chung, H. Liu, P. Kurtz, K. Reichard, *A new design for non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF) with a large effective area over 100 μm^2 and low bending and splice loss*, Optics Communications, Vol. 177, No. 1-6, ss. 225-232, 2000.
- [45] S.R. Semen, V.V. Inyakin, S.H. Miftyadinov, L.L. Ploshay, *Investigation results of optical fiber splice cycle temperature tests*, Proceedings of SPIE, Vol. 4589, ss. 174-183, 2001.
- [46] A.V. Bourdine, *Estimation of probability distribution of reflection attenuation at optical fibers fusion splices*, Proceedings of SPIE, Vol. 4579, ss. 6-15, 2001.
- [47] A.V. Bourdine, *Coupled-mode theory application for splice of different optical fiber with arbitrary refractive index profiles*, Proceedings of SPIE, Vol. 4425, ss. 224-231, 2001.
- [48] A.V. Bourdine, *Results of dispersion-shifted optical fiber splice modeling*, Proceedings of SPIE, Vol. 4579, ss. 334-341, 2001.
- [49] H. El Ghandoor, I. Nasser, A. Abdel-Hady, A. Al-Shukri, *A comparative study of spliced optical fibers*, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 41, No. 2, ss. 277-287, 2004.
- [50] Y.-T. Tseng, T.-Y. Hung, J.-H. Liu, *A fiber splicing-plane-inspection technique using lens-fiber interference for the cascaded fiber fabrication*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 3, ss. 803-810, 2007.

- [51] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, *Thumienie spawów światłowodów o różnych średnicach rdzenia i aperturach numerycznych*, V Konf.: Światłowody i ich zastosowania – Krasnobród'96, Tom I, ss. 77-81 1996.
- [52] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, J. Zalewski, *Problemy spawania jednomodowych telekomunikacyjnych włókien światłowodowych stosowanych w Polsce i pochodzących od różnych producentów*, KST'97 – Bydgoszcz, Tom C ss. 397-402, 1997.
- [53] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, J. Zalewski, M.J. Ratuszek, *Spawanie różnych typów telekomunikacyjnych światłowodów jednomodowych stosowanych w sieciach telekomunikacyjnych*, Wojskowa Konferencja Telekomunikacji i Informatyki – Jabłonna'97, Tom II, ss. 257-266, 1997.
- [54] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Zalewski, Z. Drzycimski, *Połączenia spawane światłowodów przystosowanych do multipleksacji falowej WDM*, KST'98 – Bydgoszcz, Tom A, ss. 331-338, 1998.
- [55] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, J. Zalewski, *Światłowody telekomunikacyjne nowej generacji NZDF i ich połączenia spawane*, Wojskowa Konferencja Telekomunikacji i Informatyki – Jabłonna'98, Tom 2, ss. 187-196, 1998.
- [56] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, S. Stróżecki, J. Zalewski, T. Konefał, W. Kula, *Influence of weather conditions of splicing process and parameters of splicing single mode telecommunication fibers of different types*, Proceedings of SPIE Optical Fibers and Their Applications VI, Vol. 3731, ss. 128-132, 1999.
- [57] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Zalewski, Z. Drzycimski, *Examinations of connections of spliced fibers NZDF of TruWave type*, Proceedings of SPIE Optical Fibers and Their Applications VI, Vol. 3731, ss. 138-145, 1999.
- [58] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Zalewski, M.J. Ratuszek, *Errors and their correction in reflectometric measurements of lengths of spliced fibers*, Proceedings of SPIE Optical Fibers and Their Applications VI, Vol. 3731, ss. 133-137, 1999.
- [59] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Zalewski, *Examination of spliced telecommunication fibers of the NZDS-SMF type adjusted for wavelength division multiplexing*, Optica Applicata, Vol. XXIX, No. 1-2, ss. 73-85, 1999.
- [60] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, *Analiza jednokierunkowych reflektometrycznych pomiarów tłumienia spawów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych typów*, KST'99 – Bydgoszcz, Tom A, ss. 326-335, 1999.
- [61] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, M.J. Ratuszek, *Wpływ obszaru przejściowego spawów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych o różnych polach modu i aperturach numerycznych na ich tłumienie*, KST'99 – Bydgoszcz, Tom A, ss. 391-400, 1999.
- [62] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, *Analiza przydatności jednokierunkowych reflektometrycznych pomiarów tłumienia spawów w torach światłowodowych*, VII Konf.: Światłowody i ich zastosowania – Krasnobród'99, Tom II ss. 513-520, 1999.

- [63] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, *Optymalizacja warunków spawania i badanie połączeń spawanych jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych o różnych wartościach i profilach współczynników załamania w płaszczu i rdzeniu*, Raport z realizacji projektu badawczego KBN (1997-1999) No. 8T11D006 13, ss. 1-179, 1999.
- [64] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, S. Stróżecki, J. Zalewski, *Arc fusion splicing of telecommunication optical fibers in extreme climatic circumstances*, Proceedings of SPIE Lightguides and their Applications, Vol. 4239, ss. 150-154, 2000.
- [65] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, M.J. Ratuszek, *Diffusion processes and emerging intermediate area during arc fusion splicing of single mode optical telecommunication fibers*, Proceedings of SPIE Lightguides and their Applications, Vol. 4239, ss. 155-167, 2000.
- [66] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, M.J. Ratuszek, *Process optimization of the arc fusion splicing different types of single mode telecommunication fibers*, Opto-Electronics Review, Vol. 8, No. 2, ss. 161-170, 2000.
- [67] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, M.J. Ratuszek, *Światłowody przystosowane do WDM i ich rozwój*, KST'2000 – Bydgoszcz, Tom C, ss. 293-302, 2000.
- [68] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Hejna, *Mikroanaliza spawów jednomodowych światłowodów różnych typów*, KST'2000 – Bydgoszcz, Tom C, ss. 272-280, 2000.
- [69] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, D. Tomczak, *Przygotowanie istniejącej światłowodowej sieci szkieletowej do dalekosiężnej transmisji WDM*, Konferencja Pionier 2001: Polski Internet Optyczny – Technologie, Usługi, Aplikacje. Materiały Konferencyjne, ss. 23-33, Poznań 2001.
- [70] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, M. Wronikowski, *Wpływ dyspersji polaryzacyjnej na właściwości transmisyjne światłowodów*, KST'2001 – Bydgoszcz, Tom C, ss. 424-433, 2001.
- [71] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, J. Kądziała, D. Tomczak, *Pomiary dyspersji chromatycznej tras światłowodowych*, KST'2001 – Bydgoszcz, Tom C, ss. 442-451, 2001.
- [72] M. Ratuszek, Z. Zakrzewski, J. Majewski, J. Zalewski, M.J. Ratuszek, *Metoda korekcji błędów pomiaru długości w reflektometrach optycznych*, Patent RP No. P 320702, 2001.
- [73] M. Ratuszek, *Analiza i pomiary parametrów transmisyjnych tras światłowodowych przygotowywanych do dalekosiężnej transmisji WDM*, VIII Konferencja – Światłowody i ich zastosowanie – Białowieża'02, Tom I, ss. 293-298, 2002.
- [74] M. Ratuszek, *Analiza pomiarów sieci światłowodowych dla poszerzonego zakresu fal pomiarowych 1310, 1410, 1450, 1550, 1625 nm*, KST'2002 – Bydgoszcz, Tom B, ss. 402-410, 2002.
- [75] M. Ratuszek, *Ocena tłumienia spawów światłowodów jednomodowych różnych typów na podstawie jednokierunkowych pomiarów reflektometrycznych*, KST'2003 – Bydgoszcz, Tom C, ss. 98-104, 2003.

- [76] J. Hejna, M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, *Scanning electron microscope examination of telecommunication single mode fiber splices*, Optica Applicata, Vol. XXXIII, No. 4, ss. 583-589, 2003.
- [77] M. Ratuszek, *Charakteryzacja parametrów istniejących w Polsce sieci światłowodowych optymalizowanych dla systemów DWDM*, KST'2004 – Bydgoszcz Tom B, ss. 240-247, 2004.
- [78] M. Ratuszek, *Reflectometric measurements of splices of telecommunication single mode fibers with significantly different parameters*, Proceedings of SPIE Lightwaves and Their Applications II, Vol. 5576, ss. 474-479, 2004.
- [79] M. Ratuszek, *Gaussian approximation of splice loss of telecommunication fibers with different parameters*, Proceedings of SPIE Photonics Applications in Industry and Research IV, Vol. 5948, Part II 594826-1, 2005.
- [80] M. Ratuszek, M.J. Ratuszek, *Straty w termicznie łączonych światłowodach telekomunikacyjnych*, KST'2005 – Bydgoszcz, Tom B, ss. 395-402, 2005.
- [81] M. Ratuszek, *Analysis of reflectometric measurements losses of spliced single mode telecommunication fibers with significantly different parameters*, Optica Applicata, Vol. XXXV, No. 2, ss. 347-363, 2005.
- [82] M. Ratuszek, *Zgłoszenie patentowe: Sposób termicznego łączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych*, 2005.
- [83] M. Ratuszek, M.J. Ratuszek, *Thumienie termicznie rozdyfundowanych obszarów rdzenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych*, KSTiT 2006 – Bydgoszcz, Przegląd Telekomunikacyjny, z. 8-9, 2006.
- [84] M. Ratuszek, J. Majewski, Z. Zakrzewski, M.J. Ratuszek, *Analysis of single-modality of thermally diffused areas of telecommunication optical fiber core*, Proceedings of SPIE Lightguides and Their Applications III, Vol. 6608, ss. 660819-1-5, 2007.
- [85] M. Ratuszek, *Analysis of loss of single mode telecommunication fiber thermally diffused core areas*, Proceedings of SPIE Lightguides and Their Applications III, Vol. 6608, ss. 660817-1-6, 2007.
- [86] M. Ratuszek, *Thermal splicing of large effective area telecommunication fibers*, Proceedings of SPIE Lightguides and Their Applications III, Vol. 6608, ss. 660818-1-6, 2007.
- [87] M. Ratuszek, *Analysis of loss of single mode telecommunication fiber thermally diffused core area*, Optica Applicata, Vol. XXXVII, No. 3, ss. 279-294, 2007.
- [88] P.J. Bennet, T.M. Munro, D.J. Richardson, *Toward practical holey fiber technology: Fabrication, splicing, modeling, and characterization*, Optics Letters, Vol. 24, No. 17, ss. 1203-1205, 1999.
- [89] J.T. Lizier, G.E. Town, *Splice Losses in Holey Optical Fibers*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 8, ss. 794-796, 2001.
- [90] R.K. Sinha, S.K. Varshney, *Estimation of splice loss in photonic crystal fibers*, Proceedings of SPIE, Vol. 4655, ss. 296-302, 2002.

- [91] B. Bourliaguet et al., *Microstructured fiber splicing*, Optics Express, Vol. 11, No. 25, ss. 3412-3417, 2003.
- [92] D. Nishioka, T. Hasegawa, T. Saito, T. Hosoya, *A holey fiber with SMF-compatible MFD and ultra-low bending loss for dense optical wiring applications*, Proceedings NFOEC, ss. 398-403, 2003
- [93] K. Nakajima, K. Hogari, J. Zhou, K. Tajima, I. Sankawa, *Holeassisted fiber design for small bending and splice losses*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 12, ss. 1737-1739, 2003.
- [94] F. Couny, F. Benabid, P.S. Light, *Reduction of Fresnel Back-Reflection at Splice Interface Between Hollow Core PCF and Single-Mode Fiber*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, No. 13, ss. 1020-1022, 2007.
- [95] H.Y. Tam, *Simple fusion splicing technique for reducing splicing loss between standard singlemode fibers and erbium-doped fiber*, Electronic Letters, Vol. 27, No. 17, ss. 1597-1599, 1991.
- [96] W. Zheng, *The Real Time Control Technique for Erbium Doped Fiber Splicing*, Ericsson Review, ss. 1-24, 1993.
- [97] E. Desurvire, *Erbium-Doped Amplifiers: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, New York 1994.
- [98] W. Zheng, O. Hulten, R. Rylander, *Erbium-doped fiber splicing and splice loss estimation*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, ss. 430-435, 1994.
- [99] S. Pradhan, A. Mazloom, J. Arbulich, K. Shrihari, *Minimization of Splice Loss Between a Single Mode Fiber and an Erbium Mode Fiber*, IEEE Electronic Components and Technology Conference, ss. 1729-1732, 2002.
- [100] T. Veng, B. Palsdottir, *Investigation and optimization of fusion splicing abilities between erbium-doped optical fibres and standard singlemode fibres*, Electronics Letters, Vol. 41, No. 1, s.10, 2005.
- [101] B.M.A. Rahman, J.B. Davies, *Penalty function improvement of waveguide solution by finite elements*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 32, ss. 922-928, 1984.
- [102] S. Storm, W. Zheng, *Null field computations of radar cross sections of composite objects*, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, ss. 761-769, 1989.
- [103] A.W. Snyder, J.D. Love, *Optical waveguide theory* (tłum. na ros.), Izd. Radio i Swiaż, Moskwa, 1987.
- [104] R.S. Anderssen, F. de Hoog, R.A. Sammut, *Modes of Gaussian profile optical fibres*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 13, ss. 217-224, 1981.
- [105] K. Shigihara, K. Shiraishi, S. Kawakami, *Modal field transforming fiber between dissimilar waveguides*, Journal of Applied Physics, Vol. 60, s. 4293, 1986.
- [106] K. Shiraishi, Y. Aizawa, S. Kawakami, *Beam expanding fiber using thermal diffusion of the dopant*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, ss. 1151-1161, 1990.

- [107] K. Shiraishi, T. Yanagi, S. Kawakami, *Light-propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, ss. 1584-1591, 1993.
- [108] K. Shiraishi, *New scheme of coupling from laser diodes to single-mode fibers: a beam expanding fiber with a hemi-spherical end*, Applied Optics, Vol. 29, s. 3469, 1990.
- [109] K. Kato, I. Nishi, K. Yoshino, H. Hanafusa, *Optical coupling characteristics of laser diodes to thermally diffused expanded core fiber coupling using an aspheric lens*, Photonics Technology Letters, Vol. 3, s. 469, 1991.
- [110] S.K. Mondal, S. Sarkar, *Coupling of a laser diode to single-mode fiber with an upside-down tapered lens end*, Applied Optics, Vol. 38, no. 30, ss. 6272-6277, 1999.
- [111] K. Shiraishi, T. Yanagi, Y. Aizawa, S. Kawakami, *Fiber-embedded in-line isolator*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, s. 430, 1991.
- [112] K. Shiraishi, T. Chuzenji, S. Kawakami, *Polarization-independent in-line optical isolator with lens-free configuration*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, s. 1839, 1992.
- [113] T. Chuzenji, K. Shiraishi, S. Kawakami, *Lens-free direct integration of optical isolators into a fiber array*, in Tech. Dig., Conf. on Opt. Fib. Commun./ International Conf. on Integrated Opt. and Opt. Fib. Commun. (San Jose), paper FB3, 1993.
- [114] J. Stone, L.W. Stulz, C.A. Burrus, J.C. Centanni, *Etalon filters: Etalon on beveled facet of a fiber with an out-diffused core*, Photonics Technology Letters, Vol. 3, s. 216, 1991.
- [115] P. Chanclou, H. Ramanitra, P. Gravey, M. Thual, *Design and performance of expanded mode fiber using microoptics*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, ss. 836-842, 2002.
- [116] Y. Ohtera, O. Hanaizumi, S. Kawakami, *Numerical analysis of eigenmodes and splice losses of thermally diffused expanded core fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, ss. 2675-2682, 1999.
- [117] S.A. Jacobs, *Statistical estimation of PMD coefficients for system design*, Electronic Letters, Vol. 33, No. 7, s. 619, 1997.
- [118] User's Manual, *Fusion Splicer FSU 925 RTC*, Ericsson, 1992.
- [119] User's Manual, *Fusion Splicer FSU 975 RTC*, Ericsson, 1997.
- [120] M. Marciniak, *Modelowanie światłowodów optycznych metodą propagacji wiązki*, WKŁ, Warszawa 1995.
- [121] W.T. Anderson, *Consistency of measurement methods for the mode field radius in a single-mode fiber*, Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 2, ss. 191-197, 1984.
- [122] D. Marcuse, *Gaussian approximation of the fundamental modes of grade index fiber*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 68, ss. 103-109, 1978.

- [123] N. Tomoyuki, O. Taichi, K. Kengo, N. Masashi, T. Kotaro, *Fiber for next-generation extra-large-capacity DWDM transmission*, Hitachi Cable Review, No. 20, ss. 3-6, 2001.
- [124] T. Haibara, T. Nakashma, M. Matsumoto, H. Hanafusa, *Connection loss reduction by thermally-diffused expanded core fiber*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, ss. 348-350, 1991.
- [125] Y. Ando, H. Hanafusa, *Low-Loss Optical Connector Between Dissimilar Single-Mode Fibers Using Local Core Expansion Technique by Thermal Diffusion*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, No. 9, ss. 1028-1031, 1992.
- [126] M. Kihara, M. Matsumoto, T. Haibara, S. Tomita, *Characteristics of Thermally Expanded Core Fiber*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, ss. 2209-2214, 1996.
- [127] A.D. Kurtz, R. Yee, *Diffusion of boron in silicon*, Journal of Applied Physics, Vol. 31, s. 303, 1960.
- [128] S. Prussian, *Generation and distribution of dislocations by solute diffusion*, Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 10, s. 1876, 1961.
- [129] W. Jost, *Diffusion in solids, liquids, gases*, Academic Press, New York 1960.
- [130] Praca zbiorowa pod red. J. Adamczewskiej, *Procesy technologiczne w elektronice półprzewodnikowej*, WNT, Warszawa 1980.
- [131] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford 1975.
- [132] H. Yamada, H. Hanafusa, *Mode Shape Convertor Produced by the Thermal Diffusion of Different Dopants*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 4, ss. 531-533, 1994.
- [133] D. Marcuse, *Microdeformation losses of single mode fibers*, Applied Optics, Vol. 23, No. 7, 1984.
- [134] J. Streckert, F. Wilczewski, *Relationship between nonlinear effective core area and backscattering capture fraction for singlemode optical fibers*, Electronic Letters, Vol. 32, No. 8, ss. 760-761, 1996.
- [135] K. Himeno, S. Kumayasu, K. Aikawa, A. Wada, R. Yamauchi, *Splice loss of large effective area fiber and its reduction by mode field conversion*, ECOC'97, ss. 131-134, 1997.
- [136] Materiały firmy Siecor: *Fiber Focus-Communication on Glas – 2/2 Production of High-Quality Optical Fibers*, 1999.
- [137] D. Marcuse, *Curvature Loss Formula for Optical Fibers*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, ss. 216-220, 1976.
- [138] J. Wójcik, G. Sudolski, P. Ciupak, R. Skomorucha, *Parametry światłowodów jednomodowych dla telekomunikacji*, V Konferencja – Światłowody i ich zastosowanie – Białowieża'98, Tom I, ss. 295-300, 1998.
- [139] K. Petermann, *Constraints for fundamental-mode spot size for broad-band dispersion-compensated single-mode fibers*, Electronic Letters, Vol. 19, No. 18, ss. 712-714, 1983.

- [140] C.J. Bouwkamp, *Diffraction theory*, Reports on Progress in Physics, Vol. 17, s. 35, 1954.
- [141] R.S. Romaniuk, *Miernictwo światłowodowe*, XVI Krajowa Szkoła Optoelektroniki KSO'2001, Zakopane 2001.
- [142] J.K. Barnovski, S.M. Jensen, *Fiber waveguides: a novel technique for investigation attenuation characteristics*, Applied Optics, Vol. 15, ss. 2112-2115, 1976.
- [143] M. Marciniak, *Łączność światłowodowa*, WKiŁ, Warszawa 1998.
- [144] M. Nakazawa, *Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 73, ss. 1175-1180, 1983.
- [145] C.M. Miller, S.C. Metter, I.A. White, *Optical Fiber Splices and Connectors*, Marcel Dekker Inc., New York and Basel 1986.
- [146] Karty katalogowe światłowodów firmy Corning, 2001.
- [147] G. Kaiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, New York 2001.
- [148] M. Szustakowski, *Światłowody jednomodowe*, VI Krajowa Szkoła Optoelektroniki – Waplewo, z. 2, 1992.
- [149] K. Petermann, *Microbending loss in monomode fibers*, Electronic Letters, Vol. 12, ss. 107-108, 1976.
- [150] A. Majewski, R. Kuhne, K. Petermann, *Limits for microbending loss in multiple clad fibers*, IOOC-ECOC'85, Wenecja 1985.
- [151] Norma TP S.A.:ZN – 96/TP S.A. – 002/T.
- [152] J. Petykiewicz, B. Pura, A. Tadeusiak, *Badanie strukturalne spoin światłowodowych*, V Konf.: Światłowody i ich zastosowania – książka abstraktów – Kraśnobród 1996.
- [153] T-A. Wei, B.T. Devlin, *Analysis of optical fiber splices by the nondestructive x-ray imaging technique*, Proceedings of SPIE, Vol. 1791, ss. 25-30, 1993.
- [154] J. Siuzdak, *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKiŁ, Warszawa 1997.
- [155] A. Barbieri, *A guide to select single - mode fibers for optical applications*, Cisco Systems, 2001.
- [156] Materiały firmy Siecor: *Fiber Focus-Communication on Glas – 3/15 Nonlinear Effects in Optical Fibers*, 1999.
- [157] Materiały firmy Lucent Technologies, *Dispersion Compensation Modules*, 2000.
- [158] Denis Derickson Editor, *Fiber Optic Test and Measurement*, Hewlett – Packard, 1998.
- [159] Materiały firmy Anritsu, *Reflektometr MW9076D/D₁*, 2000.
- [160] Zalecenie ITU-T G.692, *Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers*, 1998.

- [161] Materiały firmy Siecior: *Fiber Focus-Communication on Glas – 3/10 Thermal Characteristics of the Propagation Delay, Group Index, and Chromatic Dispersion*, 1999.
- [162] N. Shibata et al., *Thermal characteristics of optical pulse transit time delay and fiber strain in a single-mode optical fiber cable*, Applied Optics, Vol. 22, s. 979, 1983.
- [163] S.A. Torbus, *Pomiary transmisyjne w sieciach optotelekomunikacyjnych*, praca pod kierunkiem M. Ratuszka, UTP WTiE, Bydgoszcz 2006.
- [164] G.J. Foschini, R.E. Wagner, *Phenomenological approach to polarization dispersion in long singlemode fibers*, Electronic Letters, Vol. 22, 1029-1030, 1986.
- [165] N. Gisin, J.P. von der Weid, J.-P. Pellaux, *Polarization mode dispersion of short and long single-mode fibers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 9, ss. 821-827, 1991.
- [166] G.J. Foschini, C.D. Pole, *Statistical theory of polarization dispersion in singlemode fibers*, Journal of Lightwave Technology, LT-9, 1439-1456, 1991.
- [167] Materiały firmy Siecior: *Fiber Focus-Communication on Glas – 3/18 Statistical Model of PMD. Considerations for System Design*, 1999.
- [168] Basic Note: *PMD and Polarisation*, Optische System, BN 9000, January 1999.
- [169] Zalecenie ITU-T G.656, *Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport*, 2004.
- [170] www.hitachi-cable.co.jp/
- [171] www.ofsoptics.com
- [172] S. Cąkała, Z. Drabik, Z. Koper, T. Luboń, *Pomiary dyspersji polaryzacyjnej w już istniejących liniach optotelekomunikacyjnych*, Konferencja Kabel'2001, Zakopane 2001.
- [173] D. Breuer, H.-J. Tessmann, A. Gladisch, *Measurements of PMD in the installed fiber plant of Deutsche Telekom*, Holey Fibers and Photonic Crystals/Polarization Mode Dispersion/Photonics Time/Frequency Measurement and Control, Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2003.
- [174] D. Gallagher, *Simulation of system length limitations induced by PMD*, 45th Internationale Wire&Cable Symposium Proceedings, s. 27, 1996.
- [175] S.A. Jacobs, *Statistical estimation of PMD coefficients for fiber paths*, National Fiber Optic Engineers Conference, 1997.
- [176] S.A. Jacobs, *Statistical estimation of PMD coefficients for system design*, Electronic Letters, Vol. 33, No. 7, s. 619, 1997.
- [177] FKO S.A. – Siecior GmbH, *Dyspersja polaryzacyjna (PMD) włókien światłowodowych*, V Seminarium światłowodowe, Ożarów 1998.
- [178] TIA/EIA FOTP-124 Standard, *Polarization mode dispersion measurement for single mode optical fibers by the interferometric method*, Telecommunications Industry Association, 1996.

- [179] B.L. Heffner, *Analysis of interferometric PMD measurements*, Technical Digest –Optical Fibre Measurement Conference, Liege, Belgium, 1995.
- [180] N. Gisin, B. Gisin, J.P. van der Weid, R. Passy, *How accurately can one measure a statistical quantity like polarization-mode dispersion*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 12, 1996.
- [181] M. Ratuszek, M.J. Ratuszek, Z. Górny, A. Rzepecki, *Dyspersja polaryzacyjna w termicznie łączonych światłowodach telekomunikacyjnych*, KSTiT 2007 – Bydgoszcz, Przegląd Telekomunikacyjny, z. 8-9, ss. 683-691, 2007.

TERMICZNE POŁĄCZENIA JEDNOMODOWYCH ŚWIATŁOWODÓW TELEKOMUNIKACYJNYCH

Streszczenie

Rozprawa poświęcona jest teoretycznym i praktycznym aspektom termicznego łączenia w łuku elektrycznym jednomodowych światłowodów włóknistych o słabym przewodzeniu i przekroju kołowym tj. światłowodów telekomunikacyjnych. W rozprawie przedstawiono teoretyczne podstawy teorii propagacji w jednomodowych włóknach telekomunikacyjnych i strat mocy optycznej przy ich łączeniu. Zaprezentowano koncepcję termicznego łączenia włókien różnych typów poprzez wytworzenie dyfuzyjnego obszaru przejściowego pomiędzy spajanymi włóknami. W obszarze tym następuje dyfuzja domieszki rdzeniowej i dopasowanie promieni pól modowych termicznie łączonych włókien, a tym samym zmniejszenie strat propagującej przez spoinę mocy optycznej. Pokazano, że w konsekwencji założenia gaussowskiego rozkładu koncentracji domieszki w obszarze przejściowym współczynniki transmisji pomiędzy spajanymi światłowodami mogą być liczone w sposób klasyczny (nienumeryczne) z zastosowaniem teorii pola. Teoretyczna i eksperymentalna minimalizacja strat transmisyjnych w obszarze przejściowym była podstawą problemu naukowego jaki rozwiązano w pracy uzyskując efektywną optymalizację termicznych połączeń jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych istotnie różniących się parametrami. Uzyskano to dzięki rozwiązaniu problemu obliczania współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej w plastycznym szkłe krzemionkowym w temperaturach spajania – 1900÷2000°C. Pozwoliło to na wykonanie obliczeń dyfuzyjnych rozkładów domieszki rdzeniowej (współczynnika załamania) i stwierdzenie poprawności ich gaussowskiej aproksymacji – w konsekwencji określenie parametrów (m.in. wymiarów) obszaru przejściowego. Znajomość wartości współczynników dyfuzji domieszki rdzeniowej umożliwiła teoretyczną optymalizację parametrów dyfuzyjnego obszaru przejściowego tak, aby spoiny wykazywały najmniejsze tłumienie oraz przełożenie wyników teoretycznych obliczeń na parametry zgrzewania tj. czas, temperaturę (prąd łuku) i długość obszaru grzania.

Zaprezentowano rozszerzoną analizę jedno i dwukierunkowych pomiarów reflektometrycznych spoin pozwalającą określić typy łączonych włókien oraz stopień procesu optymalizacji termicznego łączenia tj. dopasowania promieni pól modowych i minimalizacji strat związanych z wymiarami dyfuzyjnego obszaru przejściowego. W tym kontekście przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych potwierdzające, że obszar przejściowy (spoinę) można praktycznie wykonać tak, aby wykazywał minimalne, dążące do zera tłumienie i zerową reflektancję niezależnie od typów łączonych włókien telekomunikacyjnych.

Przedstawione w rozprawie obserwacje mikroskopowe, rentgenowska mikroanaliza składu i badania wytrzymałości mechanicznej na zrywanie wykonanych spoin dowiodły, że przy odpowiedniej optymalizacji łączenia włókien (w tym w ekstremalnych warunkach klimatycznych) dyfuzyjny obszar przejściowy wykazuje ciągłość strukturalną i wymaganą wytrzymałość mechaniczną.

Pracę kończy analiza wpływu spoin na dyspersję chromatyczną i polaryzacyjną w rzeczywistych liniach optotelekomunikacyjnych.

THERMAL CONNECTIONS OF SINGLE MODE TELECOMMUNICATION FIBERS

Summary

This dissertation is devoted to theoretical and practical aspects of thermal connections in electric arc of single mode cylindrical fibers with weakly guiding and circular cross-section i.e. telecommunication fibers. Theoretical fundamentals theory of propagation in single mode telecommunication fibers and optical power losses when connecting were presented in the dissertation. The concept of thermal connection of different types of fibers through forming thermally-diffused transit area between connected fibers is presented. The diffusion of core dopant and matching mode fields radius of thermally connected fibers occurs in this area, thereby decreasing propagating through joint optical power loss, is observed. It has been shown that as a consequence of assuming Gaussian dopant concentration distribution in transit area, transmission coefficients between connected fibers can be calculated in classical way (non numerical) with application of the field theory. Theoretical and experimental minimization of transmission losses in transit area is the basis of the scientific problem which has been solved in this paper, obtaining effective optimization of thermally connected single mode telecommunication fibers with considerably different parameters. This has been obtained thanks to solving the problem of calculating core dopant diffusion coefficients in plastic, SiO₂ glass, in splicing temperature 1900÷2000°C. This allowed to make calculations of diffusion core dopant distribution (refractive index) and to state the correctness of their Gaussian approximation – in consequence to determine the parameters (including dimensions) of the transit area. The knowledge of the core dopant diffusion coefficient values allowed theoretical optimization of thermally – diffused transit area parameters so that joints show the lowest loss, and also allowed transmission of theoretical results of calculation to fusion parameters i.e. time, temperature (current arc) and length of the fusion area.

The expanded analysis of one-way and two-way reflectometric measurements of joints allowing to determine the types of connected fibers and the degree of thermal connection optimization process i.e. matching mode fields radius and minimization of losses connected with dimensions of thermally – diffused transit area is presented. In this context the results or experimental tests confirming that the transit area (joint) can be practically performed so that it shows minimal, aiming at zero, loss and zero reflectance, independently of types of connected telecommunication fibers.

Microscopic observations presented in the dissertation as well as the X-ray microanalysis and examination of mechanical strength of performed fiber splices proves that when there is appropriate optimization of fiber connections (including extreme climate conditions), thermally-diffused transit area shows structural continuity and required mechanical strength.

The dissertation is concluded with the analysis of influence of joints on chromatic and polarization dispersion in real optotelecommunication lines.