Ryszard S. Romaniuk

Instytut Systemów Elektronicznych Politechnika Warszawska

MIERNICTWO ŚWIATŁOWODOWE

Wydanie II uzupełnione



Warszawa X 2001

SPIS TREŚCI

WSTĘP
1. MIERNICTWO FOTONICZNE
 1.1. Metody pomiarowe i mierzone parametry w fotonice 1.1.1. Pomiary długości fali 1.1.2. Pomiary czasu i częstotliwości w fotonice 1.1.3. Refraktometria i pomiary współczynnika załamania 1.1.4. Fotometria i spektrofotometria 1.1.5. Interferometria 1.1.6. Polarymetria i pomiary polaryzacji fali 1.1.7. Miernictwo światłowodowe
2. POMIARY TECHNOLOGICZNE ŚWIATŁOWODÓW
 2.1. Pomiary materiałów i szkieł wysoko-krzemionkowych 2.1.1. Tworzywa sztuczne w technice światłowodowej 2.1.2. Pomiary strat transmisyjnych 2.1.3. Pomiary strat absorpcyjnych 2.1.3.1. Pomiary absorpcji fononowej i wielofononowej 2.1.3.2. Pomiary strat absorpcyjnych w zakresie ultrafioletu 2.1.3.3. Pomiary absorpcji związanej z zanieczyszczeniami szkła 2.1.4. Pomiary strat rozproszeniowych 2.1.5. Całkowite straty światłowodów ze szkieł kwarcowych 2.1.6. Pomiary współczynnika załamania 2.1.7. Pomiary i obliczenia dyspersji współczynnika załamania 2.1.8. Pomiary dyspersji materiałowej
 2.2. Pomiary preform światłowodowych i światłowodów

Oznaczenia, symbole, skróty i podstawowe zależności w technice światłowodowej

4. POMIARY TŁUMIENIA SPEKTRALNEGO ŚWIATŁOWODÓW 62
4.1. Pomiary tłumienia światłowodu metodą transmisyjną 4.2. Pomiary światłowodu metodą rozproszenia wstecznego 4.3. Pomiary i obliczenia strat zgięciowych i mikrozgięciowych światłowodu
5. POMIARY DYSPERSJI CHROMATYCZNEJ I PASMA TRANSMISJI 75
 5.1. Znormalizowana transmitancja światłowodu 5.2. Pomiary w dziedzinie częstotliwości 5.3. Pomiary w dziedzinie czasu 5.4. Pomiary pasme światłowodu w funkcii fluktuocji profilu współazympika zelemenia
5.5. Pomiary stopy błędów transmisji w systemie światłowodowym
6. POMIARY MODOWEJ DYSPERSJI POLARYZACYJNEJ
7. POMIARY DŁUGOŚCI FALI ODCIĘCIA
8. POMIARY ŚREDNICY POLA MODOWEGO
8.1. Metoda rozsunięcia poprzecznego światłowodów
9. POMIARY ROZKŁADU POLA BLISKIEGO
9.1. Metoda pola bliskiego transmitowanego 9.2. Metoda pola bliskiego załamanego
10. POMIARY ROZKŁADU POLA DALEKIEGO
10.1. Bezpośrednia metoda pola dalekiego 10.2. Metoda pola dalekiego ze zmienną aperturą
11. POMIARY PROFILU REFRAKCYJNEGO
11.1. Metody mikro-interferometrii poprzecznej i podłużnej 11.2. Pomiary fluktuacji współczynnika załamania w światłowodzie 11.3. Wizualizacja i pomiary profilu metodą trawienia selektywnego
12. POMIARY WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH
13. POMIARY WYTRZYMAŁOŚCI MECHANICZNEJ
14. POMIARY ODPORNOŚCI RADIACYJNEJ

15. POMIARY WŁAŚCIWOŚCI NIELINIOWYCH ŚWIATŁOWODU 133
 15.1. Pomiary nieliniowego współczynnika załamania światła w światłowodzie 15.2. Pomiary powierzchni efektywnej pola modowego w światłowodzie 15.3. Rozpraszanie stymulowane fali optycznej w światłowodzie 15.3.1. Pomiary stymulowanego rozpraszania Brillouina w światłowodzie 15.3.2. Pomiary stymulowanego rozpraszania Ramana w światłowodzie 15.4. Mieszanie czterofalowe w światłowodzie
16. POMIARY ŚWIATŁOWODÓW AKTYWNYCH
I ŚWIATŁOWODY AKTYWNE W SYSTEMACH POMIAROWYCH 161
17. POMIARY I PROJEKTOWANIE ŚWIATŁOWODÓW WIELORDZENIOWYCH 168
18. SPECYFIKA POMIARÓW ŚWIATŁOWODÓW KSZTAŁTOWANYCH 178
18.1. Pomiary światłowodów nisko-wymiarowych 18.2. Pomiary światłowodów dwójłomnych 18.3. Pomiary światłowodów eliptycznych
19. POMIARY KABLI ŚWIATŁOWODOWYCH
20. POMIARY SYSTEMU ŚWIATŁOWODOWEGO
20.1. Pomiary biernych i aktywnych elementów światłowodowych 20.2. Pomiary źródeł światła 20.3. Pomiary fotodiod 20.4. Pomiary modulatorów światła 20.5. Pomiary systemu transmisyjnego 20.6. Inne pomiary fotoniczne
21. SPRZĘT POMIAROWY
22. KOMUTERYZACJA SYSTEMÓW I BAZ DANYCH POMIAROWYCH 202
23. PRZYKŁADY OBLICZEŃ, ĆWICZENIA, PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI . 220
24. PODSUMOWANIE
BIBLIOGRAFIA
SKOROWIDZ

Oznaczenia, symbole, skróty i podstawowe zależności w technice światłowodowej

 α - liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej [10⁻⁷K⁻¹];

 α - tłumienność światłowodu, α =10log(P_{wy}/P_{we})= $\alpha_j L$ [dB];

 α - (także g) eksponent potęgowego profilu refrakcyjnego – (profil refrakcyjny alfa, α =1 profil trójkątny, α =2 profil paraboliczny, $\alpha \rightarrow \infty$ profil refrakcyjny skokowy);

 α - kąt padania promienia światła,

 α_o – kąt padania połączony z kątem załamania prawem Snella sin α_o /sin β_o =v₁/v₂=n₂/n₁;

α_p – współczynnik tłumienia polaryzacyjnego [dB/km]

 β – stała propagacji, β =2 π / λ _g=2 π f/v= ω /v, β =2 π n₁cos Θ / λ _c;

 β – kąt załamania światła;

 $\beta_o - k$ ąt załamania światła dla kąta padania α_o ;

 β_n - (również b) znormalizowana stała propagacji, (1) $\beta_n = \beta/k$, (2) $\beta_n = [(\beta \lambda_c/2\pi) - n_2]/(n_1 - n_2);$

 γ - energia powierzchniowa [N/m];

 γ - zespolona stała propagacji $\gamma = \alpha + j\beta$, $E_x = Ee^{-\gamma z}e^{j\omega t}$, $\gamma = \pm [j\omega\mu\sigma - \omega^2 \epsilon\mu]^{1/2}$;

 Γ - zespolona stała propagacji;

δ - przyrost wartości następującej;

 Δ - znormalizowany różnicowy parametr refrakcyjny światłowodu - Δ =(n₁²-

 n_2^2)/ $2n_1^2 = NA^2/2n_1^2 \approx (n_1-n_2)/n_1$, typowa wartość dla gradientowego światłowodu wielomodowego $\Delta = 1\%$, typowa wartość dla klasycznego światłowodu jednomodowego $\Delta = 0,3\%$; Δ - przyrost wielkości następującej;

 $\Delta\lambda$ - szerokość spektralna w połowie wysokości (ang. fwhm);

 $\Delta \lambda_{frms}$ – spektralna szerokość średnikowadratowa;

 $\Delta n=n_1-n_2;$

 $\Delta \tau$ – poszerzenie impulsu propagowanego w światłowodzie, $\Delta \tau = \tau_{max} - \tau_{min}$;

 $\Delta \tau_{rms}$ – średniokwadratowa wartość poszerzenia impulsu w światłowodzie;

 ΔL – przyrost długości światłowodu wskutek oddziaływań termicznych lub mechanicznych,

 $\Delta L = \alpha \Delta TL = (\Delta T = 20^{\circ}C, \alpha = 5, 5 \ 10^{-7}K^{-1}, L = 1 \text{ km}) = 1,1 \text{ cm},$

 $\Delta L = \sigma L/E = (\Delta \sigma = 345 \text{N/mm}^2, \text{ d}_0 = 125 \mu\text{m}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 5\text{m}, \Delta L/L = 0,5\%, \text{ dla wytrzymałościowego testu uodporniającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ L} = 1 \text{km}) = 80\text{m}, \Delta L/L = 8\% \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowód; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowod; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowod; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowod; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowod; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowod; } \Delta L = (\Delta \sigma = 5,5 \text{GPa}, \text{ dla testu zrywającego światłowo$

 ΔT – zmiana temperatury;

 ϵ - przenikalność dielektryczna - $\epsilon_i = n_i^2$,

 ε - odkształcenie wzdłużne, wydłużenie - $\varepsilon = \Delta L/L = \sigma/E$ [%];

 $\varepsilon_0 = 1/36\pi \ 10^{-9} \ [F/m]$ - przenikalność elektryczna próżni;

 ϵ_o – wydłużenie nominalne światłowodu, np. podczas testu uodporniającego dla $\sigma_o=345 N/mm^2 \approx 50 Kpsi$, $\epsilon_o=0.5\%$;

 ε_k – skurczenie (termiczne) materiału;

 ζ – parametr;

η - lepkość szkła η=η(T),

 θ – współrzędna kątowa, kąt względem osi światłowodu;

 λ - długość fali światła,

 λ_c – długość fali odcięcia, $\lambda_c=2\pi a NA/V_c$, typowa wartość λ_c dla światłowodu jednomodowego $\lambda_c=(2a=10\mu m, NA=0,11)=1476 nm, \lambda_c=(2a=6\mu m, NA=0,11)=886 nm, \lambda_c=(2a=6\mu m, NA=0,11)=1476 nm, \lambda_c=(2a=6\mu m, \lambda_c=0,11)=1476 nm, \lambda_c=(2a=6\mu m,$

NA=0,15)=1208nm;

 λ_o – długość fali w próżni, długość fali zerowej dyspersji chromatycznej,

 λ_i – długość fali w ośrodku o współczynniku załamania n_i,

 λ_g – własna modowa wartość długości fali; efektywna modowa długość fali;

 λ_m – średnia długość fali źródła pobudzającego światłowód;

 Λ – droga dudnienia modów;

μ - przenikalność magnetyczna,

 μ - liczba Poissona - μ =($\Delta d/d$)/($\Delta L/L$)=E/2G-1, zmniejszenie średnicy światłowodu -

 $\Delta d/d=\mu\Delta L/L=(\mu=0,21, L=1km, \Delta L=0,5\%)=0,1\%$ dla testu uodporniającego światłowód, $\Delta d/d=1,7\%$ dla testu zrywającego światłowód;

 $\mu_0 = 4\pi \ 10^{-7} \ [\text{H/m}] - \text{przenikalność magnetyczna próżni, } \mu_0 \varepsilon_0 = c^{-2};$

 μ - radialna liczba modowa (także *r*, *l*) w oznaczeniu modów HE_{vµ} (także HE_{ml}), liczba maksimów pola wzdłuż promienia światłowodu;

v – azymutalna liczba modowa (także *a*, *m*), połowa maksimów pola dla współrzędnej kątowej w rdzeniu światłowodu i najbliższym otoczeniu rdzenia;

μm - mikrometr

- ξ parametr;
- π liczba pi;
- Π iloczyn;
- ρ gęstość materiału;
- ρ promień zgięcia światłowodu;

 σ - naprężenie wzdłużne światłowodu - σ =E ϵ (prawo Hooka);

- σ konduktancja i= σE ;
- σ_o naprężenie wzdłużne nominalne związane z wydłużeniem ϵ_o

 Σ – suma;

- τ opóźnienie grupowe impulsu w światłowodzie
- ϕ , ϕ kąt fazowy, fali, sygnału;
- ϕ kąt przesunięcia fazy fali w światłowodzie $\phi = \beta L = \beta_n L/k$;
- Φ kąt fazowy;
- χ parametr;
- ω częstotliwość kątowa (radialna), pulsacja, ω =2 π f;
- Θ kąt, współrzędna kątowa,
- Θ kąt propagacji promienia w światłowodzie;

 Θ_{max} – maksymalny kąt akceptacji światła przez światłowód, kąt aperturowy, sin Θ_{max} =NA, typowa wartość maksymalnego kąta akceptacji dla klasycznych światłowodów telekomunikacyjnych – wielomodowego gradientowego Θ_{max} =12°, jednomodowego Θ_{max} =6°;

Θ-kat skręcenia płaszczyzny polaryzacji fali w światłowodzie, np. rotacja Faradaya w

światłowodzie Θ=VBL, gdzie V-stała Verdeta, B-indukcja magnetyczna;

- Ψ funkcja falowa;
- Ω kąt bryłowy;

a – promień rdzenia światłowodu, a $\approx w_o V/2,6 = V_c \lambda_c w_o/2,6 \lambda$ - przybliżenie dla jednomodowego światłowodu skokowego, np. a=(w_o =5µm, λ_c =1255nm, V_c =2,405, λ_1 =1300nm,

 $\lambda_2 = 1550$ nm) $\approx 4.5 \mu$ m (dla λ_1) i 3.75 μ m (dla λ_2);

a - większa półoś elipsy rdzeniowej światłowodu;

a – stała rozkładu Weibulla wytrzymałości mechanicznej włókna, F(L, \sigma, t)=1-exp[-

 $(L/L_o)(\sigma/\sigma_o)^a(t/t_o)^b$];

- a –przesunięcie fali płaskiej;
- A amplituda;
- A pole przekroju poprzecznego rdzenia Ar lub światłowodu Aw (także Af),

 $A_f = (d = 125 \mu m) = 1,23 \ 10^{-4} cm^2;$

 $A_r = (2a = 10 \mu m) = 78,5 \mu m^2$, $A_f = (2a = 5 \mu m) \approx 20 \mu m^2 - swiatłowód wysokoaperturowy;$

APD - fotodioda lawinowa (ang. avalanche photodiode);

ASE – przestrajane szerokopasmowe źródło światła wykorzystujące wzmacniacz światłowodowy i pompę półprzewodnikową, (ang. amplified spontaneous emission);

b – znormalizowana stała propagacji (także β_n, B);

b – mniejsza półoś elipsy rdzeniowej światłowodu;

b - stała rozkładu Weibulla wytrzymałości mechanicznej włókna;

b₁ – iloczyn pasmo – długość światłowodu;

B – pasmo światłowodu;

B – znormalizowana stała propagacji;

 $B-dwójłomność znormalizowana, B{=}|\beta_x{-}\beta_y|/k{=}|n_x{-}n_y|,$

B1 – pasmo światłowodu o długości L1;

B_n - dwójłomność znormalizowana;

BFT – światłowód przewężony dwustożkowy (ang. Biconical fused taper) i elementy funkcjonalne wykorzystujące przewężenie światłowodowe;

c – (także c_o) prędkość światła w próżni;

c – niekoncentryczność układu rdzeń - płaszcz światłowodu;

C – stała,

 C_R - współczynnik rozpraszania Rayleigha, dla szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂: $C_R=0.51\Delta+0.76$;

CVD – osadzanie z fazy gazowej (ang. chemical vapour deposition), odmiany: MCVD, PACVD,

CW – fala ciągła, urządzenie z falą ciągłą (ang. continuous wave);

d – średnica, średnica rdzenia, średnica światłowodu (także D);

d - odległość międzyrdzeniowa w światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym lub dwurdzeniowym;

do – średnica rdzenia światłowodu cylindrycznego;

 $d_f - (także D_f) - zewnętrzna średnica światłowodu;$

d_{ij} – odległość międzyrdzeniowa w światłowodzie wielordzeniowym;

d_{min,} d_{max}, maksymalne i minimalne wartości średnicy rdzenia światłowodu (odchyłki statystyczne dla jednej próbki);

D – średnica zewnętrzna światłowodu;

Do - średnica płaszcza światłowodu cylindrycznego;

D_{min}, D_{max}, nominalne odchyłki średnicy zewnętrznej światłowodu lub pokrycia zewnętrznego światłowodu;

DBR – rozłożone zwierciadło Bragga, urządzenie z DBR, np. DBRL, DBRF, (ang. distributed Bragg reflector);

DC - technologia podwójnego tygla (ang. double crucible);

DEL – dioda elektroluminescencyjna (także LED, ang. light emitting diode);

DL - dioda laserowa, laser półprzewodnikowy (także LD, ang. laser diode);

DMD – różnicowe opóźnienie modów, metoda pomiarowa dyspersji światłowodu woelomodowego (ang. differential mode delay);

DWDM – gęsty system z podziałem długości fal (ang. dense WDM), długości fal określone przepisami międzynarodowymi ITU, tzw. siatka ITU (ang. ITU grid), odstępy międzykanałowe są 200GHz, 100GHz, 50GHZ, 25GHz;

e – mimośród elipsy rdzeniowej światłowodu;

e –liczba Eulera e;

E – energia, pole elektryczne,

E - notacja modów (także TE),

E - moduł Younga – $E=\sigma/\epsilon$;

E – niecentryczność płaszcza światłowodu;

Eg-przerwa energetyczna materiału;

E_i – moduł Younga materiału i-tego;

EDFA - światłowodowy wzmacniacz domieszkowany erbem (ang. erbium doped fiber amplifier);EH - (także EH_{vµ}) notacja modów hybrydowych (tzn. o polach E i H w kierunku propagacji) w światłowodzie, o większym poprzecznym polu elektrycznym; ERF – funkcja odpowiedzi jednostkowej obrazowodu światłowodowego, (ang. edge response function), rozkład przestrzenny natężenia obrazu dla ostrza idealnego;

Etalon – element funkcjonalny np. FBG lub FP wykonany bardzo dokładnie i używany jako wzorzec, np. filtr wzorcowy, itp.;

f – częstotliwość fali, f(λ =1µm)=300THz;

fm - częstotliwość modulacji;

 $F - siła rozciągająca światłowód - F=\sigma A [N];$

F – prawdopodobieństwo rozerwania światłowodu;

F - funkcja falowa; $F_p=F_p(w)$ - zanikająca funkcja falowa w płaszczu; $F_r=F_r(u)$ – periodyczna funkcja falowa w rdzeniu;

1F - jednostka pojemności 1 farad;

F_{max} – maksymalna siła rozciągająca światłowód;

FBG – światłowodowa siatka Bragga (ang. Fiber Bragg grating) i elementy funkcjonalne wykorzystujące siatkę;

FD – fotodioda, (także PD);

FP – rezonator (interferometr) Fabry'ego Perota, na ogół w rozwiązani objętościowym ale także cienkowarstwowym lub światłowodowym;

FWHM – szerokość połówkowa, impulsu, charakterystyki spektralnej, itp. (ang. full width at half maximum);

 $g - (także \alpha)$ eksponent potęgowego profilu refrakcyjnego światłowodu;

 $g_1(t)$, $g_2(t)$ – impulsy wejściowy i wyjściowy ze światłowodu jako funkcje czasu;

G – moduł sprężystości postaciowej (poprzecznej, na ścinanie) – G=E/2(1+ μ)

G – waga, G= σ AL.=(σ =2,2g/cm³, d₀=125 μ m, A=1,23 10⁻⁴ cm², L=1km)=27g;

GIPOF – światłowód plastykowy o gradientowym profilu refrakcyjnym, także SIPOF – o profilu skokowym (ang. gradient index, step index POF);

GRIN - światłowodowa soczewka gradientowa (ang. gradient index);

h – wysokość kolumny ciekłego szkła,

 $h-(także\ h_p)$ współczynnik przesłuchu polaryzacyjnego [dB/m], związany ze współczynnikiem α_p tłumienia polaryzacyjnego;

H – początkowa wysokość kolumny ciekłego szkła; H - pole magnetyczne;

H - 1 henry, jednostka indukcyjności elektrycznej;

H - notacja modów,

H(f_m) – funkcja przejścia częstotliwości modulacyjnej;

HF - światłowód dziurawy (ang. holey fiber),

H_M - twardość w dziesięciostopniowej skali Moosa,

 $HE - (także HE_{v\mu})$ notacja modów hybrydowych,

HE₁₁ - mod podstawowy światłowodu cylindrycznego,

 $I_N(r)$ – rozkład natężenia pola bliskiego światłowodu w funkcji promienia;

 $I_F(\Theta)$ – rozkład natężenia pola dalekiego światłowodu jako funkcja kąta względem osi włókna optycznego;

 J_m – funkcja Bessela (periodyczna) m-tego rzędu

k – liczba falowa w próżni, k (lub k_o)= 2π / λ_o , opisuje jednostkową zmianę fazy fali optycznej;

 k_i – liczba falowa w ośrodku o współczynniku załamania $n_i,\,k_i\!\!=\!\!2\pi/\lambda_i\!\!=\!\!k_on_i,$

k₁-liczba falowa w rdzeniu,

 k_2 -liczba falowa w płaszczu,

 \vec{k} - wektor falowy;

K – moduł ściśliwości – K=- σ V/ Δ V=E/3(1-2 μ)

1Kpsi=6,8948N/mm²;

 K_{K} – stała elektrooptyczna Kerra, K_{K} =(n_{nzw} - n_{zw})/ nE^{2} , gdzie n-współczynnik załamania bez pola, E-pole elektryczne w V/m;

K_m – funkcja Bessela (zanikająca) m-tego rzędu

 K_P – stała elektrooptyczna Pockelsa, K_P = $\Delta n/n^3 E$

l_b – (także LB) droga dudnienia;

L – długość;

 L_B – droga dudnienia, $L_B=\lambda/B$;

Lo - długość próbki światłowodu;

L₁ – długość światłowodu o paśmie B₁;

L_A - liczba Abbego

LCF - światłowód ciekłokrystaliczny - rdzeń lub płaszcz (ang. liquid crystal fiber);

 $LP - (także LP_{v\mu})$ notacja modów światłowodowych liniowo spolaryzowanych (ang. Linearly Polarized);

 LP_{01} – mod podstawowy w notacji LP w światłowodzie cylindrycznym słabo propagującym $\Delta n \approx 0$;

 LP_{11} – pierwszy mod wyższego rzędu w notacji LP składający się z grupy modów HE_{01} , EH_{01} , HE_{21} ;

LPG – rodzaj światłowodowych siatek braggowskich o długim okresie refrakcyjnym rozpraszające falę wprzód w odróżnieniu od FBG rozpraszających falę wstecz, (ang. long period grating);

LSF – funkcja rozszerzenia liniowego obrazowodu (ang. line spread function);

 $M(\lambda)$ – dyspersja chromatyczna, $M(\lambda)=M_0+M_w$;

 $M(\lambda_m)$ – dyspersja dla średniej długości fali źródła pobudzającego światłowód;

M_o – dyspersja materiałowa;

 $M_o(\lambda) - dy spersja materiałowa dla długości fali \lambda, M_o(\lambda) = dn_g/cd\lambda = dt_g/Ld\lambda [ps/nm km];$

 $M_w(\lambda) - (także M_1)$ dyspersja falowodowa;

 $M'(\lambda_o)$ – nachylenie funkcji dyspersji dla fali λ_o ;

MMC – modyfikowany proces wielotyglowy (ang. modified multicrucible)

MTF – modulacyjna funkcja przejścia dla obrazowodu światłowodowego (ang. modulation transfer function), transformata Fouriera funkcji rozszerzenia liniowego obrazowodu –LSF;

M-Z - interferometr Macha Zehndera, także w wykonaniu światłowodowym;

MZD – process wielotyglowo-strefowo-przesłonowy (ang. multicrucible-zone-diaphragm) n - współczynnik załamania (fazowy);

n_i – współczynnik załamania ośrodka i,

 $n_i = (\epsilon_i)^{1/2}$, n_1 -współczynnik załamania rdzenia, typowa wartość dla klasycznego jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego $n_1 = 1,46$;

n2-współczynnik załamania płaszcza,

n(r) - profil refrakcyjny światłowodu, n²(r)= $n_1^2[1-2\Delta(r/a)^{\alpha}]$ dla r<a i n²(r)= n_2^2 =const dla r>a - profil refrakcyjny potęgowy,

 n_g - grupowy współczynnik załamania, $n_g=1/v_{gn}=c/v_g=n-\lambda dn/d\lambda$;

 n_{nzw} – nadzwyczajna wartość współczynnika załamania w materiale dwójłomnym (także n_e), np. dla kwarcu n_{nzw} =1,55;

 n_x , n_y – efektywne modowe współczynniki załamania dla dwóch ortogonalnych stanów polaryzacji modu podstawowego;

 n_{zw} – zwyczajna wartość współczynnika załamania w materiale dwójłomnym (także n_o), np. dla kwarcu $n_o=1,54$;

N – liczba modów w światłowodzie, N≈ α V²/2(α +2) dla wielomodowego światłowodu o profilu refrakcyjnym α , N≈V²/2 dla światłowodu skokowego, N≈V²/4 dla światłowodu parabolicznego; N_c – współczynnik szumów;

NA – apertura numeryczna światłowodu, NA= $\sin\Theta_{max}=(n_1^2-n_2^2)^{1/2}=n_1(2\Delta)^{1/2}$, typowa apertura numeryczna klasycznego telekomunikacyjnego światłowodu jednomodowego NA= $(n_1=1,46, \Delta=0,03\%)=0,11, \Theta\approx6^\circ$; typowa wartość dla telekomunikacyjnego światłowodu gradientowego NA= $n_1(2\Delta)^{1/2}=\{n_1=1,46, \Delta=1\%\}\approx0,21, \Theta=12^\circ$;

OADM – rodzaj multipleksowania sygnału w światłowodzie w technice zwielokrotnienia WDM/DWDM polegający na dodawaniu i odejmowaniu po drodze światłowodu dodatkowych kanałów (ang. optical add drop multiplexing) na ogół z wykorzystaniem techniki FBG;

OTDR – reflektometria optyczna w dziedzinie czasu (ang. optical time domain reflectometry), odmiany: POTDR – polaryzacyjna, OFDR – w dziedzinie częstotliwości, OCDR – w dziedzinie koherencji;

OVD – zewnętrzne osadzanie z fazy gazowej (ang. outside vapour deposition);

p – ciśnienie;

 $P(\lambda)$ – dyspersja profilu refrakcyjnego światłowodu;

P – moc optyczna;

P(L) – moc optyczna w światłowodzie o długości L;

P(f_m) – moc optyczna jako funkcja częstotliwości modulacji;

Po – (także Pwe lub P1) moc optyczna pobudzająca światłowód na wejściu;

Pwy-(także P2) moc optyczna na wyjściu światłowodu;

Pa - 1 Paskal, $1Pa=1N/m^2$;

1P-1 Puaz=1g/(cm s)=1dPa s, jednostka lepkości;

PCF – światłowód z kryształu fotonicznego, materiału z fotoniczną przerwą zabronioną (ang. photonic crystal fiber);

PCS – światłowód kwarcowy w płaszczu polimerowym (ang. polymer clad silica);

PIN – fotodioda ze złączem P-I-N;

PD - fotodioda (ang. photodiode);

PDL – straty polaryzacyjne, zależne od stanu polaryzacji fali, (ang. polarization dependent loss); PMD – modowa dyspersja polaryzacyjna (ang. polarization mode dispersion), trzeci składnik polaryzacji w światłowodzie obok dyspersji materiałowej i falowodowej (chromatycznej), zależny od polaryzacji fali w światłowodzie jednomodowym, posiada składniki podstawowego i wyższych rzędów;

POF – światłowód plastykowy (ang. plastic optical fiber);

r – promień, współrzędna radialna;

 r_{co} – promień rdzenia światłowodu;

 $r_{cl}-promie \acute{n} płaszcza \ \acute{s}wiatłowodu;$

 $r_i - promie \acute{n} \ i\text{-tej} \ warstwy \ preformy \ \acute{s}wiatłowodowej;}$

r_n – promień apertury dyszy tyglowej;

R – promień wygięcia światłowodu;

Re-liczba Ryenoldsa,

RF - częstotliwość radiowa (ang. radio frequency);

 R_R – rozpraszanie Rayleigha w światłowodzie, $R_R=C_R\lambda^{-4}$ [dB/km],

RiT – proces pręt-rura (ang. Rod-in-Tube);

S – powierzchnia;

SFD – stacjonarny rozkład pola w światłowodzie wielomodowym (ang. stationary field distribution), warunek niezbędny do prawidłowej transmisji i pomiarów światłowodu wielomodowego, SFD uzyskuje się po silnym mieszaniu modów na początku światłowodu. Lub przez odpowiednie pobudzenie;

SMF – światłowód jednomodowy (ang. single mode fiber), skrót używany także do określania norm i specyfikacji światłowodów jednomodowych;

t – czas;

 t_g – grupowy czas przejścia (opóźnienia), t_g =L/v_g=Ln_g/c;

to – nominalny czas trwania testu (wytrzymałościowego światłowodu);

T- czas trwania impulsu;

T – okres przebiegu periodycznego;

T-temperatura,

- T_s temperatura mięknięcia szkła;
- T_g temperatura transformacji szkła;

TIR – całkowite wewnętrzne odbicie (ang.total internal reflection); mechanizm prowadzenia światła w światłowodzie;

u – argument funkcji falowej periodycznej (rdzeniowej), $u^2 = a^2(k_1^2 - \beta^2)$;

v – prędkość fali (fazowa) v= $f\lambda = \omega/\beta$,

 v_1 – prędkość płaskiej fali optycznej w nieograniczonym ośrodku rdzenia światłowodu, $v_1 = c/n_1$

= $(n_1=1,5)=200m/\mu s=1km/5\mu s=1m/5ns=1\mu m/5fs;$

v_{av} – prędkość średnia (ang. average velocity);

v_{max} – prędkość maksymalna;

 v_p - prędkość fazowa, $v_p(lub v)=\omega/\beta=c/n;$

 v_g - prędkość grupowa, $v_g = \partial \omega / \partial \beta = v - \lambda dv / d\lambda = v + \beta dv / d\beta = v / [1 - \omega dv / v d\omega], v_g = c/n_g$,

 $v_{gn}\!-$ prędkość grupowa znormalizowana, $v_{gn}\!\!=\!\!v_g\!/c$

V – stała Verdeta (skręcenie magnetyczne właściwe) [rad/m Gauss], V= Θ /BL=C λ dn/d λ (wzór Becquerela), gdzie Θ -kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji fali w światłowodzie, B –indukcja magnetyczna wzdłuż osi światłowodu, L-długość światłowodu, C=ec²/2m-stała;

V – częstotliwość znormalizowana, $V^2=u^2+w^2$, $V=ak(\epsilon_1-\epsilon_2)^{1/2}=2\pi aNA/\lambda=akNA$, V=ak dla światłowodu o aperturze numerycznej równej 1;

VAD - osiowe osadzanie z fazy gazowej (ang. vapour axial deposition),

 V_c – częstotliwość znormalizowana odcięcia, V_c =2,405 dla klasycznego światłowodu cylindrycznego (pierwszy pierwiastek funkcji Bessela J);

VCSEL – laser półprzewodnikowy z wnęką rezonansową prostopadłą do powierzchni materiału (ang. vertical cavity semiconductor laser);

w – argument funkcji falowej zanikającej (płaszczowej), w²=a²(β^2 -k₂²);

przybliżenie dla jednomodowego światłowodu skokowego dla 1,6<V<2,6 (1150< λ <1875);

W - wytrzymałość na rozerwanie [GPa];

1W – wat, jednostka mocy;

WDM – system wielokanałowej transmisji światłowodowej z podziałem długości fal (ang. wavelength division multiplexing);

x – dewiacja od środka rdzenia światłowodu;

z – współrzędna długości w kierunku z;

 z_o – ustalony punkt fali w kierunku z;

 Z_w – impedancja falowa [Ω], $Z_w = E_x/H_y = -j\omega\mu/\gamma = [j\omega\mu/(\sigma+j\omega\epsilon)]^{1/2}$, $Z_w = (\mu/\epsilon)^{1/2}$ dla $\sigma=0$;

 $Z_{wf}=Z_{wo}/n$ – impedancja falowa światłowodu;

 Z_{wo} – impedancja falowa próżni Z_{wo} =120 π [Ω];

ZBLAN – halogenkowe szkło cyrkonowe na światłowody IR; także nazwa światłowodów z tego szkła, poszczególne litery są skrótami od nazw pierwiastków wchodzących w skład szkła;

WSTĘP

Jakość światłowodu lub kabla światłowodowego w czasie wytwarzania oraz gotowego produktu jest oceniana na podstawie pomiarów i zgodności parametrów projektowanych z otrzymanymi. Wśród metod pomiarowych można wyróżnić między-operacyjne pomiary technologiczne oraz pomiary katalogowe a także badawcze pomiary laboratoryjne. Istnieje także cały szereg innych rodzajów pomiarów jak: eksploatacyjne - dokonywane w celu monitoringu zmian parametrów pracy systemu światłowodowego w czasie, gwarancyjne – ustalane przez producenta systemu, awaryjne – związane z zaistniałymi uszkodzeniami światłowodu i elementów optoelektronicznych, i inne. Niektóre z tych pomiarów używają tych samych metod, ale stosują adaptowany sprzęt i charakteryzują się odmiennymi warunkami pracy metrologicznej (np. w warunkach polowych i laboratoryjnych a także produkcyjnych czy eksploatacyjnych).

Ustalono w tym zakresie liczne standardy międzynarodowe dotyczące zakresów parametrów, rodzajów światłowodów oraz stosowanych metod pomiarowych. Obowiązujące nas przepisy tworzone są w problemowym Komitecie Technicznym telekomunikacji światłowodowej Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki – IEC. W kraju przepisy te są tłumaczone i opracowywane przez Komisje Problemowe dotyczące techniki światłowodowej Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (Zespół Informatyki i Telekomunikacji Biura PKN) i posiadają symbol EN. Właśnie obecnie prowadzone są w kraju bardzo szerokie prace adaptacyjne dotyczące całkowitego przejścia na normy EN, także w zakresie telekomunikacji światłowodowej i optoelektroniki. Autor niniejszego opracowania ma przyjemność uczestniczyć we fragmencie tych prac.

Parametry światłowodu podlegające pomiarom można zebrać w kilka ogólnych grup: geometryczne, optyczne, mechaniczne i fizyko-chemiczne. W ramach takich grup mówimy między innymi o charakterystykach refrakcyjnych, transmisyjnych tłumienia i dyspersji, odcięcia modowego, pola modowego, warunkach pracy jednomodowej, jednopolaryzacyjnej i wielomodowej, wytrzymałości mechanicznej, odporności na działanie nominalnego środowiska pracy i wielu innych. Do pomiaru tych charakterystyk stosowane są standaryzowane metody optyczne takie jak: pomiary mocy optycznej całkowitej i jej rozkładu przestrzennego, reflektometria optyczna, pomiary stanu polaryzacji fali - polarymetria, mikroskopia klasyczna i interferencyjna, refraktometria, spektroskopia, spektrofotometria, densytometria, pomiary nieliniowe przy wysokim poziomie mocy pobudzającej, i inne.

Obecnie wiele z tych metod współpracuje z systemem komputerowym automatyzującym akwizycję danych w postaci bazy i przeprowadzającym obróbkę danych, ocenę błędów pomiarowych i dokonujących prezentacji danych w wielu standardowych postaciach. Oprócz tego, coraz częściej, współpracujący system komputerowy pozwala na sterowanie systemem pomiarowym i precyzyjne ustawianie parametrów procesu poprzez standaryzowany graficzny interfejs użytkownika, za pośrednictwem przeglądarki www. Przykład takiego systemu, opracowanego przez zespół PERG w Instytucie Systemów Elektronicznych, jest przedstawiony na serwerach http://nms.ise.pw.edu.pl, http://pergx.ise.pw.edu.pl, gdzie x=1,2....

Celem niniejszej pracy jest dokonanie ogólnego przeglądu współczesnych zagadnień związanych z pomiarami światłowodów w trakcie produkcji oraz jako gotowego wyrobu technicznego w aspekcie ich zastosowania w systemach teletransmisyjnych. W odróżnieniu od obszaru telekomunikacji światłowodowej, często odrębne metody pomiarów i testowania są stosowane w odniesieniu do światłowodów przeznaczonych na czujniki i niektóre rodzaje fotonicznych elementów funkcjonalnych.

W kraju istnieje co najmniej kilka badawczych laboratoriów metrologicznych techniki światłowodowej zlokalizowanych bądź przy ośrodkach produkcyjnych, bądź przy zespołach badawczych fotoniki szkół wyższych. Istnieją także zespoły pomiarowe utrzymywane przez firmy telekomunikacyjne i operatorów, których celem są pomiary eksploatacyjne. Przy resortowym Instytucie Łączności działa laboratorium pomiarowe o uprawnieniach homologacyjnych w zakresie telekomunikacji światłowodowej. W Instytucie Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej działa laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego.

1. MIERNICTWO FOTONICZNE

Miernictwo fotoniczne jest stosunkowo nową nazwą, nadaną połączonym dziedzinom miernictwa optycznego, optoelektronicznego, w tym światłowodowego a także sporej ilości metod pomiarowych adaptowanych z elektroniki i mechaniki. Sama nazwa fotonika wyłoniła się przed około dwudziestu laty w wyniku rozwoju takich technik jak optoelektronika zintegrowana, optyka planarna, optoelektronika półprzewodnikowa i technika światłowodowa. Nazwa fotonika została np. użyta w tytule miesięcznika Photonics Spectra, a także w nazwach instytutów naukowych.

Miernictwo światłowodowe jest działem metrologii, który wyodrębnił się wraz z dynamicznym rozwojem techniki światłowodowej w okresie ostatnich 25 lat. Rozwój tej dziedziny następował w sposób naturalny poprzez adaptację znanych optycznych, optoelektronicznych, mechanicznych metod pomiarowych do specyfiki wniesionej do techniki przez szklany światłowód włóknisty. Następnie, niektóre z tych technik, wraz z upływem czasu, wytworzyły na tyle odrębną specyfikę podejścia teoretycznego, technologicznego, metrologicznego, aparaturowego, że miernictwu światłowodowemu, jako działowi miernictwa optoelektronicznego (czy też fotonicznego, jak mówi się coraz częściej) poświęca się odrębne konferencje naukowe, pisze się specjalistyczne podręczniki. Wydawało się, że po takim czasie rozwoju poznano dogłębnie światłowód jako medium transmisyjne i funkcjonalne, a więc opanowano także możliwe sposoby jego pomiaru.

Tak właśnie w dużej mierze jest, ale nie do końca. Ważnym problemem naukowym i technicznym w zakresie telekomunikacji światłowodowej jest w dalszym ciągu badanie absolutnej granicy pojemności transmisyjnej pojedynczego włókna światłowodowego. Wraz z tym kierunkiem badań podąża miernictwo światłowodowe. Wchodząc w obszar terahercowych częstotliwości modulacji, femtosekundowych czasów trwania impulsów i gigahercowych częstotliwości powtarzania impulsów femtosekundowych, upakowania setek a nawet tysiąca sąsiadujących kanałów w systemach modulacji polaryzacyjnej, koherentnej, gęstego podziału pasma falowego, nowych technik cyfrowych, wymaga poznania (a więc także zmierzenia) nie tylko podstawowych rodzajów charakterystyk światłowodu ale także zjawisk wyższego rzędu, poprzednio praktycznie pomijanych. Techniki pomiarowe efektów "wyższego rzędu" wymagają na ogół zastosowania innych metod, innej aparatury, bazują na dokładniejszych metodach analizy światłowodów i badania właściwości fali świetlnej.

Upakowanie coraz większej ilości informacji w pojedynczym światłowodzie wymaga obecnie, na ogół, sprzężenie do włókna większej mocy optycznej o stosunkowo szerokim widmie spektralnym. Prowadzi to nieuchronnie do zbliżenia się takiego układu do granicy stabilności ze względu na optyczne zjawiska nieliniowe. Powstaje cały szereg pytań naukowych i technicznych. Jak wykorzystać te zjawiska w rozszerzeniu możliwości transmisyjnych światłowodu? Czy obecnie stosowane techniki transmisyjne są adekwatne do przyszłościowych systemów terahercowych w sensie uwzględnienia całej palety zjawisk nieliniowych? Czy możliwe są jakieś metody samokompensacji, jak to było z dyspersją i jej spłaszczaniem i przesuwaniem między pasmami transmisyjnymi? Czy nie lepiej powielić włókno światłowodowe, niż upakowywać w nim gęsto kanały transmisyjne? Jakie, i czy w ogóle, są rozsądne granice popytu na pasmo transmisyjne?

Na współczesne miernictwo światłowodowe składa się dzisiaj wiele dyscyplin metrologicznych zaczerpniętych i twórczo adaptowanych z optyki klasycznej i współczesnej, optoelektroniki, elektroniki, mechaniki ciała stałego, chemii krzemianów. Specyfika systemów pomiarowych dla techniki światłowodowej, szczególnie jednomodowej jest silnie determinowana przez niewielkie wymiary rdzenia światłowodu, konieczność bardzo wysokiej precyzji justacji optycznej, konieczność wysokiej stabilności sygnałów optycznych, niekiedy bardzo niskie poziomy sygnałów optycznych, niejednokrotnie konieczność przy w warunkach optycznych warunkach koherentnych i jednopolaryzacyjnych, bardzo szerokie pasma sygnałów, bardzo krótkie czasy trwania impulsów, itp. Adaptacja niektórych z klasycznych metod pomiarowych doprowadziła do ich znacznego rozwoju jakościowego i powstania całych nowych grup metod pomiarowych, żeby wymienić tutaj

tylko np. metody pomiarowe światłowodowych siatek Bragga. Wiele z tych rozwiniętych metod wróciło do swoich oryginalnych dyscyplin, znacznie je wzbogacając, np. optyczne metody radarowe rozwinięte w czasie intensywnego rozwoju technik OTDR. Technika światłowodowa w związku ze swoją skalą trudności metrologicznych i wysokimi wymaganiami technicznymi wzbogaciła znacznie metrologię optyczną i optoelektroniczną.

W niniejszej pracy nie możliwe jest pełne wyczerpanie tematu metrologii światłowodowej. Musiano dokonać wyboru, starając się jednak przedstawić, choćby w zarysie, zakres całości problematyki. Postanowiono szerzej potraktować, rzadziej dyskutowaną w odpowiednich podręcznikach, metrologię technologiczną oraz niektóre zagadnienia z pomiarów właściwości nieliniowych rzeczywistych światłowodów jednomodowych pracujących w konkretnych warunkach aplikacyjnych. Te ostatnie zjawiska mogą odgrywać coraz poważniejszą rolę w niedalekiej przyszłości. Przedstawiono także zarys pomiaru światłowodów aktywnych. Taki wybór odbył się kosztem innych zagadnień, które z konieczności potraktowano bardziej skrótowo. Niektóre z tematów zamieszczono wyłącznie dla podkreślenia ich przynależności do dziedziny miernictwa światłowodowego, omawiając je jedynie w sposób symboliczny. Tak więc w pracy tematy nie są omówione całkowicie systematycznie i konsekwentnie. Praca ma charakter podstawowego wprowadzenia w teorię i praktykę zagadnień metrologii światłowodowej z uwypukleniem problemów współczesnych i tendencji rozwojowych dzisiejszej techniki światłowodowej.

Praca ma w dużej mierze charakter opracowania bibliograficznego, z tym że sporą część praktycznych rozwiązań realizacji klasycznych systemów pomiarowych światłowodów i elementów optoelektronicznych oparto na doświadczeniach związanych z realizacją, w ostatnich latach, Laboratorium Miernictwa Światłowodowego na terenie Instytutu Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej. Laboratorium to początkowo było organizowane pod kierownictwem prof. J. Helsztyńskiego, a obecnie jest prowadzone przez dr L. Lewandowskiego. Laboratorium miernictwa optoelektronicznego obejmuje następujące ćwiczenia: pomiary tłumienia spektralnego światłowodów, pomiary profilu refrakcyjnego światłowodów, pomiary dyspersji światłowodów, pomiary biernych światłowodowych elementów funkcjonalnych, pomiary niektórych modeli czujników światłowodowych, pomiary układów ze sprzężeniem optoelektronicznym, pomiary źródeł i detektorów półprzewodnikowych, pomiary optoelektronicznych modulatorów światła, pomiary elementów analogowego przetwarzania informacji optycznej, Część z ćwiczeń laboratoryjnych była wykonywana na zlecenie różnych instytucji zewnętrznych, które budowały lub uzupełniały swoje laboratoria optoelektroniczne.

1.1. Metody Pomiarowe i Mierzone Parametry w Fotonice

1.1.1. Pomiary Długości Fali

Tradycyjnie najwięcej i najdokładniejsze pomiary długości fali wykonywano w dziedzinie spektroskopii. Obecnie, w zakresie techniki światłowodowej, potrzeba bardzo dokładnych pomiarów długości fali występuje w systemach transmisyjnych z gęstym podziałem falowym (DWDM). Inne pokrewne zastosowanie to produkcja układów scalonych i optoelektronicznych, czyli litografia w zakresie dalekiej UV z zastosowaniem laserów excimerowych. Do pomiarów spektrometrycznych używano dużych spektrometrów siatkowych. Linie emisyjne z lamp wyładowczych takich jak: sodowe, wapniowe, rtęciowe były powszechnie używane jako do kalibracji. Pomiędzy liniami odniesienia dokładność pomiaru długości fali zależała od liniowości mechanizmu skanowania spektrometru. Przy pomocy dodatkowej precyzyjnej obróbki danych pomiarowych najlepsze spektrometry mogły uzyskiwać absolutną dokładność rzędu jednej części na milion.

Rozwój laserów przestrajanych i mierników długości fali stworzył rozwiązania alternatywne. Nowoczesne, bazujące na przestrajanym źródle laserowym, systemy spektrometryczne, także stosowane w technice światłowodowej, składają się z lasera, miernika długości fali, badanej próbki i detektora. Taki typowy układ przedstawiono na rys.1.1. Komputer, w graficznym interfejsie użytkownika, tworzy obraz badanego widma, jednocześnie dokonując akwizycji sygnału pomiarowego z detektora oraz długości fali ze źródła przestrajanego. Dokładności w typowych komercyjnych spektrometrach tego typu są również rzędu jednej części na milion.



pomiarowy system komputerowy

Rys. 1.1. Typowy układ spektroskopowy składający się z lasera przestrajanego, miernika długości fali, detektora i systemu komputerowego.

Lasery z falą ciągłą lub impulsowe pokrywają obecnie zasadniczo całe spektrum fotoniczne, a niektóre mierniki długości fali mierzą zakres od ultrafioletu do podczerwieni z dokładnością $\pm 0,1$

części na milion. Mierniki długości fali pracują porównując spektrum źródła laserowego z wewnętrznym laserem odniesienia. Dla laserów z falą ciągłą, proces komparacji wykonywany jest z zastosowaniem przestrajanego interferometru Michelsona, co przedstawiono na rysunku 1.2. Wiązki lasera pomiarowego i lasera odniesienia biegną przez interferometr wzdłuż identycznej drogi optycznej i liczona jest liczba detekowanych prążków interferencyjnych dla obu źródeł. Długość fali lasera pomiarowego jest obliczana z następującego równania:

$$\lambda_1 = (N_R / N_I)(n_I / n_R)\lambda_R, \qquad (1.1)$$

gdzie: N_I oraz N_R – są liczbą prążków zliczonych dla wejściowej długości fali (λ_I) oraz długości fali lasera odniesienia (λ_R). Czynnik (n_I/n_R) jest poprawką na różnicę współczynników załamania dla dwóch długości fal w powietrzu na drodze pomiędzy zwierciadłami.

Dla mierników długości fali laserów impulsowych technika pomiaru jest odmienna, ale zasada ta sama, co przedstawiono na rysunku 1.3. Impuls laserowy jest krótki, więc zasada przestrajania interferometru nie działa. Zamiast tego stosuje się interferometr o zwierciadłach nieruchomych np. interferometr Fizeau o nieco nachylonych zwierciadłach lub Fabry-Perota o zwierciadłach równoległych. Interferometr porównuje promieniowanie lasera odniesienia z laserem wejściowym.



Rys. 1.2. Zasada działania miernika długości fali. Przestrajany interferometr Michelsona określa długość fali lasera z falą ciągłą poprzez porównanie z laserem odniesienia umieszczonym wewnątrz instrumentu.



Rys. 1.3. W celu pomiaru długości fali lasera impulsowego, stosuje się interferometr ze stałymi zwierciadłami i migawkami w celu zmieniania pomiędzy promieniem wejściowym i odniesienia dla tej samej drogi optycznej.



Rys. 1.4. Samo stabilizujący się układ pomiaru długości fali w systemie DWDM.

W takim przypadku pomiaru długości fali pracy lasera impulsowego promień wejściowy i promień odniesienia używają tej samej drogi optycznej. Ponieważ stał interferometry z drogą optyczną w powietrzu są bardzo stabilne, więc migawki mogą naprzemiennie wybierać promień wejściowy lub odniesienia. Długość fali promienia wejściowego mierzonego jest obliczana poprzez porównanie wzajemnych odległości i lokalizacji transmitowanych prążków z tymi obserwowanymi dla lasera odniesienia.

Dla obu tych technik, głównymi czynnikami ograniczającymi dokładność absolutną jest znajomość długości fali lasera odniesienia i korekcja współczynnika załamania powietrza wewnątrz interferometru. Jako laser odniesienia stosuje się HeNe dla λ =633nm, co ułatwia justację systemu z

promieniem wejściowym. Dokładność lasera HeNe opiera się na znanym przejściu atomowym w 20 Ne (zakładając, że gaz w laserze zawiera tylko ten izotop). Prosty laser HeNe posiada dopplerowsko rozszerzoną szerokość liniową rzędu 1GHz (lub $\pm 10^{-6}$ długości fali), co stanowi wartość dostateczną dla dokładności ± 1 części na milion. Jednomodowy laser HeNe może zapewnić dokładność lepszą niż 1 część na dziesięć milionów, jeśli jest stabilizowany względem centrum przejścia neonu lub względem linii absorpcyjnej takiej jak I₂ w zewnętrznej komórce gazowej.

Korekcja względem współczynnika załamania powietrza może zostać wyeliminowana, jeśli interferometr jest próżniowy. Ponieważ jest to zwykle niezbyt wygodne i kosztowne, częściej używa się interferometrów powietrznych. Pomiary w powietrzu zależą tylko od stosunku współczynników załamania a nie od ich wartości bezwzględnej. Stosunek współczynników załamania można obliczyć z dokładnością $\pm 3*10^{-8}$ w zakresie od ultrafioletu do podczerwieni.

W transmisyjnych systemach światłowodowych pracujących w trybie WDM wykorzystywane jest ok. 50 nm pasmo światłowodowych wzmacniaczy erbowych. Standardowa separacja kanałów wynosi 100GHz w układzie przenoszącym 16, 32 lub 40 długości fal. Długości fal nośnych w poszczególnych pasmach są wyspecyfikowane przez standardy międzynarodowe ITU, w celu uniknięcia przesłuchów międzykanałowych. W celu dodania dodatkowych kanałów separacja międzykanałowa jest ewolucyjnie zmniejszana do 50GHz oraz 25GHz. Producenci telekomunikacyjnego sprzętu światłowodowego i optoelektronicznego pracują nad systemami przenoszącymi do 1000 kanałów z separacją 12,5GHz. Taka separacja odpowiada szerokości widma ok. 100pm (0,1nm).

Mierniki długości fali dla takich systemów powinny kontrolować zastosowane lasery z dostateczną dokładnością aby zachować wyśrubowane parametry systemowe. Oczywiście nie jest możliwe zastosowanie oddzielnego pomiaru długości fali dla każdego źródła. Zamiast tego stosuje się dodatkową precyzyjną stabilizację pracy laserów. Jedną z metod takiej stabilizacji zbiorowej źródeł przedstawiono na rysunku 1.4. Zastosowano nachylony filtr Fabry-Perot i dwa detektory w celu mierzenia natężenia promieniowania lasera przechodzącego przez filtr pod różnymi kątami. Układ sprzężenia zwrotnego kontroluje laser tak aby utrzymać wielkości natężeń w obu detektorach. Długość fali lasera jest początkowo ustawiana do standardu ITU poprzez zastosowanie miernika długości fali w celu ustawienia kąta filtru przed jego zamocowaniem na stałe. Taki sposób zapewnia długoterminową stabilność długości fali w zakresie ± 10 pm, poprzez związanie lasera ze stabilnym filtrem, niż poleganie na wewnętrznych charakterystykach pracy lasera.

Wraz ze wzrostem liczby kanałów DWDM w systemie światłowodowym pojawia się problem zastępowania uszkodzonych laserów z rezerwy. Jednym z rozwiązań, związanych z możliwością bardzo dokładnego pomiaru długości fali, jest zastosowanie w systemie mniejszej ilości laserów ale przestrajanych. Taki laser przestrajany może być ustawiony na standaryzowaną długość fali po jego zamontowaniu w nadajniku wielokanałowym, co może redukować poziom koniecznej rezerwy. Jednakże w takim rozwiązaniu laser podlega dryftowi i niestabilności w czasie pracy. Wówczas bieżący monitoring długości fali może być jedynym rozwiązaniem gwarantującym niezawodność.

Najważniejsze parametry, które decydują o jakości teletransmisyjnej sieci światłowodowej są: długość fali, moc optyczna oraz optyczny stosunek sygnału do szumu. Wielokanałowe mierniki długości fali jednocześnie mierzą setki laserów poprzez zastosowanie techniki przestrajanego interferometru Michelsona i obliczenie transformaty Fouriera dla otrzymania obrazu prążków częstotliwościowych. Dokładność pomiarów długości fali może być lepsza od jednej części na milion i jeden miernik może monitorować wszystkie nadajniki w sieci. Transformata Fouriera zapewnia również informacje o mocy sygnałów i optycznym stosunku sygnału do szumu w każdym paśmie.

Mierniki długości fali pracują ze źródłem odniesienia 633nm. Pomiar systemów światłowodowych dokonywany jest w okolicach 1550nm. Acetylen posiada szereg ostrych linii absorpcyjnych związanych z pasmami rotacyjno wibracyjnymi w obszarze 1510 – 1550nm. Homologowane wzorcowe acetylenowe komórki absorpcyjne (dla kalibracji długości fali) są dostępne w organizacjach normalizacyjnych jak np. w NIST. Są one kalibrowane do dokładności $\pm 0,6$ pm.

1.1.2. Pomiary Czasu i Częstotliwości w Fotonice

Dokładność pomiaru czasu i częstotliwości zależy od wzorców tych wielkości. W technice światłowodowej stabilnym źródłem sygnału zegara jest strumień impulsów laserowych transmitowanych światłowodem. Im krótszy jest impuls lasera, tym dokładniej można mierzyć w światłowodzie czas i częstotliwość, a także długość optyczną i fizyczną wzdłuż włókna optycznego. Obecnie używając różnych metod kompresji i optyki nieliniowej najlepsze osiągnięcia techniczne zbliżają się do obszary attosekund. Czas trwania impulsu wynosi dwa cykle fali optycznej. Technikę kompresji wzmocnionych impulsów rozpoczęto w światłowodzie z naniesioną siatką Bragga. Kompresja polega na nieliniowym zjawisku Kerra (samo-modulacja fazowa), widmowego rozszerzenia dostatecznie intensywnego impulsu. Zgodnie z teorią Fouriera im szersze jest pasmo impulsu tym krótszy impuls. Kombinacja właściwości dyspersyjnych i nieliniowych wewnątrz włókna powoduje różnice w czasach propagacji różnych komponent spektralnych sygnału. Oznacza to, że spektralnie rozszerzony impuls jest zazwyczaj dłuższy niż impuls wyjściowy.

Aby wykorzystać zjawisko spektralnego rozszerzania impulsu do jego kompresji czasowej, konieczne jest dopasowanie fourierowskich składowych sygnału w czasie. Stosując włókno optyczne o rdzeniu gazowym jako medium dla nieliniowego zjawiska Kerra w celu kompresji impulsu pochodzącego ze wzmacniacza światłowodowego otrzymano w kilku ośrodkach czasy trwania impulsów 4,5fs, co przedstawiono na rysunku 1.5. Podobne rezultaty otrzymano w wielu ośrodkach stosując różne metody generacji i obróbki ultrakrótkiego impulsu optycznego. Impulsy o długości 4,8fs uzyskano stosując wzmacnianie parametryczne. Metoda używa generację kontinuum falowego w cienkiej płytce szafiru i kompresję z wykorzystaniem nieliniowego efektu Kerra. Parametryczne wzmacnianie optyczne rozszerza impuls spektralnie i wzmacnia. W cyklu kompresji ta kolejność jest odwrócona.

Bezpośrednią kompresję impulsu d o szerokości dwóch cykli uzyskano bezpośrednia w oscylatorze laserowym Ti:szafir. Uzyskanie impulsu prowadziło przez trze etapy. Schemat kompensacji dyspersji – kryształ Ti:szafir dostarcza wzmocnienia szerokopasmowego, efekt Kerra w tym samym krysztale działa jako mechanizm rozszerzenia spektralnego. Efekt Kerra działa w dwóch kierunkach. Po pierwsze działa jako soczewka nieliniowa samoogniskująca, która dla odpowiednio zestrojonej wnęki działa jako bardzo szybki modulator i powoduje zjawisko tzw. przełączania modów przy pomocy soczewki Kerra. Równolegle występuje zjawisko samo-modulacji fazowej w krysztale. Te metody bazują na tych samych komponentach składowych: ultraszerokopasmowy proces wzmocnienia w celu kompensacji strat mocy, efekt Kerra jako mechanizm, jednoczesnego rozszerzenia spektralnego, oraz kompensacja dyspersji w celu ukształtowania szerokiego spektrum w krótki impuls. Postęp w zakresie generacji optycznych impulsów ultrakrótkich jest możliwy dzięki trzem głównym odkryciom w ostatnim dziesięcioleciu: przełączanie modów soczewką Kerra, światłowody o rdzeniach gazowych kompresujące impulsy o dużej energii, zwierciadła braggowskie o zmiennym skoku do kompensacji dyspersji.

Otrzymanie tych samych czasów trwania impulsu przy pomocy różnych metod rodzi pytania. Czy istnieje bariera fundamentalna czasu trwania impulsu dla dwóch cykli fali optycznej? O ile więcej można skrócić impuls optyczny? Jedną z metod jest próba zastosowania jednocześnie kilku procesów parametrycznych w celu generacji krótkich impulsów w różnych częściach widmowych i rekombinacja ich w celu rozszerzenia spektrum do takiego stopnia aby otrzymać pojedynczy cykl fali optycznej. Można do tego celu zastosować również harmoniczne tych impulsów składowych. Tak szerokie pasmo spektralne impulsu jest użyteczne jeśli możliwa jest dla niego kompensacja dyspersji. Obecnie najszersze pasma zwierciadeł rozłożonych (kompensacja dyspersji i duża wartość współczynnika odbicia) wynoszą ok. 200THz.

Czas trwania impulsu jest oczywiście fundamentalnie ograniczony przed długość pojedynczego cyklu optycznego. Wszystkie metody poszukiwania metod generacji impulsów poniżej 1fs muszą używać długości fali z zakresu głębokiego ultrafioletu. W tym zakresie spektralnym nieliniowe zjawiska optyczne mogą prowadzić do generacji impulsów attosekundowych.

Rys. 1.5. Porównanie femtosekundowych impulsów optycznych (dwu-okresowych) otrzymanych różnymi metodami kompresji. Interferometryczny zapis korelacyjny . Od góry na prawo w dół na lewo: 1 – kompresja impulsu mikro-dżulowego w światłowodzie o rdzeniu gazowym kryptonowym, 2 – oscylator Ti:szafir, 3 - parametryczne wzmocnienie w BBO, 4 – kompresja impulsów z wnękowego lasera Ti:szafir w standardowym jednomodowym światłowodzie kwarcowym. Opis osi pokazuje wartość mierzonych parametrów. Linie odcięcia pokazują miejsca pomiaru czasu trwania impulsów [22].

Spektrum impulsu o długości poniżej 10fs z lasera zawiera miliony modów, równo rozłożonych przez częstotliwość powtarzania lasera. To powoduje próby zastosowania użycia laserów femtosekundowych jako miary częstotliwości optycznych. Pozwala to na dokładne określenie dowolnej częstotliwości wewnątrz zakresu spektralnego lasera. Taka linijka częstotliwościowa może dać zwiększenie precyzji zegara atomowego niż linijka bazująca na przemianach częstotliwości mikrofalowych. Jednym z podstawowych problemów tutaj jest połączenia standardów częstotliwości optycznych ze standardem zegarów atomowych ¹³³Cs pracujących na 9,193GHz. Problem ten rozwiązywany jest klasycznie przez tworzenie tzw. łańcuchów częstotliwościowych. Lasery z przełączaniem modów mogą oferować w tym zakresie prostszą alternatywę, poprzez bezpośrednie sprzężenie rozstawienia swoich modów do mikrofalowej częstotliwości odniesienia.

Niektóre zastosowania wymagają ciągów impulsów femtosekundowych o bardzo wysokiej częstotliwości powtarzania, rzędu dziesiątków gigaherców. Typowe lasery z przełączaniem modów działają z częstotliwościami powtarzania rzędu 100MHz. Skrócenie długości wnęki rezonansowej (zmniejszenie czasu przelotu) prowadzi do zwiększenia częstotliwości powtarzania impulsów w laserze na ciele stałym. Znaczne zwiększenie częstotliwości powtarzania strumieni impulsów femtosekundowych może być podstawą budowy systemów dystrybucji bardzo dokładnego zegara. Lasery półprzewodnikowe mogą emitować ciągi impulsów z częstotliwościami powtarzania THz przy mocy średniej kilku mW. Energia impulsu jest znacznie mniejsza od pJ. W laserach światłowodowych, gdzie ograniczenie na moc nie są tak drastyczne jak w laserach półprzewodnikowych wnęki nie można skrócić, więc muszą pracować w ścisłym reżimie harmonicznym, co wymaga złożonego systemu strojenia. Rozwiązaniem jest zastosowanie laserów o krótkiej wnęce, rzędu 1mm, gdzie otrzymano maksymalne częstotliwości powtarzania impulsów rzędu 60GHz, dla impulsów pikosekundowych. Dla impulsów femtosekundowych uzyskano ok. 5GHz.

1.1.3. Refraktometria, Pomiary Współczynnika Załamania

Metody pomiarów refraktometrycznych można podzielić na kilka głównych grup [12]:

- oparte bezpośrednio na prawie załamania (załamanie w pryzmacie, całkowite wewnętrzne odbicie),
- interferencyjne,
- oparte na wzorach Fresnela,
- cieniowe.

Metoda Snella załamania promieni w pryzmacie jest stosowana do dokładnych pomiarów bezwzględnej wartości współczynnika załamania. Stosować można do pomiarów n dla szkła. Blok mierzonego szkła tworzy pryzmat. Pryzmat pozycjonowany jest w goniometrze z kolimatorem i lunetką obserwacyjną (w przyrządzie ręcznym) lub w całkowicie automatycznym goniometrze ze źródłem laserowym. Obrót stolika goniometru powoduje takie ustawienie pryzmatu, że wiązka skolimowana jest odchylana minimalnie. Występuje to dla symetrycznego przejścia promieni prze pryzmat. Pomiar kąta najmniejszego odchylenia δ i kąta łamiącego pryzmatu ϕ , oblicza się n ze wzoru.:

$$n = \frac{\sin[(\Phi + \delta)/2]}{\sin \Phi/2}.$$
(1.2)

Przy dokładności goniometru 1", dokładność metody pomiarowej jest lepsza od $1 * 10^{-5}$. Metoda stosowana jest dla szerokiego spektrum widmowego od podczerwieni dla nadfioletu. Można stosować w szerokim zakresie temperatur.

Metoda pomiaru kąta granicznego polega na odbiciu światła od granicy ośrodków, podobnie jak w światłowodzie pomiędzy rdzeniem i płaszczem dla modu najwyższego rzędu. Są to metody

techniczne o mniejszej dokładności. Badane szkło doprowadza się do kontaktu optycznego z jedną ze ścian pryzmatu o znanym współczynniku załamania, większym od współczynnika załamania badanego obiektu. Metoda pozwala badać współczynniki załamania także ciał mało przezroczystych. Dokładność pomiaru jest rzędu 10⁻⁴. Na powyższej zasadzie działają refraktometry Pulfricha i Abbego.

Rys. 1.6. Zasada pomiaru współczynnika załamania metodą kąta granicznego. O – mierzona próbka, P – pryzmat pomiarowy. Poniżej obraz obserwowany w lunecie: a) promienie padające na pryzmat pod różnymi kątami po załamaniu pozostają wewnątrz kąta granicznego i _{gr} wskutek czego powstaje ostra granica między jasnymi i ciemnymi obszarami, b) promienia padające na granicę rozdziału pod różnymi kątami odbijają się całkowicie przy i >i _{gr} (promień 3) i częściowo odbijają się, a częściowo załamują przy i <i _{gr} (promień 2) – w rezultacie powstaje granica między obszarem jasnym i półcieniem.

Rys. 1.7. Schemat optyczny refraktometru Abbego. 1- zwierciadło oświetlające, 2 – odchylony pryzmat pomocniczy, 3 – podstawowy pryzmat pomiarowy, 4 – ścianka matowa pryzmatu odchylanego, 5 – badana próbka, 6 – kompensator (pryzmaty Amiciego), 7 – obiektyw lunety, 8 – pryzmat odchylający, 9 – okular lunety.

W refraktometrze Pulfricha wiązka światła ze źródła skupiona jest przez kondensor na poziomej płaszczyźnie ściętego pryzmatu prostokątnego. Lunetka z autokolimacyjnym okularem wyposażonym w płytkę ogniskową z naciętym krzyżem, i obiektywem, umocowana na tarczy z podziałką obraca się o kąt od zera do 75°, odczytywany na noniuszu. Załamane promienie odbijają się przed lunetką pod kątem prostym od pryzmatu całkowicie odbijającego. Środek krzyża ustawia się na granicy cienia za pomocą śruby mikrometrycznej.

Refraktometr Abbego, rys. 1.7. składa się z dwóch prostokatnych pryzmatów szklanych: z pryzmatu podstawowego, o dużym współczynniku załamania i odchylonego pryzmatu pomocniczego, oraz lunety, skali, kompensatora i urządzenia oświetlającego. Próbka badana, np. cienka płytka szklana, światłowód, umieszczana jest w szczelinie między wypolerowaną przeciwprostokatna ściana pryzmatu podstawowego a matowa przeciwprostokatna ściana pryzmatu pomocniczego. Pomiarów dokonuje się w środowisku immersyjnym o współczynniku załamania większym od próbki ale mniejszym od pryzmatu. Obserwacji dokonuje się w świetle przechodzącym lub w świetle odbitym. Położenie granicy zasięgu światła wyznacza się w obu przypadkach przez naprowadzenie krzyża z nici w okularze lunety na widoczną w nim granicę między światłem a cieniem. Na skali odczytuje się bezpośrednio wartości współczynnika załamania dla długości fali zastosowanego standaryzowanego źródła oświetlającego. Kompensator, złożony z dwóch obracających się pryzmatów Amiciego, umożliwia kompensowanie dyspersji pryzmatów i próbki oraz stosowanie światła białego. Pryzmaty z próbką zamyka się w termostacie co pozwala na przeprowadzanie pomiarów w różnych temperaturach. Wartości mierzonych współczynników załamania są w przedziale 1,3 - 1,7. Względna dokładność pomiaru wynosi $2 * 10^{-4}$.

Wywołanie prążków interferencyjnych niewysokich rzędów można wywołać przy pomocy odpowiednio ustawionych płytek jednakowej grubości. Jeśli płytki są dokładnie równoległe do siebie, to pomiędzy promieniami 2 i 3 (rys.1.8.) nie powstaje różnica dróg optycznych. Jeśli płytki nieco pochylimy jedną względem drugiej, tak że kąty padania promieni na pierwszą i drugą nie są jednakowe, między promieniami 2 i 3 wytworzy się różnica dróg $\Delta l=2hn(\cos\beta_2-\cos\beta_1)$, gdzie β_1 , β_2 oznaczają kąty załamania promieni w pierwszej i drugiej płytce. Prążki interferencyjne stanowią wówczas odcinki równoległe do siebie i nazywane są prążkami Brewstera. Zasada ta wykorzystywana jest w klasycznym refraktometrze Jamina. Promienie 2 i 3 biegną w znacznej odległości od siebie. Drogi promieni między płytkami są dość długie. Niewielkie zmiany współczynnika załamania wywołują stosunkowo znaczne zmiany dróg optycznych wyrażonych w długościach fali. Próbkę umieszcza się pomiędzy płytkami. Pomiary praktyczne przeprowadza się przy zastosowaniu kompensatora Jamina. Są to dwie płytki płasko-równoległe umocowane na wspólnej osi poziomej jedna obok drugiej tak, że jeden z promieni interferujących przechodzi przez jedną z nich, a drugi przez drugą. Płytki tworzą ze sobą pewien kąt α. Gdy płytki ustawimy w ten sposób, że promień biegnący przez refraktometr ma kierunek prostopadły do dwusiecznej kąta pomiędzy nimi, drogi optyczne obu promieni są jednakowe. Skręcenie płytek czyni drogi nierównymi, gdyż promienie padają na płytki pod różnymi kątami. Dla dokonywania pomiarów refraktometrycznych kompensator musi być wywzorcowany, tzn. zmierzone różnice dróg optycznych odpowiadające różnym kątom skręcenia. W czasie pomiarów zmiany dróg optycznych wywołane przez zmiany współczynników załamania kompensuje się zmianami dróg wywołanymi skręceniem kompensatora.

Rys. 1.8. *Schematyczny bieg promieni przy obserwacji prążków Brewstera – Jamina oraz schemat interferencyjnego refraktometru Jamina.*

1.1.4. Fotometria i Spektrofotometria

Dział optyki fizycznej zajmujący się badaniem natężenia promieniowania od podczerwieni do ultrafioletu poprzez zakres widzialny. Fotometria wyznacza jednostki i wielkości świetlne takie jak: natężenie oświetlenia, światłość, strumień świetlny, luminancję a także odpowiednie analogiczne wielkości dla promieniowania niewidzialnego. W pomiarach fotometrycznych stosuje się odbiorniki nieselektywne, w których wskazania zależą tylko od mocy padającego promieniowania takie jak termoelementy oraz selektywne, których wskazania zależą od mocy i długości fali. Z pomocą nieselektywnych otrzymuje odbiorników się charakterystyki energetyczne badanego promieniowania. W fotometrii świetlnej wprowadza się wzorcowe źródło światła, ciało doskonale czarne. W fotometrii obiektywnej (fizycznej) jak odbiorniki promieniowania stosuje się elementy półprzewodnikowe.

Strumieniem promieniowania (termin wymiennie używany z mocą promieniowania) nazywamy ilość energii promienistej, wyrażanej w [J], wysyłanej przez źródło promieniowania dE w czasie dt, czyli

$$\mathbf{P}=\mathbf{d}\mathbf{E}/\mathbf{d}\mathbf{t}.$$
 (1.3)

Strumień promieniowania wyrażany jest w [W]. Moc promieniowania ma charakter integralny i nie odnosi się do konkretnej długości fali a do całego spektrum widmowego źródła promieniowania. Jeśli analizowany jest strumień promieniowania w przedziale długości fali d λ (dostatecznie wąskim) to stosunek mocy zawierającej się (promieniowanej) w tym przedziale falowym do szerokości tego przedziału falowego

$$\mathbf{P}_{\mathbf{d}\lambda} = \mathbf{d}\mathbf{P}/\mathbf{d}\lambda \tag{1.4}$$

nazywamy gęstością falową strumienia promieniowania. Gęstość falową mocy promieniowania wyrażamy w [W/nm]. Jeśli odnieść strumień promieniowania do wartości przedziału kąta bryłowego d θ , w którym jest promieniowany (przy czym $\theta = S/4\pi R^2$, gdzie: S – powierzchnia kąta bryłowego na kuli o promieniu R) to stosunek

$$\mathbf{P}_{\mathbf{d}\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{d}\mathbf{P}/\mathbf{d}\boldsymbol{\theta} \tag{1.5}$$

nazywamy gęstością kątową strumienia promieniowania lub natężeniem promieniowania $I=P_{d\theta}$ w danym kierunku. Natężenie promieniowania w danym kierunku wyrażamy w [W/sr]. Jako natężenie promieniowania używa się także termin gęstość strumienia promieniowania w przekroju poprzecznym wiązki światła. Ta gęstość energetyczna jest bezwzględną wartością średniej czasowej wektora Poyntinga. Gęstość kątową strumienia promieniowania można również odnieść do dla wąskiego przedziału długości fal d λ . O tej wielkości mówimy jako o gęstości falowej natężenia promieniowania:

$$\mathbf{I}_{\lambda} = \mathbf{d}\mathbf{P}/\mathbf{d}\mathbf{\Theta}\mathbf{d}\lambda \tag{1.6}$$

i wyrażamy w [W/sr m]. Konieczne jest rozróżnienie wielkości fotometrycznych dla punktowego źródła światła i dla źródła rozciągłego. W przypadku źródła punktowego nie ma trudności z bezpośrednim zdefiniowaniem powyższych wielkości fotometrycznych, ponieważ kąt bryłowy rozpoczyna się w źródle punktowym. W przypadku rozciągłego źródła promieniowania konieczne jest odniesienie natężenia promieniowania również do jednostkowej wielkości powierzchni promieniującej *da*, tak jakby istniało wiele źródeł punktowych. W wyniku takiego działania otrzymuje się wielkość nazywaną luminancją energetyczną źródła:

$$\mathbf{L} = \mathbf{d}\mathbf{I}/\mathbf{d}\mathbf{a} = \mathbf{d}^{2}\mathbf{P}/\mathbf{d}\mathbf{a}\mathbf{d}\boldsymbol{\theta}$$
(1.7)

wyrażaną w $[W/m^2 \text{ sr}]$. Odnosząc luminancję energetyczną do spektrum promieniowania źródła rozciągłego d λ otrzymuje się gęstość falową luminancji energetycznej:

$$\mathbf{L}_{\lambda} = \mathbf{d}\mathbf{L}/\mathbf{d}\lambda = \mathbf{d}\mathbf{I}/\mathbf{d}\mathbf{a}\mathbf{d}\lambda = \mathbf{d}^{3}\mathbf{P}/\mathbf{d}\mathbf{a}\mathbf{d}\theta\mathbf{d}\lambda \tag{1.8}$$

wyrażaną w {W/m² sr nm]. Falowa gęstość luminancji energetycznej służy jako istotny parametr źródła promieniowania. Na jego podstawie można obiektywnie porównywać różne źródła pod względem energetycznym. Zdefiniowane powyżej parametry fotometryczne nazywamy energetycznymi tzn. określonymi dla dowolnej długości fali. Mierzone są detektorami energetycznymi tzn. termicznymi np. bolometrami a więc nie zależnymi od długości fali. Analogiczne parametry dla zakresu widzialnego nazywamy czasami światłościami.

W fotometrii i w miernictwie światłowodowym używa się w celach porównawczych płaskiego źródła termicznego, tzw. źródła Lamberta. Opisane jest ono kosinusoidalną zależnością natężenia promieniowania od kierunku $I(\theta) = I_o \cos(\phi)$, gdzie $I_o -$ natężenie promieniowania w kierunku normalnym do płaszczyzny, ϕ - kąt obserwacji natężenia promieniowania względem normalnej do płaszczyzny promieniującej. Źródło Lamberta, nazywane dyfuzyjnym jest najlepiej przybliżone przez jednorodną świecącą płaszczyznę. Diody elektroluminescencyjne można w pewnych warunkach przybliżać modelem źródła Lamberta. Dla określenia cech energetycznych źródła Lamberta używa się najczęściej luminancji energetycznej (radiancji lub jaskrawości – wszystkie te terminy używa się wymiennie). Luminancja źródła Lamberta nie zależy od położenia na powierzchni promieniującej:

$$\mathbf{L} = \mathbf{d}^2 \mathbf{P} / \mathbf{da} \, \cos(\mathbf{\phi}) \, \mathbf{d}\mathbf{\theta} \tag{1.9}$$

Diody elektroluminescencyjne zazwyczaj posiadają malejącą luminancję przy brzegach powierzchni promieniującej. Przybliżenie Lamberta obowiązuje jeśli rozmiary poprzeczne źródła są znacznie większe od wymiarów poprzecznych odbiornika promieniowania i od jego odległości od źródła. Tutaj często jako odbiornik promieniowania rozpatrujemy powierzchnię czołową światłowodu o jakości optycznej, a więc przybliżenie może być w wielu przypadkach spełnione.

Strumień promieniowania na jednostkę powierzchni napromieniowanej nazywany jest natężeniem napromieniowania w tym punkcie lub napromieniowaniem jednostki powierzchni. Napromieniowanie elementu da_{odb} z elementu da_{nad} o luminancji L jest równe:

$$\mathbf{dH} = \mathbf{d}^{2}\mathbf{P}/\mathbf{da}_{odb} = \mathbf{L}\mathbf{da}_{nad}\mathbf{cos}\phi_{1}\mathbf{cos}\phi_{2}/l^{2}, \qquad (1.10)$$

gdzie $da_{odb}cos\phi_2/l^2$ jest kątem bryłowym obejmującym element powierzchni da_{odb} . Jeśli elementy powierzchni nadawczej i odbiorczej są równoległe, jak to się dzieje w przypadku źródła pobudzającego światłowód, oraz odległe o *l* to

$$\mathbf{dH} = \mathbf{Lda}_{\mathbf{nad}}\mathbf{cos}^{4}\boldsymbol{\phi}.$$
 (1.11)

W przypadku pobudzenia światłowodu przez źródło Lamberta rozpatrujemy napromieniowanie dowolnego punktu na powierzchni czołowej światłowodu z pierścienia na powierzchni źródła Lamberta jak na rysunku. Napromieniowanie z pierścienia obliczamy wstawiając zamiast da_{nad} powierzchnię pierścienia. Światłowód akceptuje promieniowanie w zakresie kąta aperturowego. Dla światłowodu wielomodowego o skokowym profilu refrakcyjnym napromieniowanie wynosi:

$$H = 2\pi L \int_{0}^{\Phi_{NA}} \sin \Phi \cos \Phi d\Phi = \pi L \sin^2 \Phi_{NA}.$$
(1.12)

Dla światłowodu wielomodowego o gradientowym profilu refrakcyjnym maksymalny kąt akceptacji (lokalny kąt aperturowy) posiada wartość lokalną zależną od miejsca położenia na płaszczyźnie wejściowej światłowodu, czyli $\phi_{NA}(r)$, co powinno zostać uwzględnione we wzorze na napromieniowanie. Ponieważ ten kąt maleje w funkcji r, więc moc akceptowana przez światłowód gradientowy będzie mniejsza. Poza tym, w najprostszym modelu fotometrycznym pobudzania światłowodu nie uwzględnia się szereg rzeczywistych zjawisk występujących jak: straty Fresnela na odbicie, wpływ modów słabo propagowanych i wyciekających, eliptyczność rdzenia światłowodu, nieidealności w rozkładzie profilu refrakcyjnego.

Rys. 1.9. Napromieniowanie elementu da w punkcie F na powierzchni czołowej światłowodu ze źródła Lamberta o luminancji L.

Fotometry są przyrządami do pomiaru wielkości fotometrycznych: natężenia oświetlenia, światłości, strumienia świetlnego, luminancji, współczynnika przepuszczalności – transmisji i współczynnika odbicia. W zależności od odbiornika fotometry dzielimy na wizualne i obiektywne. Uniwersalny fotometr laboratoryjny składa się z układu do pomiaru luminancji, układu do pomiaru światłości i luksomierza.

Odmianą spektroskopów są spektrografy absorpcyjne w których bada się absorpcję poszczególnych części widma przez próbkę. Inną odmianą spektroskopów, w których wydziela się wąską część widma (przy pomocy pryzmatu, siatki dyfrakcyjnej i wąskiej szczeliny) są monochromatory. Monochromatory przestrajane są często stosowane w optyce i technice światłowodowej w aparaturze pomiarowej.

Rys. 1.10. Schemat budowy spektrofotometru wizualnego Königa-Martensa i obraz widziany w okularze. $L_1 - \acute{z}$ ródło wzorcowe, $L - \acute{z}$ ródło badane, P_1 , $P_2 - przesłony$, S_1 , $S_2 - soczewki$, Pr - pryzmat, $N_1 - pryzmat$ Wollastona, $N_2 - nikol$, Z - bipryzmat Fresnela, a_1 - a_1 , b_1 - $b_1 - wiązki światła dawane przez jedną część układu, <math>a_2$ - a_2 , b_2 - $b_2 - wiązki światła dawane przez drugą część układu.$

Rys. 1.11. Schemat fizycznego (obiektywnego) spektrofotometru klasycznego. L_1 – źródło wzorcowe, L – źródło badane, P = przysłona, Pr_1 – pryzmat całkowicie odbijający, Pr_2 – pryzmat o stałym odchyleniu, S_1 , S_2 , S_3 – soczewki, Sz_1 , Sz_2 – szczeliny, F – odbiornik optoelektroniczny, G – wskaźnik.

Rys. 1.12. Schemat podstawowego klastycznego rozwiązania spektrografu absorpcyjnego. L –źródło światła, S_1 , S_2 , S_3 – soczewki, B – próbka, Pr – pryzmat, K – linijka fotodetektorów.

1.1.5. Interferometria

W technice światłowodowej zarówno do pomiarów jak i do konstrukcji elementów funkcjonalnych stosuje się wiele rozwiązań interferometrów. Interferometria jest rozległą dziedziną, której opis znacznie przekracza ramy niniejszej pracy. Opis podstawowego rozwiązania często stosowanego interferometru Michelsona zawarto w dalszej części pracy. Inne stosowane interferometry to np. Jamina (jako refraktometr), Fabry-Perota (jako np. filtr spektralny), Lummera-Gehrckego w układach optyki planarnej, itp. Interferometry wykorzystuje się, zarówno w rozwiązaniach laboratoryjnych jak i miniaturowych zintegrowanych ze światłowodem lub elementem optoelektronicznym. Interferometry służą jako spektroskopy, refraktometry, filtry selektywne, modulatory, itp.

Interferometr Fabry'ego-Perota składa się z dwóch płytek szklanych lekko klinowych, jednostronnie posrebrzonych, tak że przepuszczają one część światła, ale mają dużą zdolność odbijającą. Płytki są ustawione w ten sposób, że pomiędzy posrebrzonymi stronami tworzy się dokładnie płasko-równoległa warstwa powietrza, rys.1.10. Promienie, które przez górną płytkę szklaną przedostają się do warstwy powietrza, ulegają wielokrotnym odbiciom na posrebrzonych ściankach płytek. Jeśli na pierwszą płytkę pada wiązka promieni równoległych, to z drugiej płytki wychodzi szereg równoległych wiązek. Dla światła spójnego wiązki te mogą interferować. Promienie, które ulegają odbiciom od zewnętrznych ścianek płytek posiadają inne kąty.

Rys. 1.13. Schemat interferometru Fabry'ego-Perota.

1.1.6. Polarymetria, Pomiary Stanu Polaryzacji Fali

Do pomiaru skręcenia płaszczyzny polaryzacji używa się polarymetrów. Najprostszy polarymetr Biota wykorzystywał dwa skrzyżowane nikole. W przyrządzie mierzony jest kąt, o jki należy skręcić analizator aby otrzymać ponownie całkowite zaciemnienie pola widzenia. Dokładniejszy jest polarymetr Soleila, w którym kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji określany jest za pomocą bikwarcu. Do pomiaru kąta skręcenia używa się polarymetrów półcieniowych. Pozwalają one dokładnie określać kąty skręcenia poprzez fakt, że oko może z dużą dokładnocią stwierdzić jednakową jasność dwu sąsiadujących ze sobą pól. Przykładem takich rozwiązań są polarymetry Laurenta i Lippicha. Lippich zastąpił płytkę kwarcową przesłaniającą połowę otworu dodatkowym małym nikolem. W technice światłowodowej nie stosuje się bezpośrednio klasycznych rozwiązań polarymetrów. Choć oczywiście zasada działania pozostaje taka sama. Modyfikacje poszły w kierunku dostosowania konstrukcyjnego do współczesnych wymogów technicznych. Na przykład jako polaryzatory i analizatory stosuje się cienkie folie bezpośrednio współpracujące z zakończeniem światłowodu. To zupełnie zmienia konstrukcję z objętościowej na zintegrowaną. Pojawiają się zupełnie inne problemy projektowe, technologiczne, konstrukcyjne i pomiarowe.

Rys. 1.15. Polarymetr Soleila. N_P – polaryzator, N_A – analizator, Q – płytka kwarcowa, N', Q' – kompensujący nikol i płytka kwarcowa, C – próbka, S – soczewka lunetki, K_P , K_L – płytki kwarcowe z kwarcu prawo i lewoskrętnego.

Rys. 1.16. Polarymetr Laurenta. N_P – polaryzator, N_A – analizator, P – płytka Laurenta, C – próbka, S – soczewka lunetki, D – przysłona.

Rys. 1.17. Polarymetr Lippicha. N_P – polaryzator, N_A – analizator, N – mały nikol, C – próbka, S – soczewka lunetki.

1.1.7. Miernictwo Światłowodowe

Przedmiotem pomiarów w miernictwie światłowodowym są włókna optyczne przeznaczone do transmisji i przetwarzania sygnałów optycznych, wykonane z nich elementy oraz optoelektroniczne elementy towarzyszące bezpośrednio światłowodowi w jego pracy. Podstawową, naturalną metodą pomiaru światłowodu jest metoda transmisyjna, w której sygnał ze źródła jest transmitowany przez całą długość światłowodu i odbierany w odbiorniku optoelektronicznym. Właściwości takiego systemu, przedstawionego schematycznie na rys.1.18, zależą od wszystkich komponentów. Jeśli odbiornik potrafi dokładnie liczyć impulsy przekazywane światłowodem i porównywać z impulsami nadawanymi, to układ może mierzyć stopę błędów transmisji. Jeśli układ odbiornika potrafi określić rozkład przestrzenny mocy optycznej wychodzącej ze światłowodu, to system może mierzyć wiele istotnych parametrów transmisyjnych jak profil refrakcyjny (bezpośrednio) dla światłowodów wielomodowych i pośrednio jednomodowych, średnicę pola modu podstawowego i rozkład pola modów wyższego rzędu (co przedstawiono schematycznie na rys.1.19.). Jeśli układ

nadawczy można przestrajać w długości fali pobudzającej światłowód a układ odbiorczy potrafi mierzyć zniekształcenia propagowanych impulsów w funkcji długości fali lub zmiany czasu ich propagacji wzdłuż światłowodu, to system pomiarowy nadaje się do pomiarów dyspersji, co w przypadku dyspersji materiałowej przedstawiono na rus.1.20.

Rys. 1.18. Jeden z podstawowych układów pomiarowych światłowodu metodą transmisyjną. W analogicznym rozwiązaniu układ stanowi podstawową cegiełkę budowy światłowodowych systemów transmisyjnych.

Rys.1.19. Rozkład pola modów w światłowodzie jednomodowym: podstawowego oraz rzędu drugiego i trzeciego. Notacja LP oznacza polaryzację liniową modów.

Rys.1.20. Dyspersja współczynnika załamania i grupowego współczynnika załamania w czystym szkle kwarcowym.

Transmisyjna konfiguracja systemu pomiarowego nie wyczerpuje wszystkich możliwości. Światłowód podczas pomiarów może być prześwietlany falą optyczną poprzecznie, polem jednorodnym lub interferencyjnym polem prążkowym. Światłowody są mierzone falą optyczną rozproszoną wstecz. Można stosowac adaptowane klasyczne metody optyczne lub metody stosowane w technice mikrofalowej, radiotechnice, technice laserowej, technice radarowej, itp. Miernictwo światłowodowe rozwija się wraz z nowymi obszarami zastosowań światłowodów, ostatnio wchodząc w klasyczne techniki radiotechniczne, gęstego podziału pasma częstotliwości, adaptowane do terahercowych częstotliwości optycznych.

2. POMIARY TECHNOLOGICZNE ŚWIATŁOWODÓW

Optyczne właściwości materiałów są intensywnie badane pod kątem zastosowań w technice światłowodowej. Zanim powstanie światłowód, w laboratorium technologicznym prowadzone są pomiary materiałów wyjściowych i odczynników, półproduktów jak np. preform światłowodowych. W laboratorium technologicznym prowadzi się także znacznie szersze pomiary światłowodów niż to jest konieczne dla typowych zastosowań i dla typowego użytkownika. W niniejszym rozdziale dokonany zostanie przegląd niektórych rodzajów pomiarów materiałów, preform i światłowodów wykonywanych w warunkach technologicznych. Pomiary te są konieczne w celu otrzymania produktu najwyższej jakości: ultra-niskostratnego światłowodu optymalizowanego dla danego rodzaju zastosowania.

2.1. Pomiary Materiałów i Szkieł Wysokokrzemionkowych

Podstawowe parametry szkieł optycznych to: współczynnik załamania n_d , liczba Abbego L_A lub dyspersja i właściwości spektralne. Znajomość tych parametrów jest niezbędna w celu określenia rodzaju szkieł do danego zastosowania, w tym przypadku do techniki światłowodowej.

Rys. 2.1. Obszar zajmowany przez szkła w przestrzeni Abbego: współczynnik załamania światła – dyspersja materiałowa. W przestrzeni Abbego naniesiono zmiany przerwy energetycznej w szkłach oraz nieliniowego współczynnika załamania n_2.

Współczynnik załamania n_d dla szkieł zmienia się w granicach ok. 1,3 - 2,4 a liczby Abbego w zakresie 8 – 105 [23]. Trwają poszukiwania w celu rozszerzenia wymienionych granic, głównie dla celów szkieł laserowych oraz techniki światłowodowej ultrafioletu, średniej i dalekiej podczerwieni. Na rysunku 2.1. przedstawiono obszar zajmowany przez szkła w przestrzeni Abbego z zaznaczeniem pozycji zajmowanej przez kluczowe dla telekomunikacji światłowodowej szkło SiO₂. Na wykresie zaznaczono zmianę kilku dodatkowych parametrów szkieł jak: wartość przerwy energetycznej oraz nieliniowego współczynnika załamania n₂.

2.1.1. Tworzywa sztuczne w technice światłowodowej

Niektóre rodzaje tworzyw sztucznych wykazują wysoką przezroczystość w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. W technice światłowodowej wykorzystuje się je do budowy światłowodów plastykowych lub do niskostratnych pokryć. Jednym z takich materiałów jest polimetakrylan-akrylu PMMA. Straty transmisyjne tego materiału są ograniczone przez wibracje wiązania węgiel-wodór i rozpraszanie Rayleigha. Zastępując wodór deuterem otrzymuje się światłowody o stratach poniżej 10dB/km.

Rys.2.2. Charakterystyka spektralna tłumienia światłowodu z PMMA.

Na rys.2.2.przedstawiono zmierzoną w układzie spektrofotometrycznym charakterystykę tłumienia światłowodu z PMMA. Przedstawiono ją tutaj jako przykład i odniesienie do innych zastosowań tworzyw sztucznych w technice światłowodowej. Zafalowania krzywej są harmonicznymi drgań wiązania C-H. Podobne pomiary prowadzi się dla szkieł światłowodowych w celu badań stopnia idealności amorficznej struktury szkła.

2.1.2. Pomiary strat transmisyjnych

Ultra-czyste szkło krzemionkowe jest przezroczyste w paśmie 0,4 – 2,0μm. Straty optyczne są spowodowane prze czynniki wewnętrzne jak absorpcję wielofononową, rozpraszanie Rayleigha, absorpcję UV oraz tzw. czynniki zewnętrzne związane z nie idealnością struktury szkła oraz zanieczyszczenia. W technologii włókien optycznych doprowadzono do stanu, gdzie czynniki zewnętrzne ni odgrywają w klasycznych światłowodach telekomunikacyjnych prawie żadnej roli (z wyjątkiem absorpcji jonów OH). Tak więc straty transmisyjne idealnego światłowodu są ograniczone rozpraszaniem Rayleigha dla krótszych fal i absorpcją wielofononową dla dłuższych fal. Obraz ten jest modyfikowany w szczegółach przez konieczne domieszki w szkle światłowodowym.

Rys. 2.3. Dwuwymiarowe obrazy struktury kryształu kwarcu i czystego szkła krzemionkowego. Ciemny punkt – atom krzemu, jasny punkt – atom tlenu.

2.1.3. Pomiary strat absorpcyjnych2.1.3.1. Pomiary absorpcji fononowej i wielo-fononowej

Położenie atomów w szkle krzemionkowym jest przypadkowym układem czworościanów SiO₄. W obrazie dwuwymiarowym wygląda to jak na rys.2.3, gdzie dla porównania podano strukturę kryształu SiO₂. Czworościan krzemionki posiada charakterystyczne sposoby drgań i związane z nimi częstotliwości, co schematycznie pokazano na rys. 2.4.

Rys. 2.4. Podstawowe kierunki drgań czterościennej molekuły SiO₂ oznaczane jako v_1 , v_2 , v_3 i v_4 .

Fononowe pasma absorpcyjne czystej krzemionki odpowiadają podstawowym wibracjom układu tetrahedralnego. Pasma te widoczne są na mierzonej krzywej spektralnej tłumienia w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, rys. 2.5. Liczby na krzywej oznaczają identyfikację składowych drgań v_1 , v_2 , v_3 , oraz v_4 . Domieszki (Ge, B. P) wprowadzają dodatkowe wielofononowe pasma absorpcyjne do tego obrazu, co przedstawiono na rys. 2.6. Pomiar charakterystyki absorpcyjnej w podczerwieni dokonywany jest przy pomocy spektrofotometru na cienkich płytkach szklanych. Pozwala on na analizę struktury materiału. Teoretyczne określenie pasm absorpcji w materiale szklistym jest trudne ze względu na nieharmoniczny charakter łączenia rodzajów drgań. wyższych rzędów. Ze względu na zastosowania praktyczne interesujący jest wpływ harmonicznych drgań sieci amorficznej na długofalowe pasmo transmisji światłowodowej szczególnie w krzemionce słabo domieszkowanej.
Domieszka GeO₂ jest dopasowana do krzemionki ponieważ szkło GeO₂ posiada podobną strukturę atomową i silne pasmo absorpcyjne dla 11,4µm odpowiadające wibracji v_3 . Jednakże w szkle krzemionkowym słabo domieszkowanym GeO₂ spektrum absorpcji nie jest prostą superpozycją właściwości obu szkieł. W wyniku porównania pomiarów można zauważyć rozszerzenie pasm absorpcyjnych i przesunięcie w kierunku dłuższych fal. Do poziomu domieszkowania poniżej 10% zmiany są niewielkie.

Domieszka P_2O_5 w krzemionce powoduje powstanie charakterystycznego pasma absorpcyjnego dla 3,8µm, które przypisywane jest pierwszej harmonicznej drgania rozciągającego wiązania P-O. Przedstawiono to na rys.2.7.



*Rys.2.5. Spektrum absorpcji w zakresie podczerwieni dla czystej krzemionki i krzemionki domieszkowanej tlenkiem germanu GeO*₂.



Rys. 2.6. Spektrum absorpcji w zakresie podczerwieni dla krzemionki słabo domieszkowanej tlenkiem boru B_2O_3 i tlenkiem fosforu P_2O_5 .

Domieszka B₂O₃ silnie wpływa na kształt spektrum absorpcji szkła krzemionkowego (rys.2.6). Pasma absorpcyjne dla 3,7µm i 3,9µm są pierwszymi harmonicznymi silnych pasm długofalowych wibracji układu B-O. Posiadają one wpływ także na krótkofalową część widma.

Bazując na pomiarach wpływu typowych domieszek do szkła światłowodowego można stwierdzić, że wewnętrzne straty absorpcyjne wzrastają o kilka rzędów wielkości w porównaniu z obszarem $1,8 - 2,0\mu$ m dla szkła krzemionkowego. Widmo absorpcyjne jest silniej zmieniane przez domieszkę B₂O₅ niż przez inne. Na rys. 2.7. przedstawiono charakterystykę spektralną strat światłowodów wykonanych z dyskutowanych szkieł domieszkowanych GeO₂, P₂O₅ oraz B₂O₃-GeO₂. Płaszcz światłowodu stanowiła czysta krzemionka domieszkowana B₂O₃.



Rys.2.7. Charakterystyki spektralne strat światłowodów o płaszczu czysto krzemionkowym domieszkowanym B_2O_3 i rdzeniach krzemionkowych słabo domieszkowanych GeO_2 , P_2O_5 i $GeO_2-B_2O_3$.

2.1.3.2. Pomiary strat absorpcyjnych w zakresie ultrafioletu

W obszarze ultrafioletu dokonuje się analogicznych pomiarów szczegółów kształtu pasma absorpcji. Podobnie jak w przypadku poprzednim, jest to obszar poza użytecznym pasmem transmisji ale posiadający wpływ na jakość światłowodu. Dla czystego szkła krzemionkowego obserwowane są cztery silne pasma absorpcji, co przedstawiono na zmierzonej charakterystyce, rys.2.8. Na charakterystyce przedstawiono porównanie z właściwościami kryształu kwarcu. Pasma 10,2; 14,0; i 17,3 eV są przypisywane przejściom excytonowym. Maksimum 11,7 eV jest związane z pasmem przewodnictwa. Szerokość przerwy zabronionej w czystym szkle krzemionkowym wynosi 8,9 eV co daje w przybliżeniu górną granicę transmisji 0,14 nm. Dla szkieł GeO₂ i B₂O₃ te granice wynoszą odpowiednio 0,165 nm i 0,155 nm.



Rys. 2.8. Charakterystyka widmowa odbicia w zakresie ultrafioletu dla czystego szkła krzemionkowego i kryształu kwarcu.

W przypadku szkła kwarcowego (nazwa używana w literaturze zamiennie ze szkłem krzemionkowym) ogon absorpcji elektronowej posiada niewielki wpływ na straty transmisji, ponieważ w tym paśmie rozpraszanie Rayleigha jest znacznie silniejsze, szczególnie dla długości fal większych od λ =0,6µm.

Pasma absorpcyjne szkła kwarcowego, mierzone w zakresie ultrafioletu, ulegają zmianie przez domieszkowanie, tzn. rodzaj domieszki jonu i jego ilość. Maksima absorpcji w szkle domieszkowanym występują dla większych długości fal niż w czystym szkle kwarcowym, co posiada wpływ na widmo użyteczne. Na rys.2.9 pokazano spektrum strat absorpcyjnych dla szkieł światłowodowych z domieszkami GeO₂, P₂O₅, B₂O₃ w zakresie 0,2 μ m – 0,5 μ m. Maksimum absorpcji dla 0,24 μ m jest przypisywane defektom tlenowym w szkle kwarcowym. Wielkość tego maksimum zależy od zawartości jonów hydroniowych OH w szkle.

Krawędź (ogon) pasma absorpcji szkła domieszkowanego GeO₂ rozciąga się w kierunku fal dłuższych proporcjonalnie do koncentracji GeO₂, ponieważ maksimum absorpcji dla GeO₂ jest przesunięte z 0,2µm na 0,25µm. Jest to przypisywane jonom Ge⁴⁺. Współczynnik absorpcji szkła krzemionkowego domieszkowanego GeO₂ w tym zakresie widmowym jest funkcją różnicy współczynników załamania pomiędzy szkłem domieszkowanym a czystym szkłem kwarcowym.



Rys.2.9. Spektrum strat absorpcyjnych dla szkieł kwarcowych domieszkowanych GeO₂, P_2O_5 , B_2O_3 w zakresie 0,2 – 0,5 µm.

2.1.3.3. Pomiary absorpcji związanej z zanieczyszczeniami szkła

Jony metali przejściowych powodują powstanie w szkle krzemionkowym szerokich intensywnych pasm absorpcyjnych w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Ilości tych jonów powodujące straty przyrostowe na poziomie 1dB/km są następujące: Cr - 2ppb, Mn - 10ppb, Fe – 20ppb, Co – 0,2ppb, Ni – 2ppb, Cu – 2ppb. W początkowym etapie rozwoju technologii światłowodów straty spowodowane jonami metali przejściowych były dominujące. Obecnie, dzięki, np. technologii "soot", nie znajduje się śladowych poziomów tych jonów. Powodem tego jest zastosowanie halogenków Si, Ge, P, B jak materiałów wyjściowych. Halogenki metali przejściowych są usuwane przez destylację.

Jony hydroksylowe dają w szkle kwarcowym silne pasmo absorpcyjne dla 2,72µm, które jest związane z podstawowym rodzajem drgań rozciągających. Harmoniczne tego pasma i kombinacje z rodzajami wygięciowymi drgań ciągu Si-O-Si są mierzone dla 2,20µm, 1,90µm, 1,38µm, 1,24µm, 1,13µm, 0,95µm, 0,88µm. Zawartość jonów OH na poziomie 1ppm powoduje wzrost absorpcji do wartości 65dB/km dla 1,38µm. Tak więc, jeśli światłowód jest używany w paśmie 1,0 – 1,6µm to poziom OH powinien być zredukowany do wartości poniżej 1ppb. Te pasma przesuwają się nieco wraz z domieszkowaniem. Jony OH w czystym szkle GeO₂ dają pasmo absorpcji dla 2,86µm, jak to przedstawiono na rys. 2.10. W szkle kwarcowym domieszkowanym GeO₂ maksimum absorpcji OH przesuwa się w kierunku dłuższych fal ze wzrostem poziomu koncentracji domieszki. Na rys. 2.12. przedstawiono taką zależność.



Rys.2.10. Absorpcja w szkle kwarcowym, spowodowana zanieczyszczeniami jonami metali przejściowych.



*Rys.2.11.Charakterystyki absorpcji w zakresie podczerwieni dla czystych szkieł SiO*₂ *i GeO*₂, *mierzone dla płytek o grubości 2mm.*



*Rys. 2.12. Zależność pomiędzy przesunięciem długości fali szczytowej wartości absorpcji OH a koncentracją domieszki GeO*₂ w szkle kwarcowym.

2.1.4. Pomiary strat rozproszeniowych

Rozproszenie Rayleigha jest głównym źródłem strat w obszarze 0,6 – 1,6µm. Natężenie rozpraszania silnie zależy od pierwiastka i ilości domieszki. Fluktuacja koncentracji zwiększa się z domieszkowaniem. Rysunek 2.13. przedstawia zmierzoną charakterystykę strat rozproszeniowych Rayleigha dla kilku rodzajów domieszkowanego szkła kwarcowego.

W przypadku domieszki GeO₂ straty rozproszeniowe wzrastają z ilością. Temperatura mięknięcia szkła domieszkowanego zmniejsza się o ok. 50°C z 10mol% domieszki. Fluktuacja koncentracji jest głównym zjawiskiem odpowiedzialnym za straty rozproszeniowe. Domieszkowanie 10mol% B₂O₃ lub P₂O₅ zmniejsza temperaturę mięknięcia szkła do ok. 1350°C (z wartości 1740°C dla czystego szkła kwarcowego). W przypadku P₂O₅ fluktuacja gęstości zmniejsza się bez zwiększania fluktuacji koncentracji. Straty rozproszeniowe szkła domieszkowanego P₂O₅ zmniejszają się ze wzrostem ilości domieszki. W przypadku B₂O₃ rozpraszanie wzrasta z ilością domieszki.

Współczynnik rozpraszania Rayleigha dla szkieł kwarcowych domieszkowanych GeO₂ jest mierzony jako funkcja długości fali. Z takich pomiarów określa się jego funkcyjną zależność. Podawana jest ona jako zależność eksperymentalna:

$$A_{RS} = (0,51\Delta + 0,76) / \lambda^4 \quad [dB/km], \tag{2.1}$$

gdzie: Δ - różnica współczynników załamania.



Rys. 2.13. Zależność strat rozpraszania Rayleigha od koncentracji domieszki dla kilku rodzajów słabo domieszkowanej krzemionki.

2.1.5. Całkowite straty światłowodów ze szkieł kwarcowych

Zależność całkowitych strat w szkle światłowodowym od długości fali A_T można sformułować na podstawie wyników pomiarów. Jeśli straty zewnętrzne są wyeliminowane zupełnie to straty całkowite można zapisać, dla światłowodu jednomodowego ze szkła domieszkowanego GeO₂ jako:

$$\mathbf{A}_{\mathrm{T}} = \mathbf{A}_{\mathrm{UV}} + \mathbf{A}_{\mathrm{RS}} + \mathbf{A}_{\mathrm{MP}}.$$
 (2.2)

Warunek minimalnych strat jest spełniony dla: $\partial A_T / \partial \lambda = 0$. Warunek ten obliczony dla $\lambda = 1,55 \mu m$ prowadzi do wartości ok. $\alpha = 0,15 dB/km$. Rysunek 2.14 przedstawia zależność strat rozpraszania Rayleigha od koncentracji GeO₂, absorpcji UV i całkowitych strat światłowodu od względnej różnicy współczynnika załamania. Rysunek 2.1 przedstawia zależność długości fali minimalnych strat od względnej różnicy współczynnika załamania Δ . Limit strat światłowodów kwarcowych oceniany jest na nieco poniżej 0,1dB/km.



Rys. 2.14. Zależność rozpraszania Rayleigha, absorpcji UV i całkowitych strat światłowodu od koncentracji GeO₂ dla długości fali minimalnych strat oraz dla λ =1,3µm.



Rys.2.15. Zależność długości fali minimalnych strat całkowitych światłowodu o rdzeniu SiO_2 - GeO_2 od względnej różnicy współczynników załamania Δ .

2.1.6. Pomiary współczynnika załamania

Dane pomiarowe dotyczące wartości współczynnika załamania szkieł czystych i domieszkowanych są ważne dla procesu projektowania światłowodów. Współczynnik załamania warunkach technologicznych mierzony jest podstawowymi metodami szkieł W refraktometrycznymi. W światłowodzie wielomodowym projektowany jest optymalny profil gradientowy współczynnika załamania (rozkład w przekroju poprzecznym). W światłowodzie jednomodowym projektowana jest, odpowiednia do zastosowań, długość fali odcięcia modowego. Dla takich i innych celów potrzebne są dane pomiarowe dotyczące wartości współczynnika załamania i jego zależności od długości fali (dyspersja), temperatury, ciśnienia (zjawisko fotoelastyczne), itp.

2.1.7. Pomiary i obliczenia dyspersji współczynnika załamania

Dyspersja współczynnika załamania opisana jest następującą zależnością Sellmeiera:

$$n^{2} - 1 = \sum_{UV} \frac{4\pi N_{o} f_{UV} e^{2}}{m(\omega_{UV}^{2} - \omega^{2})} + \sum_{IR} \frac{4\pi N_{o} f_{IR} e^{2}}{M(\omega_{IR}^{2} - \omega^{2})} = \sum_{i=1}^{k} \frac{a_{i} - \lambda^{2}}{\lambda^{2} - b_{i}}$$
(2.3)

gdzie m- jest masą atomu, N_o – liczba atomów na jednostkę objętości, ω_{UV} i ω_{IR} sa czestotliwościami pasm absorpcyjnych odpowiednio w ultrafiolecie i podczerwieni, f_{IIV} i f_{IR} sa stosunkiem ilości atomów mających wkład w procesy dyspersji w zakresach UV i IR. Dane pomiarowe są przybliżane trzy-czynnikowym równaniem Sellmeiera z dokładnością większą od 4,3*10⁻⁶. Do pomiarów współczynnika załamania stosowanych jest wiele metod jak np.: metoda minimum dewiacji, interferometria mikroskopowa, rozkład pola bliskiego, pomiary apertury numerycznej. Metoda minimum dewiacji używa próbek szkła objętościowego. Pomiar jest nieczuły przez inne efekty. Inne metody, które stosują światłowód lub preformę wykorzystują zjawisko fotoelastyczne ponieważ włókna i preformy mogą posiadać wysoki poziom naprężeń wewnętrznych. Parametry równania Sellmeiera oblicza się z wielu pomiarów punktowych dla różnych szkieł i tabelaryzuje. Rysunek 2.16. przedstawia rodzinę charakterystyk dyspersji współczynnika załamania dla czystego szkła kwarcowego i rozważanych tutaj szkieł światłowodowych. Różnica współczynników załamania pomiędzy czystą krzemionką i szkłem domieszkowanym wzrasta liniowo z koncentracją GeO₂. Na rysunku 2.17 przedstawiono zmiane współczynnika załamania Δn dla jednostkowego stężenia molowego GeO₂ w funkcji długości fali. Zmiana współczynnika załamania wzrasta dla krótszych fal co odpowiada przesunięciu krawędzi absorpcji ultrafioletowej w kierunku większych długości fal. Analogiczny wykres dla domieszki P₂O₅ przedstawiono na rysunku 2.18, a dla domieszki B₂O₃ na rys.2.19.



*Rys. 2.16. Zależność współczynnika załamania szkieł światłowodowych od długości fali. Czyste szkło kwarcowe i szkło kwarcowe domieszkowane GeO*₂, *B*₂*O*₃.



Rys. 2.17. Zmiana współczynnika załamania dla1%mol GeO2 domieszkowanego szkła kwarcowego.



Rys. 2.18. Zmiana współczynnika załamania dla1%mol P₂O₅ domieszkowanego szkła kwarcowego.



Rys. 2.19. Zmiana współczynnika załamania dla1%mol B₂O₃ domieszkowanego szkła kwarcowego.

2.1.8. Pomiar dyspersji materiałowej

Dyspersja materiałowa jest definiowana jako: $M=(\lambda/c)(d^2n/d\lambda^2)$ [ps*nm⁻¹*km⁻¹], gdzie c – prędkość światła, n – współczynnik załamania, λ - długość fali. Dyspersja materiałowa może być określona korzystając z równania Sellmeiera i tabelaryzowanych współczynników Sellmeiera. Zmierzona dyspersja materiałowa dla szkła kwarcowego została przedstawiona na rys.2.20. Dyspersja wynosi 84 [ps/nm km] dla λ =0,85µm i –22 [ps/nm km] dla 1,6µm. Dla przedstawionego na wykresie szkła osiąga wartość zerową dla λ =1,272µm. Na rysunku 2.21. przedstawiono różnicę dyspersji materiałowej dla jednostkowej koncentracji molowej pomiędzy czystym szkłem SiO₂ i szkłami kwarcowymi słabo domieszkowanymi. Na rys.2.22. przedstawiono zależność długości fali zera dyspersji materiałowej od stężenia domieszki.



Rys. 2.20. Dyspersja materiałowa dla szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂.



Rys.2.21. Zmiana dyspersji materiałowej dla szkła kwarcowego domieszkowanego 1mol%.



Rys. 2.22. Zależność pomiędzy stężeniem domieszki a długością fali zerowej wartości dyspersji materiałowej.

2.2. Pomiary preform światłowodowych i światłowodów

2.2.1. Pomiary fluktuacji współczynnika załamania w preformie

W zależności od metody technologicznej przy pomocy której wytworzono preformę profil refrakcyjny może posiadać fluktuacje sinusoidalne nałożone na profil projektowany. Na fotografii przedstawiono mikro-interferogram preformy VAD w kierunku poprzecznym i podłużnym do osi.



Fot.2.1. Fluktuacje współczynnika załamania w preformie VAD w płaszczyźnie równoległej(1cm=100µm) i prostopadłej (1cm=10µm) do osi. Fluktuacje są ok. 5 * 10^{-4} .

2.2.2. Pomiary dyspersji profilu refrakcyjnego

We wszystkich rodzajach światłowodów: gradientowych, skokowych, wieloskokowych, jednoi wielomodowych profil refrakcyjny podlega dyspersji w funkcji długości fali. Wynika to z różnych charakterystyk dyspersyjnych szkła o różnym poziomie domieszkowania. W granicznym przypadku różnie domieszkowanych szkieł możemy nawet zaobserwować zanik właściwości propagacyjnych światłowodu. Dla wielomodowego światłowodu gradientowego profil typu α zmienia wartość wykładnika w wyniku dyspersji odchodząc dla innej fali od rozwiązania optymalnego. Dla światłowodu jednomodowego zmienia się nieco kształt profilu wpływając na dyspersję, promień pola modowego, itp.

Gdy w światłowodzie wielomodowym profil refrakcyjny jest podany zależnością:

$$n^{2} = n_{1}^{2} \{1 - 2\Delta (r/a)^{2}\} \text{ dla } 0 \le r \le a \text{ oraz } n^{2} = n_{1}^{2} (1 - 2\Delta) = n_{2}^{2} \text{ dla } a \le r \le b.$$
(2.4)

To optymalna wartość parametru α_{op} wynosi:

$$\alpha_{op} = 2 - y - \Delta \frac{(4+y)(3+y)}{5+2y}, \text{ gdzie } y = -2n_1 \lambda d\Delta / N_1 \Delta d\lambda, N_1 = n_1 - \lambda dn_1 / d\lambda.$$
(2.5)

Rysunek 2.23. przedstawia optymalną wartość wykładnika profilu typu α dla światłowodów gradientowych ze szkieł kwarcowych domieszkowanych GeO₂, P₂O₅, B₂O₃.

Dyspersję profilu refrakcyjnego, w celach technologicznych, mierzy się w znacznie szerszym zakresie widmowym niż to wynika z potrzeb aplikacyjnych konkretnego rozwiązania światłowodu. Dla światłowodu wielomodowego mierzy się profil refrakcyjny dla kilku stosunkowo odległych długości fal. Światłowody jednomodowe są przeznaczone do pracy w określonym paśmie falowym i dla normalnych warunków pracy zjawisko dyspersji profilu refrakcyjnego jest drugorzędowe.

Odgrywać może ono rolę w zakresie pracy nieliniowej. Mierzy się poprzez jego wpływ na dyspersję i promień pola modowego.



Rys. 2.23. Optymalna wartość wykładnika potęgowego, gradientowego profilu refrakcyjnego światłowodu wielomodowego ze względu na minimum dyspersji modowej. Światłowód wykonany ze szkieł kwarcowych domieszkowanych GeO₂, P₂O₅, B₂O₃.

2.2.3. Pomiar dyspersji termicznej współczynnika załamania

Niektóre warunki pracy światłowodów i kabli narzucają szerokie zmiany temperatur. W warunkach technologicznych bada się zależność zmiany właściwości optycznych szkieł oraz właściwości propagacyjnych światłowodów w funkcji temperatury. Mierzy się np.: zmiany profilu refrakcyjnego, apertury numerycznej, średnicy pola modu, dyspersję w funkcji temperatury. Układy pomiarowe są analogiczne do stosowanych dla wymienionych parametrów ale pomiar odbywa się np. w komorze klimatycznej.



*Rys. 2.24. Zmiany współczynnika załamania czystego szkła kwarcowego i szkła kwarcowego domieszkowanego GeO*₂ w funkcji długości fali i temperatury. Pomiary wykorzystuje się do oceny dyspersji termicznej.

Na rysunku 2.24 przedstawiono zależność od temperatury współczynników załamania dla czystego szkła kwarcowego oraz szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. W wyniku pomiarów szkła w klasycznym refraktometrze tabelaryzuje się współczynniki równania Sellmeiera dla różnych temperatur. Z danych pomiarowych można obliczyć stałą zmian termicznych współczynnika załamania. Wartość $\delta n/\delta T$ dla czystego szkła kwarcowego, dla długości fali $\lambda=1,3\mu m$ wynosi:

$$\delta n/\delta T = 1.1 * 10^{-5}/{}^{\circ}C$$
 w zakresie 20 – 150°C
 $\delta n/\delta T = 1.3 * 10^{-5}$ w zakresie 300 – 550°C

Temperaturowa zależność dyspersji współczynnika załamania posiada wpływ na dyspersję całkowitą światłowodu. Czas opóźnienia impulsu w światłowodzie o długości l, w funkcji temperatury można przedstawić jako różniczkę zupełną:

$$\delta \tau / \delta T = (n \delta l / \delta T + l \delta n / \delta T) / c.$$
 (2.6)

Współczynnik rozszerzalności termicznej $\delta l/\delta T$ materiału światłowodu jest mniejszy od 1 * 10⁻⁶, więc w tym przypadku pierwszy człon równania może być pominięty. Termiczna zmiana dyspersji materiałowej $\delta t/\delta T$ wynosi ok. 40ps * km/°C w światłowodzie o rdzeniu ze szkła kwarcowego domieszkowanego 15mol% GeO₂ i płaszczu z czystego szkła kwarcowego. Na rysunku 2.24 przedstawiono zależność od temperatury dyspersji materiałowej czystego szkła kwarcowego i szkła kwarcowego 10mol% GeO₂.



*Rys. 2.25. Charakterystyka termiczna dyspersji materiałowej czystego szkła kwarcowego i szkła kwarcowego domieszkowanego 10mol% GeO*₂.

2.2.4. Pomiar liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej

Współczynniki rozszerzalności termicznej szkieł światłowodowych są niezwykle ważnymi parametrami, szczególnie przy projektowaniu światłowodów specjalnych. Pomiarów, w warunkach technologicznych, dokonuje się w dylatometrze raczej na objętościowych próbkach szkła niż na włóknach. Współczynnik rozszerzalności termicznej posiada też istotne znaczenie przy projektowaniu struktury preformy światłowodowej. W preformie obszar płaszcza jest zwykle utworzony z czystego szkła kwarcowego. Szkło kwarcowe posiada bardzo niewielką rozszerzalność termiczną. Współczynnik wynosi $\alpha = 4 * 10^{-7/9}$ C. Słabo domieszkowane szkła kwarcowe posiadają współczynnik α znacznie większy. W związku z tym indukowane są w czasie produkcji preformy znaczne poziomy naprężeń wewnętrznych. Naprężenia te muszą być mierzone i ich poziom kontrolowany, gdyż mogą doprowadzić do produkcji włókien niskiej jakości. W preformach porowatych wytworzonych metodą OVD często dochodzi z tego powodu do zniszczenia. Rysunek 2.26 przedstawia wartość współczynnika rozszerzalności termicznej wraz ze wzrostem koncentracji domieszki do czystego szkła kwarcowego. Współczynnik wzrasta prawie liniowo wraz ze wzrostem poziomu domieszki aż do wartości koncentracji 30%.



Rys. 2.26. Zależność wartości współczynnika rozszerzalności termicznej szkła kwarcowego od poziomu domieszek P₂O₅, B₂O₃, GeO₂, TiO₂.

2.2.5. Pomiary i stabilizacja średnicy rury kwarcowej w czasie procesu CVD

Szklana rura kwarcowa stosowana w czasie procesu CVD ulega powolnemu naturalnemu kolapsowi w czasie przejść palnika. Rura o średnicy wyjściowej 14mm kurczy się do 9 mm po 30 krotnym przejściu palnika w temperaturze 1600°C. Wzrasta grubość ścianki rury i maleje efektywność osadzania z fazy gazowej. W celu zapobieżenia temu zjawisku trzeba stabilizować zewnętrzne wymiary rury przez zastosowanie laserowego miernika średnicy rury sprzężonego z układem utrzymywania niewielkiego nadciśnienia w jej wnętrzu.

2.2.6. Pomiary międzyoperacyjne jakości preformy

W czasie produkcji preformy mogą na jej powierzchni i w strukturze powstawać dyskwalifikujące mikro-defekty. Cały proces wytwarzania preformy jest ściśle kontrolowany poprzez szereg pomiarów międzyoperacyjnych. Szczególnie dokładnie kontrolowany jest stan jej powierzchni, np. przy pomocy układu komputerowego układu wideo z oprogramowaniem do obróbki obrazów. Ustalono doświadczalnie, pomiarowo związek między niektórymi rodzajami widocznych nieidealności preformy (bąble) a jakością wynikowego włókna optycznego. Liczba pęcherzyków rzędu 10/cm² powoduje powstanie strat przyrostowych tzw zewnętrznych włókna optycznego o 1dB/km.

2.2.7. Pomiary obecności i rozkładu jonów OH⁻ w preformie

Zanieczyszczenie jonami hydroniowymi posiada dwa zasadnicze źródła. W materiałach wyjściowych jest pozostałość wody. Jony OH dyfundują ze szklanej rury kwarcowej do nakładanych warstw szkła rdzeniowego. Metody zapobiegania wymagają pomiaru poziomu zanieczyszczeń. Pomiaru dokonuje się najczęściej poprzez określenie poziomu maksimum absorpcyjnego dlaλ=1,4μm w wytworzonym światłowodzie. Zapobieganie zanieczyszczeniom polega na: dodatkowym dokładnym suszeniu surowców lub stosowaniu surowców z których łatwo jest usunąć wodę, stosowaniu suchych gazów, uszczelnieniu układu CVD od wpływów zewnętrznych, stosowaniu bariery kwarcowej (dodatkowego płaszcza) w rurze CVD z czystego szkła przed jego domieszkowaniem w celu utworzenia rdzenia. Droga dyfuzji jonów OH wynosi ok. 30 – 50 µm przed kolapsem preformy, przy stałej dyfuzji d = 7.3×10^{-9} cm² s⁻¹ dla T = 1600° C i czasu dyfuzji t_d = 400s. Rysunek 2.27 przedstawia zmierzone profile rozkładu jonów OH w preformie. Pomiaru dokonano przez transformację gęstości optycznej próbek kilku prefrom dla 2,73µm. Preformy różniły się grubością czysto kwarcowej warstwy buforowej: 1, 1,5, 2, 2,5µm. Warstwa buforowa okazała się niezbędna dla zatrzymania dyfuzji jonów OH do rdzenia preformy i następnie światłowodu. Buforowanie powoduje, że pewien obszar płaszcza jest bardziej suchy. Jest to obszar przylegający bezpośrednio do rdzenia, a więc ten w którym rozprzestrzenia się pole modu podstawowego w światłowodzie jednomodowym.



Rys. 2.27. Pomiar profili rozkładu jonów OH w preformach CVD dla różnych grubości nałożonego czystego szkła kwarcowego: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5µm.

Rysunek 2.28. przedstawia zmierzoną absorpcję, w paśmie 1,39µm, dla światłowodu jednomodowego o różnych grubościach suchego bufora płaszczowego. Z pomiarów wynika praktyczna reguła, że stosunek promieni płaszcza do rdzenia powinien być większy od pięciu w celu otrzymania światłowodu ultraniskostratnego.



Rys. 2.28. Zależność pomiędzy maksimum absorpcji OH dla 1,39m a stosunkiem wymiarów nałożonego płaszcza do rdzenia.

2.2.8. Pomiary optymalnej temperatury osadzania w preformie CVD

Straty transmisyjne włókna optycznego zależą od warunków wytwarzania preformy, a w szczególności od temperatury nakładania szkła. Gdy temperatura jest zbyt niska cząsteczki szkła nie mogą być spieczone do postaci przezroczystej. Gdy temperatura jest zbyt wysoka rura kwarcowa kurczy się zbytnio co uniemożliwia nakładanie warstw szkła. Zakres termiczny w okolicy temperatury optymalnej dzieli się technologicznie na cztery zakresy: temperatura odpowiednia, pośrednia, krytyczny punkt powstawania pęcherzyków, temperatura powstawania pęcherzyków. Obserwując preformę można wyznaczyć te temperatury poprzez różny sposób rozpraszania światła płomienia osadzającego. Dla szkła kwarcowego te temperatury muszą być mierzone w czasie procesu i wynoszą odpowiednio: 1650°C, 1615°C, 1580°C, 1500°C.

2.2.9. Pomiary w czasie wyciągania włókna optycznego

W czasie procesu wyciągania włókna z preformy mierzonych jest szereg grup parametrów technologicznych: parametry związane z pracą pieca jak stabilność temperatury, laminarność przepływu gazu izolującego, stabilność wymiarów włókna, parametry związane ze sposobem pokrywania włókna koszulką, itp. Omówienie metod pomiaru wszystkich parametrów technologicznych przekracza ramy tej pracy.

Zasadnicze dwie przyczyny powodują niestabilność wymiarów wyciąganego włókna szklanego. Jedną jest fluktuacja krótkoterminowa spowodowana fluktuacjami temperatury pieca. Drugą jest fluktuacja długoterminowa spowodowana zmianami średnicy zewnętrznej preformy. Fluktuacje krótkoterminowe posiadają charakterystyczny okres poniżej 1m mogą być redukowane do wartości poniżej ±0,5µm poprzez zmniejszenie fluktuacji temperatury poniżej ±0,2°C. pedukcja fluktuacji temperatury jest związana z wieloma czynnikami jak np. laminarnością przepływu gazu prze piec. Charakterystyczny okres fluktuacji długoterminowych wynosi powyżej 1m. Fluktuacje długoterminowe są redukowane poprzez pomiar bieżącej średnicy preformy (wcześniejsze stworzenie profilu wymiarowego preformy, lub zastosowanie preformy szlifowanej) i wykorzystanie sprzężenia zwrotnego do sterowania szybkości podawania preformy do pieca. Na rysunku 2.29 przedstawiono wyniki pomiarów laserowym średnicomierzem dla procesów wyciągania włókna ze stabilizowaniem i bez stabilizowania wymiarów.



Rys. 2.29. Fluktuacje wymiarów wyciąganego włókna światłowodowego bez stabilizacji oraz ze stabilizacją.

2.2.10. Pomiary wytrzymałości mechanicznej włókna optycznego

Pomiary wytrzymałości włókna optycznego należą do grupy pomiarów technologicznych nie wykonywanych prze końcowego użytkownika, ze względu na stopień ich komplikacji, długotrwałość i niszczący charakter. Potencjalnie włókno szklane ze szkła kwarcowego czystego lub słabo domieszkowanego może osiągać wytrzymałości rzędu 10GPa i większe. W praktyce te wartości są znacznie mniejsze i rzadko przekraczają 5GPa. Wiele parametrów procesu technologicznego a także warunki późniejszego przechowywania i eksploatacji włókna optycznego posiada wpływ na jego wytrzymałość mechaniczną. Ze względu na dużą wagę tej tematyki poświęcono jej osobny rozdział w niniejszej pracy.

3. WARUNKI I METODY POBUDZANIA ŚWIATŁOWODU

Fala świetlna może być wprowadzana do światłowodu w różny sposób. Warunki pobudzania determinują rozkład tej fali świetlnej wzdłuż włókna optycznego. W światłowodzie wielomodowym moc impulsów optycznych jest przenoszona w wielu indywidualnych modach. W przypadku światłowodu jednomodowego moc jest częściowo prowadzona w modzie podstawowym a częściowo wypromieniowywana. Mówimy o pobudzeniu całkowitym jeśli cały rdzeń światłowodu został oświetlony źródłem Lamberta, lub innym odpowiednim źródłem. Takie oświetlenie pobudza wszystkie mody prowadzone wyższego i niższego rzędu, w światłowodzie wielomodowym, oraz mody upływowe. W światłowodzie jednomodowym pobudzenie źródłem Lamberta jest nieskuteczne. Konieczne jest pobudzenie intensywną wiązką skolimowaną o parametrach dobranych do parametrów światłowodu.



Rys. 3.1. Rozkład mocy w przekroju poprzecznym światłowodu włóknistego wielomodowego o skokowym profilu współczynniku załamania.



Rys. 3.2. Schematyczne Charakterystyki przestrzenne i spektralne źródeł do pobudzania światłowodu.



Rys. 3.3. Praktyczna realizacja sprzężenia światłowodu ze źródłem.

Po pewnym czasie, lub po pewnej długości światłowodu, stan pobudzenia (rozkład mocy optycznej w przekroju poprzecznym światłowodu) może ulec stabilizacji. W światłowodzie jednomodowym, gdzie w niewielkiej odległości od miejsca pobudzenia prowadzone są mody płaszczowe, następuje to wtedy, gdy zastosowane jest pokrycie o współczynniku załamania większym od płaszczowego. Jeśli jest brak takiego pokrycia, zagięcie światłowodu o odpowiednio niewielkim promieniu usuwa skutecznie stratne mody płaszczowe. Istnieją także specjalne standaryzowane urządzenia nazywane filtrami modów płaszczowych. Usunięcie tych modów jest istotne, gdyż podczas pomiaru mogą prowadzić do nieprawidłowych wyników parametrów transmisyjnych i refrakcyjnych. Schematycznie warunki pobudzenia światłowodu wielomodowego przedstawiono w przestrzeni fazowej na rys. 3.4.. Rozważamy potęgowy profil refrakcyjny światłowodu o postaci $n^2(r) = n_1^2(1 - \Delta(r/a)^{\alpha})$, gdzie n_1 – współczynnik załamania na osi światłowodu, $n_2=n(a)=const - współczynnik załamania płaszcza światłowodu, <math>\Delta$ - znormalizowany różnicowy współczynnik załamania, a – promień rdzenia, r – współrzędna radialna, α - eksponent profilu refrakcyjnego (na rysunku oznaczony literą g). Kąt akceptacji O jest, w światłowodzie gradientowym, funkcją r – $\sin\Theta(r)=NA(1-(r/a)^{\alpha})^{1/2}$, gdzie NA – apertura numeryczna. Kąt jest największy i równy aperturze na osi światłowodu a najmniejszy i równy zeru na granicy rdzeńpłaszcz. W danym punkcie r wejścia promienia skośnego do rdzenia (nie przecinającego osi światłowodu) promień jest określany dwoma kątami akceptacji względem osi x i y. Oba muszą spełniać warunek akceptacji jeśli rodzaj falowodowy reprezentowany przez ten promień ma być prowadzony a nie upływowy. Koordynaty $\sin^2\Theta$ i r² nazywamy przestrzenia fazowa.





Rys. 3.4. Mody światłowodu w przestrzeni fazowej oraz potęgowy profil refrakcyjny wykorzystywany do analizy i pomiarów.

W pełni pobudzony światłowód wielomodowy prowadzi wiele niskostratnych modów upływowych. Tłumienie tych modów jest ich wartością własną. Występują zjawiska mieszania modów, czyli transferu mocy, spowodowane nieidealnością światłowodu oraz różnego opóźnienia modowego. Warunki na wyjściu światłowodu wielomodowego zależą od warunków pobudzania. W celu wyeliminowania niejednoznaczności pomiarowej wynikającej z tych zjawisk, dąży się do uzyskania jak najszybciej równowagowego stacjonarnego rozkładu modów. Metody uzyskania rozkładu stacjonarnego polegają na: zastosowaniu filtra modów wyższego rzędu przy pobudzeniu pełnym lub częściowym pobudzeniu światłowodu wiązką nie pokrywającą całej powierzchni rdzenia i nie wypełniającą całej apertury numerycznej. Za współczynnik wypełnienia przyjmuje się często wartość 70%. Taką sytuację ograniczonego pobudzenia przedstawiono także na wykresie fazowym. W celu stwierdzenia czy dany sposób pobudzenia tworzy stacjonarny rozkład modów mierzy się rozkłady pól dalekiego i bliskiego.

Zupełnie odmiennymi sposobami pobudzania charakteryzują się światłowody kształtowane, nazywane tak w odróżnieniu od standardowych światłowodów telekomunikacyjnych. Posiadać one mogą inną strukturę wewnętrzną, inne wymiary geometryczne, co czasami uniemożliwia stosowanie standaryzowanego sprzętu pomiarowego.

4. POMIARY TŁUMIENIA ŚWIATŁOWODU

Transmisja mocy optycznej P jest ograniczona w światłowodzie o długości L[km] tłumieniem spowodowanym absorpcją i rozpraszaniem. Sygnał powoli zanika. Absorpcja i rozpraszanie wynika z fluktuacji gęstości szkła, obecności domieszek i zanieczyszczeń. Ograniczenie fizyczne na pasmo przezroczystości, dla ultraczystych materiałów, stanowi rozpraszanie Rayleigha dla krótkich fal i krawędź absorpcji fononowej dla długich fal. Współczynnik tłumienia światłowodu α [dB/km] definiujemy jako:

$$\alpha L=10\log[P(0)/P(L)],$$
 (4.1)

gdzie: L – długość mierzonego odcinka światłowodu, P(0) – moc na wejściu światłowodu, P(L) – moc na wyjściu światłowodu. Moc propagowana zmniejsza się eksponencjalnie z długością światłowodu. W celu określenia współczynnika tłumienia, moc optyczna musi być zmierzona w dwóch punktach wzdłuż światłowodu. W światłowodzie musi istnieć stacjonarny rozkład pola. Zgodnie z powyższym wzorem trzeba znać moc w dwóch miejscach wzdłuż długości włókna optycznego. W ogólnym przypadku moc wejściową wprowadzaną do światłowodu jest bezpośrednio stosunkowo trudno zmierzyć. Zależy ona od sposobu pobudzania światłowodu przez źródło, rodzaju źródła, rozkładu powierzchniowego i kątowego mocy źródła, sprawności sprzężenia pomiędzy źródłem i światłowodem. Trudności z bezpośrednim określeniem mocy optycznej pobudzającej światłowód pomija się, zakładając że ta moc jest równa wartości mocy na wyjściu krótkiego odcinka światłowodu. Jednakże moc w krótkim odcinku światłowodu, szczególni wielomodowego, zanim nie osiągnie rozkładu stabilnego, może się zmieniać w zależności od pobudzenia, dając zły wynik pomiaru tłumienia. Z tego powodu do pomiaru tłumienia światłowodów wielomodowych i jednomodowych stosuje się nieco inne metody. Na rysunku 4.1. przedstawiono schematyczne charakterystyki tłumienia światłowodów wielomodowych w funkcji długości fali dla różnych źródeł pobudzających światłowód i związanych z tym różnych pobudzonych profilach mocy w przekroju poprzecznym włókna optycznego. Profil mocy ulega istotnym zmianom w początkowym odcinku światłowodu, aż do uzyskania rozkładu stabilnego. Odcinek niestabilności może być znacznie skrócony przy zastosowaniu tzw. mieszacza (lub filtra) modowego.



długość światłowodu

Rys.4.1. Charakterystyki tłumienia spektralnego światłowodów wielomodowych w zależności od pobudzonych profili mocy na wejściu, przy braku zastosowania wymuszonego mieszania modów z usunięciem modów płaszczowych.

4.1. Pomiary Tłumienia Światłowodu Metodą Transmisyjną

Dwie zasadnicze transmisyjne techniki pomiaru tłumienia to metoda odcięcia końca światłowodu i strat wtrącenia. Metoda odcięcia polega na pomiarze tłumienia dwóch długości tego samego światłowodu bez zmiany warunków pobudzenia i skorzystaniu z zależności α =(10/(L₂-L₁))logP(L₁)/P(L₂). Ponieważ metoda wymaga odcięcia odcinka światłowodu nie jest praktyczna dla kabli optycznych ze stałymi złączami. Metoda wtrącenia wymaga pomiaru mocy optycznej pobudzającej światłowód i porównania z mocą opuszczającą światłowód. Krytyczne są tutaj warunki pobudzania światłowodu, więc metoda ta pod względem dokładności i powtarzalności jest trudniejsza od metody odcięcia. W metodzie transmisyjnej fala jest wprowadzana do światłowodu ze stabilnego nadajnika optycznego, przechodzi przez całą długość włókna i jest mierzona w kalibrowanym odbiorniku optoelektronicznym, rys.4.2. W pewnych przypadkach taka konfiguracja metody jest wadą gdyż wymagany jest dostęp do obu końców kabla oraz pomiar całkuje tłumienie z całej długości kabla, więc pomiar nie niesie informacji o lokalnych zmianach tłumienia.



Rys. 4.2. Transmisyjna metoda pomiaru tłumienia światłowodu; 1 - źródło światła, 2 - układ optyczny sprzężenia światła do światłowodu, <math>3 - światłowód mierzony, 4 - fotodetektor, 5 - urządzenie pomiarowe.



Rys.4.3. Schemat blokowy pomiaru tłumienia światłowodu metodą odcięcia jako jednej z praktycznych realizacji metody transmisyjnej. Metoda odcięcia wymaga dostępu do obu końców światłowodu [20].



Rys. 4.4. Schemat funkcjonalny stanowiska pomiarowego do pomiaru tłumienia spektralnego światłowodów (w ramach Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW) [20].

Stanowisko pomiarowe przedstawione na rys.4.4. jest częścią Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w Instytucie Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej [20]. Jest ono w pełni skomputeryzowane. Obecnie oprogramowanie jest modyfikowane z autorskiego rozwiązania okienkowego dr K.Poźniaka na rozwiązanie opracowywane w systemie Lab Windows z graficznym interfejsem użytkownika pracującym w przeglądarce internetowej. Źródłem światła białego jest żarówka halogenowa dużej mocy zasilana ze wzmacniacza stabilizowanego. Światło jest modulowane mechanicznie. Zasilacz modulatora jest stabilizowany. Częstotliwość modulacji jest zmieniana w zakresie 25Hz – 1kHz.Pomiary są przeprowadzane np. dla częstotliwości 217Hz. .Modulator jest odnośnikiem dla woltomierza homodynowego - fazoczułego. Zmodulowane światło wchodzi do monochromatora szczelinowego z siatką dyfrakcyjną. Na wyjściu otrzymuje się sygnał optyczny o szerokości spektralnej 1nm i długości fali w zakresie okna dla telekomunikacji światłowodowej. Szczelina wyjściowa monochromatora jest wyposażona W obiektvw mikroskopowy i światło wyjściowe jest skupiane na powierzchni wejściowej światłowodu. Wyższe rzędy dyfrakcyjne są usuwane ze szczeliny przez filtry. Mechaniczne ustawianie siatki i filtrów jest zmechanizowane przez sterowane komputerowo silniki krokowe. Sprzegany koniec światłowodu jest umieszczony na stoliku x-y-z, pozwalającym na optymalizację sprzężenia. Drugi koniec światłowodu jest połączony na styk z fotodiodą w naczyńku z płynem immersyjnym. Prąd fotodiody, proporcjonalny do wyjściowej mocy optycznej światłowodu podawany jest na wejście wzmacniacza transimpedancyjnego. Napięciowy sygnał wyjściowy z tego wzmacniacza po odpowiednim wzmocnieniu, zależnym od poziomu sygnału, przez wzmacniacz programowany jest mierzony przez woltomierz homodynowy fazoczuły. Dynamika wzmacniacza powinna być co najmniej 30 dB optycznych ze względu na duże zmiany poziomu sygnału. Wzmocnienie powinno być dobierane tak, aby woltomierz selektywny mierzył w drugiej połowie zakresu pomiarowego, w celu zapewnienia maksymalnej dokładności i niezależnej od poziomu sygnału mierzonego. Sygnał wyjściowy woltomierza homodynowego podawany jest na 12 bitowy przetwornik A/C w karcie pomiarowej PC. Wynik pomiaru zapisywany jest i obrazowany w komputerowym systemie pomiarowym w postaci charakterystyki spektralnej tłumienia.

Jednomodowe światłowody telekomunikacyjne wytworzone metodami CVD (MCVD), OVD i VAD posiadają prawie jednakowe charakterystyki transmisyjne. Istnieją jednak pewne subtelne różnice w stratach i paśmie transmisyjnym. Pochodzą one np. z różnic w profilu refrakcyjnym, takich jak kształt refrakcyjnego obniżenia osiowego i fluktuacje współczynnika załamania. Straty transmisyjne włókien są takie same jak opisane w pomiarach technologicznych i wynikające z oceny przyczyn fundamentalnych. Gdy poziom jonów OH jest zredukowany poniżej 1ppb, wówczas minimalne straty włókien domieszkowanych GeO₂ są oceniane na poniżej 0,15dB/km. Pomiarowo uzyskuje się w przybliżeniu te wartości dla wszystkich metod technologicznych. W praktyce mówimy o światłowodzie wysokiej jakości jeśli straty minimalne nie przekraczają 0,2dB/km. W takich światłowodach współczynnik rozpraszania Rayleigha nie przekracza wartości A = 0.89.



Rys. 4.5. Przykładowe, schematycznie przedstawione, kształty charakterystyk spektralnych tłumienia światłowodów. a) 1 – krzywa naturalnego rozpraszania Rayleigha w światłowodzie (proporcjonalna do λ^{-4}), 2 – typowy przebieg charakterystyki tłumienia, 3 – pasmo absorpcji jonów hydroniowych OH,



jednomodowy.

Charakterystyki spektralne tłumienia mierzone są przede wszystkim dla celów eksploatacyjnych. Oprócz tego mierzone są dla celów optymalizacji technologicznej światłowodów. Badanych jest kilka alternatywnych domieszek szkła kwarcowego wobec GeO₂, takich jak: Al₂O₃, Sb₂O₃, ZrO₂, SnO₂ i inne. Na rysunku 4.4. przedstawiono charakterystykę spektralną strat dla światłowodu jednomodowego domieszkowanego Al₂O₃. Na podstawie analizy charakterystyk spektralnych strat prowadzone są badania przenikalności pokryć i szkieł dla wodoru i jonów OH. Na rys.4.5. i 4.6 przedstawiono zmiany zmierzonych charakterystyk spektralnych strat na których obserwowane są zjawiska przenikania wodoru do światłowodu, tworzenia tam jonów OH i stopień ich odwracalności.



Rys. 4.7. Przykładowe rzeczywiste charakterystyki tłumienia światłowodów mierzone metodą transmisyjną. A) światłowód jednomodowy, alternatywnie do GeO₂, domieszkowany Al_2O_3 . $\Delta n=0,3\%$.



Rys. 4.8. Przykładowe rzeczywiste charakterystyki tłumienia światłowodów mierzone metodą transmisyjną. Efekt nasycania włókna światłowodowego jonami OH. Dyfuzja wodoru do szkła, krzywa kropkowana – początkowa charakterystyka strat, krzywa ciągła – składowanie światłowodu w atmosferze wodoru 1,8 atm.



*Rys. 4.9. Przykładowe rzeczywiste charakterystyki tłumienia światłowodów mierzone metodą transmisyjną. Światłowód MCVD z domieszką P*₂O₅ *w koszulce nylonowej.*

4.2. Pomiary Światłowodu Metodą Rozproszenia Wstecznego

W technice pomiarowej rozproszenia wstecznego światło jest wprowadzane i odbierane z jednego końca światłowodu. Sygnał rozproszony wstecz, o znacznie mniejszym poziomie niż transmitowany wprzód, niesie informacje o rozkładzie tłumienia wzdłuż światłowodu. Wykorzystywane jest zjawisko rozpraszania Rayleigha. Część promieniowania rozpraszana wstecz spełnia warunki modów prowadzonych i podlega tłumieniu wzdłuż włókna. Moc optyczna powracająca we włóknie jest rozdzielana od nadawczej w wejściowym sprzegaczu. Tłumienie określane jest z rozkładu czasowego poziomu mocy powracającej. Jeśli współczynnik tłumienia jest stały w funkcji długości światłowodu, wówczas moc rozpraszana wstecz zmniejsza się eksponencjalnie od początku włókna. Z powodu nieciągłości wartości współczynnika załamania na początku i końcu światłowodu a także na ewentualnych złączach czy spawach wzdłuż długości kabla, następują znacznie większe lokalne poziomy rozproszenia wstecznego. Znając grupowy efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu ng można obliczyć jego długość oraz odległości pomiędzy defektami, spawami, złączami, itp. z następującej zależności: $L=(\Delta t/2)(c_0/n_g)$, gdzie Δt - różnica czasu między odpowiednimi artefaktami sygnału rozproszenia wstecznego, c_o – predkość światła w próżni. Współczynnik tłumienia odcinka światłowodu pomiedzy długościami L₁ oraz L₂ wynosi:

$$\alpha = (5/(L_2-L_1))\log P(L_1)/P(L_2).$$
(4.2)

Współczynnik 5 w równaniu wynika z faktu, że detekujemy moc rozproszoną wstecz a nie propagowaną wprzód. Założeniem poprawności tego równania jest stałość apertury numerycznej i średnicy rdzenia światłowodu wzdłuż całej mierzonej długości. Jeśli jednak tak nie jest wykonuje się dwa pomiary rozproszenia wstecznego z obu końców światłowodu a wyniki uśrednia się. Ze względu na niewielki poziom mocy rozpraszanej wstecz metoda nakłada wysokie wymagania techniczne pod względem szumowym na odbiornik optoelektroniczny. W celu poprawienia stosunku sygnału do szumu pomiar wykonuje się na ogół automatycznie wielokrotnie i wyniki uśrednia. Pełna nazwa metody pomiarowej brzmi – reflektometria optyczna w dziedzinie czasu. Jej odmianą jest reflektometria polaryzacyjna w czasie której zapisywany jest także stan polaryzacji fali wzdłuż światłowodu. Dotyczy to światłowodów polaryzacyjnych. Badać można także stopień idealności światłowodu izotropowego.



Rys. 4.10. Optyczna rozproszeniowa metoda pomiaru tłumienia światłowodu w dziedzinie czasu -OTDR. 1 – źródło światła, 2 – układ optyczny sprzężenia światła od źródła do światłowodu, 3 – mierzony światłowód, 4 – fotodetektor, 5 – układ pomiarowy.



Rys. 4.11. Praktyczna realizacja optycznego układu reflektometru pracującego w dziedzinie częstotliwości (OFDR) do badania światłowodów włóknistych.



Rys. 4.12. Schemat blokowy reflektometru z interferometrem Michelsona.



Rys. 4.13. Przykładowy, schematycznie przedstawiony, kształt charakterystyki rozproszenia wstecznego światłowodu P(L); L_F – długość światłowodu, 1 – rozproszenie wsteczne od początku światłowodu (Płaszczyzny wejściowej), 2 – rozproszenie wsteczne od złącza światłowodowego (spawu, innej nieciągłości włókna optycznego), 3 – rozproszenie wsteczne od zakończenia światłowodu. P_i – moc optyczna.

Reflektometria optyczna jest obecnie główną techniką pomiarową dla włókien optycznych i kabli, a także elementów, gdzie mamy dostęp tylko do jednego końca badanego urządzenia. Podstawowe parametry jakościowe reflektometru jako przyrządu pomiarowego to rozdzielczość przestrzenna pomiaru i zakres dynamiczny. Obecnie osiągane rozdzielczości, nawet w przyrządach komercyjnych są poniżej 10µm, a zakres dynamiczny powyżej 80dB. Reflektometry o dużym zasięgu mogą mierzyć ciągłe odcinki włókna o długości kilkaset kilometrów. Reflektometry precyzyjne o krótszym zasięgu potrafią rozróżnić przyległe defekty odległe od siebie o centymetry.

W niskostratnym światłowodzie ilość światła rozproszonego wstecz jest rzędu 10⁻⁷ wartości impulsu próbkującego na jednostkę długości impulsu. W celu zmierzenia lokalnych zaburzeń tłumienia na poziomie poniżej 0,1dB, sygnał szumowy powinien być ok. 20dB poniżej mierzonej wartości. W wyniku tego narzucane jest wymaganie techniczne 100dB dynamiki pomiędzy wartością sygnału próbkującego i szumu. Dlatego, przy pomiarach niekoherentnych, gdzie fotoprąd jest proporcjonalny do detekowanej mocy, elektryczny zakres dynamiczny musi być większy niż 200dB, aby jednocześnie mierzyć 100% odbicie i małe straty odległego spawu. Przy bardzo silnych odbiciach odbiornik może być silnie nasycany i wówczas występuje problem z szybkością powrotu odbiornika do nominalnych warunków pracy. Jest to tzw. problem strefy martwej, związanej np. z

silnym odbiciem fali od początku światłowodu, lub silnie odbijającym artefaktem. W obszarach przyległych do takiego elementu przyrząd powinien dokonywać prawidłowych pomiarów.

W celu powiększenia rozdzielczości geometrycznej pomiaru OTDR stosuje się różne techniki. Dla otrzymania dużej rozdzielczości impuls pomiarowy powinien być krótki, jednak poziom rozproszenia wstecznego wówczas maleje, gdyż jest proporcjonalny do energii w impulsie próbkującym. Zastosowano technikę autokorelacji, dzieląc długi impuls na serię kodową krótkich impulsów.

W odróżnienie do optycznej techniki reflektometrycznej w dziedzinie czasu (OTDR) stosuje się analogiczną technikę w dziedzinie częstotliwości (OFDR). Wprowadza się przestrajanie częstotliwościowe do sygnału pobudzającego światłowód. Modulacja dotyczy bezpośrednio nośnej optycznej bądź mikrofalowej podnośnej modulacyjnej. Podobnie jak OTDR, OFDR słabo rozpoznaje rozproszenie z małej sekcji światłowodu, ale zaletą jest polepszona detekcja dyskretnych zaburzeń i eliminacja strefy martwej. Sprzęt OFDR przybiera postać analogiczną do mikrofalowych analizatorów układów, co przedstawiono na rysunku. Sygnał próbkujący przybiera formę modulacji natężenia nośnej optycznej. Modulacja jest przestrajana krokowo w dziedzinie częstotliwości. Synchronicznie mierzona jest odpowiedź rozproszeniowa sieci lub linii optycznej. Zapisywana jest odpowiedź amplitudowa i fazowa w całym paśmie badanych częstotliwości. Odwrotna transformata Fouriera modulacyjnej funkcji przejścia daje odpowiedź układu w dziedzinie czasu. Rozdzielczość pomiaru jest proporcjonalna do zakresu przestrajania częstotliwościowego. Zakres przestrajania jest ograniczony pasmem lasera, i obecnie może być rzędu 100GHz, dając bardzo wysokie rozdzielczości pomiaru, szczególnie w tzw. echach podwójnych, odległych od siebie o pojedyncze milimetry a nawet poniżej milimetra.

Inne rozwiazania reflektometrów bazuja na interferometrze Michelsona. Rozdzielczość dwuimpulsowa w takim przyrządzie jest rzędu pojedynczych mikrometrów, przy dynamice Mikrometrowe rozdzielczości optycznej przekraczajacej 100dB. reflektometrów interferometrycznych pozwalają na pomiary subtelnych zaburzeń propagacji w elementach optoelektronicznych, obudowach elementów aktywnych, izolatorach, sprzegaczach. Tego typu urządzenia nazywane są optycznymi reflektometrami w dziedzinie koherencji (OCDR). Zasadę działania OCDR przedstawiono na rysunku. Element mierzony (światłowód) jest umieszczony w jednym ramieniu interferometru Michelsona, a ramię odniesienia posiada ruchome zwierciadło. Źródłem jest szerokopasmowa dioda elektroluminescencyjna DEL, o krótkiej drodze koherencji znacznie poniżej milimetra. W takim przypadku interferencja koherentna następuje jedynie kiedy drogi optyczne pomiędzy rozproszeniem wstecznym w testowanym ramieniu i sprzęgaczu dzielącym różnią się mniej niż wynosi droga koherencji źródła. Poprzez przesunięcie zwierciadła odniesienia w celu zmiany opóźnienia i pomiar wielkości sygnału interferencyjnego w każdym punkcie, można mapować artefakty sygnału rozproszonego bardzo dokładnie. Rozdzielczość jest równa długości koherencji źródła, a zakres jest ograniczony mobilnością zwierciadła odniesienia. Zakres dynamiczny takiego przyrządu może być 150dB a rozdzielczość poniżej 10µm. Tak olbrzymie rozdzielczości uzyskuje się w wyniku dugotrwałych pomiarów z uśrednianiem.

4.3. Pomiar i Obliczenia Strat Zgięciowych (Mikrozgięciowych) Światłowodu

Straty transmisyjne obecnie wytwarzanych światłowodów jednomodowych zostały zredukowane niemalże do ocenianego poziomu absolutnego ograniczenia fizycznego materiału. Dlatego też przedmiotem pomiarów są wszelkiego rodzaju straty przyrostowe spowodowane przez warunki aplikacyjne. Głównie dotyczą one procesu kablowania i instalacji światłowodu. Głównym źródłem strat przyrostowych mogą być mikro-zgięcia. Straty zgięciowe i mikrozgięciowe były w literaturze przedmiotu dokładnie analizowane i obecnie możliwe jest dokładne porównywanie wyników pomiarów z teorią w celu określenia charakteru zaburzeń dotyczących włókna optycznego. Straty zgięciowe i mikrozgięciowe mierzone są analogicznie do strat włókna tylko

włókno narażane jest na zgięcie (mikrozgięcia) w standaryzowany sposób. Straty mikrozgięciowe indukuje się w światłowodzie w warunkach pomiarowych odciskając włókno szklane na twardej siatce o znanym spektrum częstotliwości mechanicznych.



Rys. 4.14. Straty zgięciowe spowodowane przez centralne obniżenie wartości współczynnika załamania światła w profilu refrakcyjnym światłowodu.



Rys. 4.15. Straty zgięciowe w światłowodach jednomodowych o różnych wartościach względnej różnicy współczynników załamania.


Rys. 4.16. Straty zgięciowe światłowodów jednomodowych o różnych promieniach wygięcia.

W praktycznych warunkach technologicznych stosunkowo trudno jest wytworzyć światłowód jednomodowy o idealnym profilu refrakcyjnym. Jednym z efektów wprowadzanych prze technologię jest centralne obniżenie wartości współczynnika załamania. Wynika to z ostatniego etapu przygotowywania preformy tzn. kolapsu. W czasie wysoko-temepraturowego kolapsu następuje częściowe odparowywanie domieszki na osi preformy. Zagłębienie refrakcyjne powoduje wzrost strat zgięciowych światłowodu. Wpływ zagłębienia refrakcyjnego na straty zgięciowe przedstawiono na rysunku. Odcięta pokazuje znormalizowaną szerokość osiowego obniżenia refrakcyjnego. W praktyce ta wartość nie przekracza 0,2, czego efektem jest wzrost tłumienia o 0,005dB/km dla promienia zgięcia 9mm. Pomiarowo dowiedziono, że dla znormalizowanej szerokości zagłębienia refrakcyjnego poniżej 0,05, wpływ może być pominięty.

Straty spowodowane z jednorodnego wygięcia światłowodu zależą silnie od promienia wygięcia i różnicy współczynników załamania Δn . Na rysunku przedstawiono zależność pomiędzy tymi wielkościami. Straty zgięciowe zależą eksponencjalnie od promienia zgięcia i liniowo od Δn , co przedstawiono na rysunku. Straty zgięciowe wyrażone są zależnością:

$$\alpha_{b} = \frac{\sqrt{\pi}U^{2}F}{2V^{2}W\sqrt{WRa}} * \frac{2W}{K_{1}(W)}, \quad F = \exp(-\frac{4\Delta W^{3}R}{3V^{2}a}), \quad (4.3)$$

gdzie: $V^2=W^2+U^2$, W – jest znormalizowanym parametrem zaniku pola w płaszczu światłowodu, K₁ – modyfikowana funkcja Bessela pierwszego rzędu. Obowiązuje przybliżona zależnośćW=1,142V-0,9960 dla 1,5<V<2,5. Wartości teoretyczne obliczone z powyższej zależności i ich porównanie z pomiarami pokazano na rysunku..



Rys. 4.17. Porównanie strat zgięciowych światłowodu obliczonych teoretycznie (krzywe przerywane) i zmierzonych (krzywe ciągłe) dla światłowodu jednomodowego.

5. POMIARY DYSPERSJI CHROMATYCZNEJ I PASMA TRANSMISJI

5.1 Znormalizowana Transmitancja Światłowodu

Obok tłumienia sygnału optycznego drugim najbardziej fundamentalnym parametrem transmisyjnym światłowodu jest pasmo. Ograniczone pasmo powoduje zniekształcenie (rozmycie, rozszerzenie) sygnału impulsowego i analogowego. Mówimy o dyspersyjnych właściwościach światłowodu. W dziedzinie częstotliwości światłowód jest filtrem dolno przepustowym, przy czym w niektórych przypadkach tzw. częstotliwość 3dB, czyli połówkowego spadku amplitudy (którą nazywamy pasmem) może być bardzo duża, skąd biorą się trudności z pomiarem bardzo szerokiego pasma. W dziedzinie czasu amplituda fali świetlnej zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości modulacji f_m aż do całkowitego zaniku.

Funkcja przenoszenia światłowodu (transmitancja) dla danej częstotliwości modulacji jest stosunkiem mocy sygnału o tej częstotliwości na początku i na końcu światłowodu o jednostkowej długości znormalizowana względem funkcji przenoszenia sygnału niemodulowanego:

$$T_n(f_m) = T(f_m)/T(f_m=0) = [P_2(f_m)/P_1(f_m)]/[P_2(0)/P_1(0)].$$
(5.1)

Kształt typowej krzywej transmitancji znormalizowanej przedstawiono na rys. 5.1, gdzie transmitancję oznaczono symbolem H. Najczęściej najlepszym przybliżeniem jest krzywa Gaussa.



Rys. 5.1. Znormalizowana transmitancja światłowodu; f_m – częstotliwość modulacji sygnału optycznego.

W światłowodach wielomodowych pasmo zależy od warunków pobudzania modów, podobnie jak to było w przypadku tłumienia. Dla prawidłowego pomiaru trzeba uzyskać tzw. stacjonarny rozkład pola. Jeśli skupimy falę świetlną o niewielkiej aperturze na małym obszarze rdzenia to pobudzona zostanie tylko wybrana grupa modów najniższego rzędu, których specyficzne czasy opóźnienia, a właściwie różnice tych czasów, będą decydować o paśmie. Taka technika nazywana jest pomiarem różnicowego opóźnienia modowego. Pozwala na poszukiwanie typów profilu refrakcyjnego światłowodu wielomodowego kompensujących dyspersję międzymodową. Zaburzenia profilu refrakcyjnego są widoczne poprzez zmiany indywidualnych czasów opóźnienia poszczególnych modów, czego rezultatem jest obecność dodatkowych impulsów w odpowiedzi światłowodu.

Z powodu niejednoznaczności stacjonarnego rozkładu modów wskutek zależności zjawiska mieszania modów od nieidealności światłowodu i czynników zewnętrznych pomiary pasma dla jednej długości włókna wielomodowego $B_o(L_o)[MHz]$ mogą być ekstrapolowane na inną długość $B_1(L_1)$ tylko z określoną dokładnością. Współczynnikiem skalującym jest γ według zależności $B_l/B_o=(L_1/L_o)^{-\gamma}$. Parametr γ , określany doświadczalnie dla danego światłowodu poprzez pomiar dla pasma dla różnych długości i stałych warunków pobudzania, wynosi 1 na początku włókna i dąży asymptotycznie do wartości 0,5 dla dużych jego długości. Funkcja zmiany parametru γ może mieć charakter indywidualny.

5.2. Pomiary w Dziedzinie Częstotliwości

Pasmo mierzone jest praktycznie przy pomocy metod częstotliwościowych lub czasowych. Zasada metody częstotliwościowej jest najprostsza jeśli tylko dysponujemy stabilnym źródłem i detektorem o dostatecznie szerokim paśmie, przekraczającym pasmo światłowodu np. o rząd wielkości. Jeśli źródło i detektor posiadają swoje znane charakterystyki częstotliwościowe to wynik pomiaru pasma światłowodu musi to uwzględnić. Pasmo światłowodu zależy od długości mierzonego odcinka (w odróżnieniu od pasma jednostkowego) więc w przypadku metody częstotliwościowej naturalna jest tendencja do pomiaru odcinków dostatecznie długich aby nie było kłopotów z elementami aktywnymi. Jednak wówczas pojawia się problem trafnej extrapolacji pomiaru na inną długość dla światłowodu wielomodowego. Przy pomiarze światłowodu jednomodowego problem ekstrapolacji na inną długość w zasadzie nie występuje, gdyż pasmo jednostkowe dobrze opisuje właściwości, ale pomiar jest trudniejszy ze wzgledu na znacznie szersze pasmo. Dyspersję w światłowodach jednomodowych mierzy się stosując raczej metody fazowe. Metoda częstotliwościowa posiada szereg wad i zalet w odniesieniu do praktycznych realizacji. Pomiar jest stosunkowo szybki, gdyż na wobuloskopie od razu otrzymuje się odpowiednią charakterystykę częstotliwościową. Nie wymaga zastosowania skomplikowanego układu optycznego i obróbki sygnału, a więc teoretycznie jest predestynowana do zastosowań polowych. Wymaga użycia dobrej jakości źródeł i detektorów.



Rys. 5.2. Zestaw pomiarowy dyspersji w funkcji długości fali w dziedzinie częstotliwości przy pomocy źródła niekoherentnego i modulatora elektrooptycznego.

5.3. Pomiary w Dziedzinie Czasu

Metoda czasowa polega na pomiarze rozszerzenia impulsu wzdłuż włókna spowodowanego dyspersją. Widmo częstotliwości laserowego impulsu optycznego musi być szersze od mierzonego pasma, tak więc dla światłowodów wielomodowych szerokość impulsu może być rzędu 10-100ps a dla skompensowanego dyspersyjnie światłowodu jednomodowego może być nawet wymagana poniżej pikosekundy. W światłowodzie wielomodowym zmierzymy łącznie efekty dyspersji modowej i materiałowej, podczas gdy w jednomodowym - materiałowej, wynikłej ze skończonej szerokości spektralnej źródła optycznego. Impuls laserowy, ulega rozszerzeniu i zniekształceniu w światłowodzie, jest wprowadzany do fotodiody, podlega konwersji opto-elektronicznej, wzmacnianiu i analizie np. w oscyloskopie samplingowym lub systemie komputerowym specjalizowanym do akwizycji i obróbki danych pomiarowych. Impuls wyjściowy ze światłowodu musi być porównany z impulsem pobudzającym, więc układ pomiarowy musi posiadać dwa tory: pomiarowy i odniesienia. Układ odniesienia powinien uwzględniać warunki pobudzenia pomiarowego odcinka światłowodu, więc czasami jest realizowany przy pomocy sprzęgacza. Zakładając gaussowski kształt impulsu, znacznemu uproszczeniu ulega analiza i obliczanie pasma z pomiarów. W wyniku pomiaru otrzymujemy dwa impulsy gaussowskie $p_{we}(t)$ oraz $p_{wv}(t)$. Poprzez całkowanie impulsów lub komputerową analizę geometryczną otrzymujemy ich średniokwadratowe szerokości δt_{wy} , δt_{wy} , a tym samym rozszerzenie impulsu wyjściowego $\Delta t_{wy} = (\delta t_{wy}^2 - \delta t_{we}^2)^{1/2}$ oraz pasmo B=0,375/ Δt_{wv} , gdzie czynnik liczbowy we wzorze na pasmo wynika z uproszczonego założenia gaussowskiego kształtu impulsów. Formalna metoda przejścia z kształtu impulsu mierzonego na pasmo wiedzie poprzez transformatę Fouriera. Otrzymujemy tutaj funkcję transferu

amplitudy i fazy, w odróżnieniu od metody częstotliwościowej, gdzie informacja o fazie jest tracona. Informacja o fazie pozwala dodatkowo znacznie dokładniej określić transmitancję, np. symetrię kształtu impulsu.



Rys. 5.3. Schemat zestawu do pomiaru czasu przejścia impulsu laserowego w światłowodzie



Rys. 5.4. Schematyczne przedstawienie odpowiedzi impulsowej światłowodu oraz przeliczenie odpowiedzi impulsowej na pasmo.

Impuls optyczny (ogólnie modulowana fala optyczna o skończonym widmie długości fal $\delta\lambda$ skupionym wokół centralnej długości fali λ_0) rozprzestrzenia się w światłowodzie z prędkością określoną grupowym współczynnikiem załamania: n_g=n-(λ dn/d λ), v_g=c/n_g, którą przeliczamy na grupowy czas opóźnienia impulsu t_g po przejściu przez światłowód o długości L (lub jednostkowy grupowy czas opóźnienia t_{gn} przypadający na jednostkę długości światłowodu) t_{gn}=n_g/c. Ponieważ t_{gn}=t_{gn}(λ), więc indywidualne porcje λ_i widma wewnątrz $\delta\lambda$ propagowane są z różnym opóźnieniem t_{gn}^{λ_i} Dyspersję materiałową określamy jako pochodną grupowego współczynnika załamania względem długości fali D_m=dn_g/cd λ =dt_g/Ld λ [ps/nm km]. Wartość współczynnika załamania n(λ) dla czystej krzemionki dla użytecznych długości fal maleje ze wzrostem λ i zawiera się w granicach 1,44-1,45, a wartość grupowego współczynnika załamania $n_g(\lambda)$ jest w pobliżu 1,465 i najpierw maleje a potem rośnie osiągając minimum dla ok. 1,3µm, gdzie krzywa n(λ) posiada punkt przegięcia. Dyspersja materiałowa zanika w tym punkcie i jest bardzo niewielka w jego otoczeniu. Domieszkując krzemionkę rdzenia światłowodu (zmieniając nieznacznie materiał) możemy przesuwać położenie tego punktu w funkcji długości fali. Zazwyczaj czynimy to w kierunku dłuższych fal, gdzie występuje minimum tłumienia światłowodów wysoko-krzemionkowych. Zjawisko to występuje zarówno w światłowodzie wielomodowym jak i jednomodowym. W światłowodzie jednomodowym może być dominujące, podczas gdy w światłowodzie wielomodowym dominującym efektem jest dyspersja modowa.



Rys. 5.5. Schematycznie narysowany rozkład energii modu podstawowego w światłowodzie jednomodowym dla dwóch długości fali. Zmiana rozkładu pola w funkcji długości fali jest przyczyną dyspersji falowodowej – czyli różnej prędkości rozprzestrzeniania się tego samego modu. Dokładna znajomość tego rozkładu pozwala określić większość parametrów propagacyjnych włókna. Trudności związane z dokładnym określeniem kształtu tego pola teoretycznie i pomiarowo zmuszają do przyjmowania wielu uproszczeń i parametrów zastępujących cały rozkład pola jedną liczbą.

Pojedvnczy mod, w obu typach światłowodów podlega samoistnej dyspersji wewnetrznej. Nazywamy ta dyspersję falowodowa. W światłowodzie wielomodowym jest do pominiecia. W światłowodzie jednomodowym dyspersja falowodowa D_f sumuje się z dyspersją materiałową D_m i sume ta nazywamy historycznie dyspersją chromatyczną $D_{ch}=D_m+D_f$. Dyspersją falowodowa, zależna od szerokości spektralnej źródła pobudzającego światłowód i wewnętrznej struktury refrakcyjnej światłowodu (profilu refrakcyjnego) powodowana jest przez to, że fala o różnej długości posiada inny rozkład poprzeczny pola (mówimy o innej efektywnej średnicy pola modowego) a więc w mniejszym lub większym stopniu wnika w płaszcz włókna. Fala taka podczas propagacji doznaje po drodze wzdłuż światłowodu innej wartości efektywnego grupowego współczynnika załamania, a więc dla różnych części swojego widma rozprzestrzenia się z nieco różnymi prędkościami. Im dłuższa jest fala tym bardziej pole modu podstawowego rozszerza się w głąb płaszcza i widzi efektywnie mniejszy współczynnik załamania, chyba że struktura płaszcza jest złożona i oprócz obniżenia występują także lokalne wzrosty wartości n(r). W uproszczeniu można powiedzieć, że dyspersja falowodowa związana jest z funkcją $\Delta = \Delta(\lambda)$. Taką funkcję można kształtować technologicznie poprzez dobór odpowiednich materiałów na rdzeń i płaszcz a w szczególności ich właściwości dyspersyjnych. Dyspersja falowodowa może mieć znak ujemny i różny kształt przebiegu, np. wielomianowy, w zakresie pracy jednomodowego światłowodu krzemionkowego, tak więc wypadkowa dyspersja chromatyczna może osiągać wartość zero dla dłuższych fal lub zerować się w kilku punktach w długofalowym paśmie transmisji. Średniokwadratowe rozszerzenie impulsu wynosi $\delta t = D_{ch} \delta \lambda L$ i dla typowych danych $\delta \lambda = 1$ nm (wąskopasmowa dioda laserowa), D_{ch}=5ps/nm km (światłowód skompensowany dyspersyjnie) jest równa pojedynczym ps/km. W obszarze skompensowanej dyspersji w pobliżu jej wartości zerowych definiuje się także parametr (lub kilka, jeśli jest kilka zerowych wartości dyspersji chromatycznej w obszarze kompensacji) nachylenia dyspersji $D'(\lambda)[ps/nm^2 km]$. Przyjmując

ponownie uproszczenie w postaci gaussowskiej charakterystyki spektralnej źródła można obliczyć pasmo światłowodu jednomodowego jako B=0,375/δt.



Rys. 5.6. *Mierzone składowe dyspersji w światłowodzie jednomodowym;* $M_o(1)$ – *dyspersja materiałowa,* M(3) – *dyspersja chromatyczna,* $M_1(2)$ – *dyspersja falowodowa*

Pomiaru dyspersji chromatycznej światłowodu dokonujemy stosując przestrajane źródło światła lub kilka źródeł o znanych długościach fali. Najczęściej używane jest przestrajane źródło Nd:YAG pracujące w trybie rozpraszania Ramana w wysoko domieszkowanym jednomodowym światłowodzie nieliniowym. Pomiarowa długość fali wybierana jest przy pomocy monochromatora. Światło monochromatyczne ze światłowodu ramanowskiego sprzęgane jest do światłowodu mierzonego. W odbiorniku optycznym, np. na oscyloskopie, mierzone jest bezwzględne opóźnienie grupowe t_g dla światłowodu o długości L. Dokonując pomiaru dla wielu długości fal otrzymuje się





Rys. 5.7. *Charakterystyka* $B(\lambda)$ *światłowodu jednomodowego w zależności od szerokości spektralnej źródła światła.*



Rys. 5.8. a) Opóźnienie grupowe w światłowodzie jednomodowym w funkcji długości fali, Charakterystyka $t_g(\lambda)$: b) Typowy przebieg zmierzonej charakterystyki dyspersji chromatycznej $D_{ch}(\lambda)$

Schemat układu pomiarowego dyspersji z wykorzystaniem techniki pomiaru opóźnienia impulsu przy pomocy stymulowanego promieniowania Ramana ze światłowodu domieszkowanego GeO₂ przedstawiono na rys.5.9. Impulsy sub-nanosekundowe są otrzymywane ze światłowodu jednomodowego o długości 1km w którym dochodzi do stymulowanej emisji sekwencyjnej Ramana wysokiego rzędu. Światłowód jest pobudzany impulsami z lasera YAG ($\lambda = 1,06\mu$ m) z przełączaną dobrocią. Spektrum generowane w światłowodzie (przedstawiono na rys.5.10.) przechodzi przez monochromator i moc optyczna pobudza światłowód pomiarowy. Opóźnienie impulsu jest mierzone praktycznie jako różnica czasu pomiędzy impulsem transmitowanym przez światłowód i bezpośrednio. Charakterystyki opóźnienia dopasowuje się do danych pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów. Charakterystyki dyspersji są otrzymywane poprzez różniczkowanie charakterystyk opóźnienia względem długości fali.



Rys. 5.9. Schemat blokowy zestawu do pomiaru dyspersji światłowodów jednomodowych z zastosowaniem światłowodowego źródła Ramana.



*Rys. 5.10. Widmo stymulowanego rozproszenia Ramana generowane w jednomodowym światłowodzie ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO*₂.

Dyspersja w światłowodzie jednomodowym jest sumą składnika materiałowego i strukturalnego. W konwencjonalnym światłowodzie o zerowej dyspersji w paśmie 1,3µm posiada dyspersję residualną ok. 20ps/km*nm dla λ =1,5µm, gdzie straty są minimalne. Istnieją dwie zasadnicze metody przesuwania charakterystyki dyspersyjnej. Jedna polega na zmianie różnicy współczynników załamania (parametr Δ) oraz wymiaru rdzenia. Druga polega na zastosowaniu innej struktury światłowodu jak np. z podwójnym płaszczem, poczwórnym płaszczem, trójkątnym profilem refrakcyjnym.

Dyspersja falowodowa σ może być przesunięta w kierunku dłuższych fal poprzez wzrost wartości współczynnika załamania. Dyspersja w światłowodzie jednomodowym może być przedstawiona jako:

$$\sigma = -\frac{\lambda}{c} \left[\frac{1}{2} \left\{b + (1+v)\frac{db}{dv}\right\} \frac{d^2n}{d\lambda^2} + \left(1 - \frac{1}{2} \left\{b + (1+v)\frac{db}{dv}\right\}\right) \frac{d^2n}{d\lambda^2}\right]_{, (5.2)}$$

gdzie: a – średnica rdzenia, $b = (\beta^2 / k^2 - n) / (n_1^2 - n_2^2)$ - znormalizowana stała propagacji, $v = (2\pi a / \lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ - częstotliwość znormalizowana, n₁ – współczynnik załamania rdzenia, n₂ – współczynnik załamania płaszcza, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ - względna różnica współczynników załamania, β - stała propagacji, k= $2\pi/\lambda$ – liczba falowa, c – prędkość światła w próżni. Pierwszy czynnik jest dyspersją materiałową, drugi falowodową. Dyspersja materiałowa w interesujących na s tutaj rozwiązaniach praktycznych niewiele zależy od jakości i ilości domieszki. Dyspersja falowodowa silnie zależy od struktury falowodu (parametry Δ i a). Na rysunkach 5.11., 5.12., 5.13., i 5.14. przedstawiono zmierzone przykładowe charakterystyki dyspersji dla kilku klas światłowodów jednomodowych o różnych profilach i różnych wymiarach rdzenia.



Rys. 5.11. Dyspersja w światłowodzie o małym rozmiarze rdzenia i skokowym profilu refrakcyjnym. $\Delta = 0,7\%, 2a = 4,4 \mu m, długość fali dyspersji zerowej przesunięta z 1,3 na 1,55 \mu m.$



Rys. 5.12. Zmierzone charakterystyki dyspersji dla różnych światłowodów jednomodowych.

	Δ [%]	a [µm]	Długość fali odcięcia [µm]
<i>a</i> .	0,20	10,2	1,04
<i>b</i> .	0,74	5,1	1,03
С.	0,74	4,8	1,05



Rys. 5.13. Charakterystyki dyspersji światłowodu o profilu typu W.



Rys. 5.14. Charakterystyki dyspersji światłowodu z podwójnym płaszczem o przedstawionym profilu refrakcyjnym i obrazie w polu interferencyjnym prążkowym.

5.4. Pomiary Pasma Światłowodu w Funkcji Fluktuacji Profilu Współczynnika Załamania

Fluktuacje refrakcyjne powodują degradację pasma transmisyjnego światłowodu. Marcuse pokazał [18], że sinusoidalne fluktuacje profilu refrakcyjnego nałożone na idealny rozkład potęgowy znacznie redukują pasmo światłowodu wielomodowego. Odwrócenie fazy fluktuacji na osi światłowodu powoduje z kolei znaczną redukcję dyspersji międzymodowej. Na rysunku 5.15. przedstawiono efekt degradacji pasma spowodowany poprzecznymi fluktuacjami refrakcyjnymi jako funkcję liczby fluktuacji.



Rys. 5.15. Zmierzone pasmo światłowodów o sinusoidalnych, wyłącznie radialnych fluktuacjach współczynnika załamania (krzywe kropkowane), o obu rodzajach fluktuacji radialnej i wzdłużnej (linie ciągłe). Krzywe przerywane pokazują pasmo tego światłowodu bez fluktuacji refrakcyjnych.

5.5. Pomiary Stopy Błędów Transmisji w Systemie Światłowodowym

Wykorzystując optymalizowane światłowody jednomodowe dla celów transmisji szerokopasmowej przeprowadza się eksperymenty transmisyjne pokazujące ograniczenia w przestrzeni długości światłowodu i pasma. Obecnie można przeprowadzać eksperymenty z kilkuset kilometrowymi odcinkami światłowodu w którym transmitowany jest sygnał modulowany impulsowo o przepływności bitowej rzędu dziesiątków (i więcej) Gbit/s. Podstawową charakterystyką oceny jakości transmisji jest charakterystyka stopy błędów. Uwzględnia ona wszystkie elementy toru światłowodowego i systemu transmisji. Ze strony włókna światłowodowego wkład w tą charakterystykę posiada dyspersja, poprzez powodowanie rozmycia impulsów dla odpowiednio szerokich pasm pomiaru. Charakterystyki stopy błędów (BER) mierzy się w specjalizowanych układach standaryzowanych do zastosowań telekomunikacyjnych. Przykładową charakterystykę BER przedstawiono na rys. 5.16.



Rys. 5.16. Przykładowa zmierzona charakterystyka stopy błędów transmisji w jednomodowym systemie światłowodowym. Dane światłowodu i systemu: $\lambda = 1,55 \mu m$, długość światłowodu l=200 km, szybkość transmisji 1Gbit/s, średnie straty światłowodu 0,16dB/km dla 1,55 μm , $BER < 10^{-11}$, poziom odbieranej mocy optycznej -40 dBm.

6. POMIARY MODOWEJ DYSPERSJI POLARYZACYJNEJ

Modowa dyspersja polaryzacyjna (MDP) jest miarą zależności czasu przejścia modulowanej fali światła od stanu polaryzacji tej fali. Zależy ona od samego włókna ale także od czynników zewnętrznych takich jak naprężenie, zgięcia i temperatura. W światłowodzie w którym mody są silnie sprzężone, np. stosunkowo długie odcinki włókna, modowa dyspersja polaryzacyjna jest efektem statystycznym, ponieważ zależy od szczegółów dwójłomności i wzajemnym sprzęganiu wzdłuż całej długości włókna. Z powodu tej statystycznej natury modowa dyspersja polaryzacyjna jest mierzona z ograniczoną dokładnością. Prowadzone są badania nad tymi ograniczeniami. Jedna ze stosowanych technik pomiarowych nazywa się metodą matrycy Jonesa. Spolaryzowane światło z przestrajanego lasera pobudza mierzony światłowód (lub badany element światłowodowy) i mierzony jest stan polaryzacji światła wyjściowego w funkcji długości fali. Ze zmian stanu polaryzacji obliczana jest wartość MDP. Obecnie mierzy się MDP w zakresie 5fs - 10ps. W światłowodzie nisko-modowym silnie sprzężonym np. typu dwójłomnego (HB), gdzie ograniczenie statystyczne jest najsilniejsze, MDP jest mierzona z dokładnością rzędu 2% tj. MDP>300fs. Do pomiarów wykorzystuje się także standaryzowane artefakty kalibracyjne w laboratoryjnym włóknie odniesienia. Takie włókna można kupić w niektórych laboratoriach wzorcowych. Celem wprowadzania artefaktu jest inicjacja w standaryzowany sposób silnego mieszania modów i przez to symulacja rzeczywistego światłowodu.

7. POMIARY DŁUGOŚCI FALI ODCIĘCIA

W zależności od długości fali w światłowodzie, przeznaczonym do pracy jednomodowej, może być prowadzony jeden lub wiele modów. Istotna jest znajomość długości fali λ_c dla której (powyżej której) światłowód prowadzi tylko mod podstawowy LP₀₁. Dla fali nieco krótszej od λ_c w światłowodzie pojawia się mod LP₁₁. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru długości fali odcięcia jest sposób polegający na wygięciu światłowodu. Dokonywany jest pomiar spektralny mocy prowadzonej w krótkim odcinku włókna całkowicie prostego. Następnie włókno jest zwijane na standaryzowanym wałku o średnicy np. 3cm tworząc jednokrotną pętlę. Mierzone są straty wynikłe zgięcia w funkcji długości fali. Charakterystyka strat zgięciowych posiada kilka, ze charakterystycznych dla danego światłowodu, maksimów o wzrastającym nachyleniu w kierunku dłuższych fal. Te krawędzie znaczą odcięcie kolejnych modów najniższego rzędu. Za długość fali odcięcia λ_c modu LP₁₁ przyjmuje się miejsce na charakterystyce pomiarowej, gdzie krzywa opadająca maksimum tłumienia zgięciowego o najdłuższej fali przecina poziom tłumienia 0,1dB. Długość fali odcięcia jest charakterystyczną wielkością dla danego światłowodu ale zależy także od długości włókna. Dla krótszych odcinków włókna długość fali odcięcia jest większa. Te różnice moga być znaczne, i przekraczać nawet 100 nm, w tym samym światłowodzie, szczególnie dla stosunkowo krótkich odcinków, rzędu kilku milimetrów.

Pomiarów długości fali odcięcia dokonuje się w układzie dla pomiaru tłumienia spektralnego.



Rys. 7.1. Charakterystyka pomiarowa długości fali odcięcia metodą zgięciową.

8. POMIARY ŚREDNICY POLA MODOWEGO

Rozkład mocy optycznej w przekroju poprzecznym światłowodu jednomodowego, w funkcji długości fali lub częstotliwości znormalizowanej V= $2\pi a NA/\lambda$, jest jedną z jego najważniejszych charakterystyk niezbędną dla oceny warunków pobudzania włókna, propagacji a szczególnie strat zgięciowych, mikro-zgięciowych i złączowych a także długości fali odcięcia i dyspersji falowodowej. Rozkład mocy określa w pełni jedynie ujęcie funkcyjne, gdzie pomiar dokonywany jest metodą skanowania pola dalekiego. Dla uproszczenia definiuje się średnicę lub promień w_o pola modowego jako 1/e maksymalnej wartości amplitudy pola na osi włókna. Definicji lepiej oddających rzeczywistą wagę średnicy pola modu jest w literaturze wiele np. tzw. II definicja Petermana będąca ważoną średnią kątowego rozkładu natężenia pola E modu podstawowego:

$$w_o = 2\sqrt{2} \left[\int Er dr \, / \int (E')^2 r dr \right]^{1/2} \tag{8.1}$$

Funkcja $w_o=w_o(\lambda)$ wzrasta ze wzrostem λ . Stosunek promienia modu do promienia rdzenia w_o/a można przedstawić jako funkcję V. W tym zakresie przyjmuje się szereg przybliżeń inżynierskich pozwalających szybko ocenić ten parametr dla różnych światłowodów. Na przykład, zakładając profil refrakcyjny skokowy i wartość 1,6<V<2,6 (lub 1,2< λ <1,8 μ m), obowiązuje proste przybliżenie $w_o\approx$ 2,6a/V. Podobne przybliżenia oblicza się dla innych typowych profili refrakcyjnych światłowodów jednomodowych.

8.1. Metoda Rozsunięcia Poprzecznego Światłowodów

Istnieje wiele różnych metod pomiaru promienia pola modu. Metoda rozsunięcia poprzecznego stosowana jest w warunkach laboratoryjnych. Zestaw pomiarowy jest identyczny jak do pomiaru charakterystyki spektralnej tłumienia optycznego. Mierzony jest krótki odcinek światłowodu np. 2m propagujący mod podstawowy z usuniętymi modami płaszczowymi. W połowie długości światłowód jest przełamywany. Przełamane powierzchnie powinny mieć jakość optyczną. Oba końce umieszczane są w mikro-pozycjonometrze. Separacja wzdłużna końców powinna być jak najmniejsza, mniejsza niż średnica rdzenia. Mierzona jest transmisja światła w funkcji rozsunięcia poprzecznego rdzeni. Spadek mocy do wartości 1/e daje wartość r=w_o. Pomiar funkcji w_o(λ) pozwala na określenie w alternatywny sposób wartości $\lambda_c=2\pi aNA/V_c$, gdzie V_c=2,405 dla światłowodu skokowego, oraz V_c=3,4 dla światłowodu parabolicznego. Krzywa w_o(λ) wykazuje spadek o dużym nachyleniu w miejscu odcięcia λ_c modu LP₁₁.



Rys. 8.1. a) Układ geometryczny do obliczenia całki pokrycia w metodzie przesunięcia poprzecznego; b) System pomiarowy metody przesunięcia poprzecznego



Rys. 8.2. Rozkład mocy w przekroju poprzecznym światłowodu jednomodowego i określenie średnicy pola modu metodą przesunięcia poprzecznego



Rys. 8.3. Funkcja $w_o(\lambda)$. Spektralna zależność średnicy pola modowego. Służy ona do określenia długości fali odcięcia modowego.

Gdy dwa jednomodowe światłowody są połączone na styk, mod podstawowy światłowodu źródłowego pobudza mod podstawowy, stratne mody płaszczowe i mody radiacyjne w światłowodzie odbiorczym. Wielkość mocy z modu nadawczego transferowana do poszczególnych modów jest zdeterminowana przez całkę pokrycia dwóch modowych pól elektrycznych. W metodzie przesunięcia poprzecznego analizuje się transfer mocy optycznej z modu źródłowego do identycznego modu odbiorczego identycznego światłowodu o równolegle przesuniętych osiach długich. Moc sprzężona jest kwadratem całki pokrycia pól. Całka pokrycia jest wyrażona jako [7]:

$$C(u) = \iint_{S} E(|\vec{r}|)E(|\vec{r}-\vec{u}|)d\vec{r}, \qquad (8.2)$$

gdzie u= $|\mathbf{u}|$ jest separacją osi włókien. Całkowanie obejmuje cały obszar S przekroju połączenia światłowodów. Całka pokrycia może być wyrażona jako konwolucja we współrzędnych biegunowych:

$$C(u) = \int_{0}^{2\pi\infty} E(r)E(r')rdrd\Theta = [E(r) * E(r)]_{r=a}$$
(8.3)

gdzie: $r^2 = u^2 + r^2 - 2rucos(\phi)$, r' = |r'|, r = |r|, oraz * reprezentuje dwu wymiarową konwolucję. Transformacja Hankela konwolucji daje rozkład natężenia pola dalekiego włókna:

$$H\{C(u)\} = H\{E(r) * E(r)\} = F^{2}(p), \qquad (8.4)$$

Gdzie $F^2(p)$ jest dalekim rozkładem mocy światłowodu. Poprzez ostatnie równanie zmierzona funkcja transferu mocy dla rozstrajanego poprzecznie sprzężenia $C^2(u)$ może być związana z polem bliskim modu podstawowego poprzez rozkład pola dalekiego. Rozkład pola bliskiego może być wykorzystany do dokładnego obliczenia średnicy modu oraz powierzchni efektywnej.

System pomiarowy metody przesunięcia poprzecznego przedstawiono na rys.8.1. Próbka światłowodu posiada dokładnie przygotowane powierzchnie optyczne. Jakość powierzchni powinna być sprawdzona interferometrycznie w celu wyeliminowania skośności przełomu. Skośność nie powinna być większa niż 0,5° w stosunku do osi światłowodu. Próbki światłowodów są umocowywane np. mocowaniami próżniowymi naprzeciwko siebie na stoliku x-y-z. Sygnał detekowany jest maksymalizowany. Powierzchnie czołowe są maksymalnie zbliżane do siebie jednak bez dotyku. Poprzeczne rozstrojenie złącza jest uzyskiwane przy pomocy aktuatorów piezoelektrycznych, połączonych z umocowaniem światłowodów.

Pozycja włókna skanującego jest monitorowana interferometrycznie. Przesuw jest automatyczny poprzez zastosowanie wzmacniacza fazoczułego do napędu elementów piezoelektrycznych, odczytu sygnału z interferometru i detekcji mocy przechodzącej. Zestaw piezo posiada drogę przesuwu rzędu kilkunastu µm, więc konieczne jest wykonanie co najmniej dwóch skanów aby uzyskać całkowitą krzywą transmisji mocy. Na rys.8.2. przedstawiono przykładowe krzywe pomiarowe uzyskane tą metodą pomiarową.

9. POMIARY ROZKŁADU POLA BLISKIEGO

Rozkład pola bliskiego jest definiowany jako funkcjonalna zależność gęstości mocy optycznej na przekroju poprzecznym płaskiego zakończenia światłowodu. W światłowodzie wielomodowym wskutek zjawiska mieszania modów i występowania stacjonarnego rozkładu pola, rozkład pola bliskiego jest równoważny profilowi refrakcyjnemu. Pomiar profilu refrakcyjnego dokonywany jest w układzie ze źródłem światła białego, wypełniana jest cała apertura numeryczna światłowodu w krótkim odcinku aby pobudzić wszystkie mody. Mody płaszczowe muszą być usunięte za pomocą filtra modowego. Błędy pomiarowe związane są w tej metodzie z obecnością niskostratnych modów upływowych w krótkim odcinku światłowodu i trudnością z ich odseparowaniem od modów prowadzonych najwyższego rzędu.

9.1. Metoda Pola Bliskiego Transmitowanego

Wolne zakończenie światłowodu o jakości optycznej jest obserwowane pod mikroskopem. Mierzona jest funkcja natężenia oświetlenia I(r) w przekroju poprzecznym światłowodu, najczęściej w postaci znormalizowanej do natężenia maksymalnego $I_n(r)$.



Rys. 9.1.Ogólna zasada pomiaru rozkładu pola bliskiego w światłowodzie, podstawowy zestaw aparaturowy, przykładowy wynik pomiaru.

Miernictwo światłowodowe



Rys. 9.2. Schemat blokowy konfokalnego zestawu pomiarowego do skanowania pola bliskiego światłowodu jednomodowego.



Rys. 9.3. Przykładowy wynik pomiaru. Rozkład pola bliskiego dla pola gaussowskiego (linia ciągła) i nie-gaussowskiego (linia przerywana).

Do pomiaru pola bliskiego stosowany jest konfokalny system pomiarowy. Zaletą metody skanowania rozkładu bliskiego pola natężenia światłowodu jest, że wynik pomiaru nie wymaga obróbki sygnałowej czy przekształceń matematycznych. Jeśli rozkład natężenia w polu aperturowym $|E(r)|^2$ otrzymano w wyniku pomiaru to zarówno średnicę pola modowego jak i powierzchnię efektywną otrzymuje się bezpośrednio z prostych zależności całkowych, podanych w rozdziałach poświęconych tym parametrom. Podstawową trudnością pomiaru pola bliskiego są jego niewielkie rozmiary – typowo 5 –10 µm średnicy. W konsekwencji zastosowany układ optyczny musi powiększyć to pole bliskie, tak aby mogło być skanowane radialnie przy pomocy detektora z aperturą otworkową lub detektora z wejściem światłowodowym. Zastosowany układ optyczny nie może wprowadzać zniekształceń pola. Układ optyczny powinien w szczególności mieć dużą aperturę numeryczną aby nie pomijać żadnych składowych kątowych pola promieniowania. To staje się istotnym problemem technicznym specjalnie dla światłowodów o bardzo małych rdzeniach, ponieważ pole podlega dywergencji znacznie szybciej na zewnątrz włókna.

Układ pomiarowy do skanowania pola bliskiego światłowodu przedstawiono schematycznie na rysunku 9.2. Prąd z fotodiody jest proporcjonalny do mocy optycznej akceptowanej przez wejściowy światłowód. Podlega on liniowej konwersji na napięcie, które jest nadal proporcjonalne do mocy optycznej, a więc do natężenia pola bliskiego. System pomiarowy gromadzi dane o napięciu. Skanowanie jest przeprowadzane przez przesuwanie testowanego światłowodu przy pomocy stolika napędzanego silnikiem krokowym, oraz mierzenie metodą interferometryczną pozycji światłowodu. Zaletą takiej techniki, nad systemem z poruszanym fotodetektorem, jest że nie trzeba określać powiększenia optycznego układu obrazowania.

Początkowe pozycjonowanie włókna optycznego odbywa się z zastosowaniem systemu konfokalnego. Dzielnik wiązki, znajdujący się za obiektywem obserwującym powierzchnię światłowodu, tworzy dwie identyczne drogi optyczne. Fotodetektor z aperturą otworkową (lub wejściem światłowodowym jest w identycznej odległości jak płaszczyzna wejściowa konfokalnego światłowodu jednomodowego od ognisk dokładnie jednakowych obiektywów znajdujących się za lustrem światłodzielącym. Badany światłowód może być pozycjonowany precyzyjnie w punkcie ogniskowym obiektywu poprzez przełączenie źródła laserowego w celu pobudzenie światłowodu konfokalnego. Poprzez pomiar i maksymalizację mocy optycznej pobudzającej światłowód pomiarowy w przeciwnym kierunku, włókno to może być optymalnie pozycjonowane.

Przykładowe wyniki pomiaru w takim systemie konfokalnym pokazano na rys.9.3.

Przy pomocy pomiaru rozkładu pola bliskiego można określić profil refrakcyjny światłowodu n(r) oraz wymiary geometryczne jak średnicę rdzenia d^r, koncentryczność rdzenia κ , eliptyczność rdzenia e^r, inne zniekształcenia geometryczne rdzenia i całego włókna, średnicę płaszcza d^p, eliptyczność włókna e^f, itp. Parametry te definiuje się następująco i zgodnie z danymi pomiarowymi przedstawionymi schematycznie na rys: 6.2. d^r=(d^r_{max}+d^r_{min})/2, d^p=(d^p_{max}+d^p_{min})/2, e^r=[(d^r_{max}-d^r_{min})/d^r_o]100%, e^f=[(d^f_{max}-d^f_{min})/d^p_o]100%, κ =(x/d^r)100%. Rozrzut statystyczny wymiarów geometrycznych światłowodu określa się przy pomocy metody pomiaru pierścieni tolerancji wymiarów rdzenia i płaszcza.

9.2. Metoda Pola Bliskiego Załamanego

Dualną metodą pomiaru profilu refrakcyjnego przy pomocy pola bliskiego prowadzonego jest metoda pola bliskiego załamanego. W odróżnieniu od poprzedniej pomiarowi podlega całe pole nie akceptowane przez światłowód w czasie jego pobudzania. Metoda ta wolna jest od zniekształceń wprowadzanych przez mody upływowe nisko-stratne. Jeśli dokładnie znany jest współczynnik załamania którejś z warstw światłowodu np. płaszcz zewnętrzny, gdyż w wielu rozwiązaniach jest on wykonywany z ultra-czystej, nie-domieszkowanej krzemionki, to metoda bliskiego pola załamanego pozwala na określenie bezwzględnej wartości profilu refrakcyjnego światłowodu z bardzo dużą dokładnością. W trakcie pomiaru skupiona plamka światła laserowego skanuje powierzchnię wejściową zakończenia światłowodu umieszczonego w środowisku immersyjnym. W pewnych warunkach zmiany natężenia pola refrakcyjnego przechodzącego przez blokującą aperturę są liniowo związane ze współczynnikiem załamania.



Rys. 9.4. Zasada metody pola bliskiego załamanego pomiaru światłowodów.



Rys. 9.5. Przykład pomiaru wielowarstwowego profilu refrakcyjnego światłowodu jednomodowego metodą pola bliskiego załamanego.

Podstawową trudnością związaną z pomiarem pola bliskiego w światłowodzie jednomodowym jest jego niewielki wymiar wynoszący 5 - 10µm. Wysoko-aperturowy system optyczny musi dokonać dostatecznego niezniekształconego powiększenia pola aby umożliwić jego radialne skanowanie przy pomocy detektora światłowodowego. Trudności ulegają zwiększeniu przy badaniu światłowodów o niewielkiej średnicy rdzenia (np. włókna z przesuniętą dyspersją) w których pole podlega silniejszej dyfrakcji. Zaletą pomiaru rozkładu natężenia pola bliskiego I(r) w światłowodzie jednomodowym jest to, że wynik nie wymaga żadnych przekształceń w celu otrzymania bezpośrednio wartości średnicy pola modu w_o czy powierzchni efektywnej A_{eff} .

Na rysunku 9.6. przedstawiono schemat funkcjonalny stanowiska pomiarowego do zdejmowania profilu refrakcyjnego i parametrów geometrycznych światłowodów metodą transmisyjną pola bliskiego. Stanowisko to pracuje w ramach Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW [20].



Rys. 9.6. Schemat funkcjonalny stanowiska do pomiaru profilu refrakcyjnego i parametrów geometrycznych światłowodów metodą transmisyjną pola bliskiego. Na rysunku nie umieszczono oświetlacza dolnego. Stanowisko pracuje jako część Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW.

Koniec badanego krótkiego odcinka światłowodu zamocowany jest w precyzyjnym stoliku x-yz. Długość odcinka światłowodu wynosi 1 – 2 m przy pomiarze profilu oraz kilka cm przy pomiarze parametrów geometrycznych [20]. Do obserwacji używany jest mikroskop Biolar PZO. Promieniowanie żarówki halogenowej dużej mocy pada na płaszczyznę wejściową światłowodu. Płaszczyzna wejściowa posiada jakość optyczną poprzez dokonanie odpowiedniego przełomu. Przy pomiarze profilu refrakcyjnego promieniowanie z żarówki jest skupiane na powierzchni czołowej światłowodu przy pomocy obiektywu kamerowego o dużej aperturze numerycznej NA_{obj}=0,35. Podczas pomiaru wymiarów światłowodu używany jest dolny oświetlacz mikroskopu. Górny oświetlacz mikroskopu jest stosowany w celu poprawienia widzialności płaszcza przy pomiarach geometrii włókna optycznego.

Obraz powiększony przez obiektyw mikroskopowy (x40/0,66 NA lub x100/0,87 NA) oraz okular (x1,5) pada na przetwornik obrazu CCD w kamerze TV. Macierz CCD posiada rozdzielczość 500x582 pikseli. Obraz obserwowany jest na monitorze. Sygnał wizyjny zespolony

jest przetwarzany przez kartę przetwornika wewnątrz PC. Stanowisko sterowane jest graficznym interfejsem użytkownika o szerokich możliwościach zarządzania pracą systemu, akwizycji danych, obróbki informacji obrazowej. Szczegółowy opis procedury pomiarowej znajduje się w [20]. Na przykład do analizy profilu refrakcyjnego służy opcja pozwalająca wyświetlić funkcje jasności dla zadanych linii przekroju światłowodu w skali rzeczywistej. Istnieje możliwość przetwarzania tych funkcji. Przyjmując różne położenia przekrojów, określane są parametry technologicznego obniżenia refrakcyjnego na osi światłowodu. Uzyskane profile można poddać analizie funkcjonalnej. W przypadku pomiaru parametrów geometrycznych określane jest położenie środka rdzenia, parametry płaszcza i pokrycia, stopień eliptyczności.

Metodę transmisyjną pola bliskiego wykorzystano także w Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW do pomiaru profilu refrakcyjnego światłowodów jednomodowych. Profil otrzymywany jest ze związku pomiędzy rozkładem pola bliskiego E(r) i profilem refrakcyjnym n(r) w postaci klasycznego skalarnego równania falowego:

$d^{2}E/dr^{2}+dE/rdr+[k^{2}n^{2}(r)-β^{2}]E(r)=0.$ (9.1)

Krzywą pomiarową wygładza się i aproksymuje metodą średniokwadratową do postaci samej funkcji Gaussa bądź iloczynu funkcji Gaussa i wielomianu z wyrazami nieparzystymi. W światłowodzie jednomodowym do pomiarów należy pobudzić wyłącznie mod podstawowy. Jako źródło stosuje się laser półprzewodnikowy o długości fali nieco większej od warunku odcięcia dla modu drugiego rzędu badanego światłowodu.

10. POMIARY ROZKŁADU POLA DALEKIEGO

Rozkład pola dalekiego światłowodu jest definiowany jako funkcja przestrzenna $I_f(\Theta)$ mocy optycznej promieniowanej z włókna względem kąta Θ mierzonego od jego osi. Różnica w systemie pomiarowym pola bliskiego polega na opuszczeniu mikroskopu obserwującego zakończenie światłowodu. Tutaj cała moc promieniowana jest obserwowana na odległym ekranie a mierzona przez ruchomy detektor na obrotowym kątomierzu lub odpowiednich rozmiarów linijkę (matrycę) detektorów dostatecznie odległych od zakończenia włókna.

10.1. Bezpośrednia Metoda Pola Dalekiego

Praktyczna realizacja metody pomiarowej polega na pobudzeniu krótkiego odcinka światłowodu pomiarowego diodą laserową i zastosowaniu jako odbiornika drugiego odcinka światłowodu sprzężonego z fotodiodą i obracanego po łuku centrowanym na wyjściowym zakończeniu testowanego światłowodu w odległości ok. 1 –2 cm od niego. Typowy wynik pomiaru rozkładu pola dalekiego światłowodu posiada kształt w przybliżeniu krzywej Gaussa. Z tej krzywej można określić np. aperturę numeryczną światłowodu, wielomodowego poprzez dokładny pomiar maksymalnej wartości kąta Θ_{max} . Apertura wynosi NA=sin Θ_{max} . Ponieważ natężenie światła dla maksymalnego kąta Θ jest bardzo małe, więc pomiar wartości kąta jest utrudniony. Stosowane przybliżone określenie wartości kąta bazują np. na przybliżeniu ostatniego fragmentu krzywej styczną do przecięcia z odciętą. Inne przybliżenia przyjmują położenie poziomu 10% mocy jako wartość kąta aperturowego.



Rys. 10.1. System współrzędnych biegunowych stosowany do opisu pól bliskiego i dalekiego światłowodu jednomodowego oraz ich pomiaru. Warunkiem na pole bliskie jest: $R < w^2/\lambda$, czyli pole bliskie rozciąga się tuż przy powierzchni wyjściowej światłowodu w powietrzu. Warunkiem na pole dalekie jest $R > w^2/\lambda$, co w praktyce oznacza co najmniej dwa rzędy wielkości. w – średnica pola modowego.



Rys. 10.2. Ogólna zasada pomiaru rozkładu pola dalekiego światłowodu i przykładowa zmierzona charakterystyka dla światłowodu wielomodowego.



Rys. 10.3. *a) Pomiar rozkładu pola dalekiego w światłowodzie metodą bezpośrednią; b) Przykładowy wynik pomiaru rozkładu pola dalekiego światłowodu jednomodowego.*

Gdy promieniowanie prowadzone w światłowodzie jednomodowym opuszcza jego koniec wychodzi w powietrze. Średnica rdzenia wynosi typowo 5 - 10µm i jest porównywalna z długością fali światła 1,3 – 1,65µm. W tych warunkach fala ulega dyfrakcji i podlega ewolucji od tzw. pola bliskiego do dalekiego. Pole bliskie przyjmujemy jako obszar wewnątrz odległości w^2/λ , gdzie w – jest promieniem pola modowego, od zakończenia światłowodu a pole dalekie jako obszar znacznie odleglejszy od tej granicy. Amplituda promieniowania pola dalekiego jest związana z polem bliskim poprzez całkę dyfrakcyjną:

$$\Psi(R,p) = \mathcal{O}(\Theta) \frac{k}{iR} \exp(ikR) \int_{0}^{\infty} E_{a}(r) J_{o}(rp) r dr , \qquad (10.1)$$

gdzie $E_a(r)$ – amplituda pola bliskiego, k=2 π/λ , J_o(rp) funkcja Bessela zerowego rzędu. Koordynaty R i Θ są współrzędnymi biegunowymi opisującymi punkt obserwacji, jak pokazano na rysunku przedstawiającym ogólną zasadę pomiaru pola dalekiego. Rozkłady pól dalekiego i bliskiego są niezależne od współrzędnej kątowej Φ w światłowodzie sferycznie symetrycznym. Czynnik skośności O(Θ)=cos Θ jest często przyjmowany jako równy jedności, ponieważ kąty obserwacji dla klasycznych światłowodów jednomodowych są niewielkie. Jednakże, dla światłowodów o małych rdzeniach, takich jak włókien z przesuniętą dyspersją, pole dalekie może rozciągać się dla większych kątów. Obserwowana amplituda pola dalekiego jest częścią rzeczywistą rozkładu pola, więc równanie na $\Psi(R, p)$ przybiera postać:

$$F(p) = \mathcal{O}(\Theta) \int_{0}^{\infty} E_{a}(r) J_{o}(rp) r dr = \mathcal{O}(\Theta) HT(E_{a}(r)), \quad (10.2)$$

gdzie HT(E_a(r)) jest transformatą Hankela rozkładu pola bliskiego. Odwrotna transformata Hankela jest:

$$E(r) = \int_{0}^{\infty} \left[\frac{F(p)}{O(\Theta)}\right] J_{o}(rp) dp = HT^{-1} \left[\frac{F(p)}{O(\Theta)}\right]$$
(10.3)

Pole bliskie w praktyce obliczane jest jako odwrotna transformacja Hankela zmierzonego rozkładu natężenia pola dalekiego. Poprzez dwa powyższe równania można związać ze sobą rozkłady pól dalekiego i bliskiego.

Należy zauważyć, że pole bliskie nie jest dokładnie jednoznaczne z polem modowym ponieważ dotyczy ono wolnej przestrzeni poza włóknem a nie wewnątrz włókna optycznego.

10.2. Metoda Pola Dalekiego ze Zmienną Aperturą

s

Stosując alternatywną technikę zmiennej apertury w polu dalekim nie dokonuje się ciągłego pomiaru rozkładu natężenia ale mierzona jest całkowita moc przechodząca przez zestaw kołowych apertur. Apertury są centrowane na oś światłowodu i jednocześnie oś symetrii rozkładu pola dalekiego. Gdy zostanie określona funkcja mocy aperturowych dla wielu apertur, względny rozkład mocy pola dalekiego jest obliczany z jej gradientu.

Bezpośrednia metoda skanowania pola dalekiego mierzy kątowy rozkład natężenia pola dalekiego ze światłowodu jednomodowego, co otrzymujemy w postaci funkcji $|F(p)|^2$. Technika skanowania pola dalekiego ze zmienną aperturą także mierzy moc w polu dalekim, ale zamiast dokonywać ciągłego pomiaru rozkładu natężenia, mierzona jest całkowita moc przechodząca przez ciąg apertur kołowych o zmiennych wymiarach. Zakłada się, że pole dalekie i całe włókno są cylindrycznie symetryczne. Apertury są centrowane na oś symetrii włókna optycznego i jednocześnie jest to oś symetrii obrotowej rozkładu pola dalekiego.





Rys. 10.4. a) Pomiar rozkładu pola dalekiego w światłowodzie metodą zmiennej apertury; b) Zestaw pomiarowy metody zmiennej apertury; c) Przykładowy wynik pomiaru rozkładu pola dalekiego światłowodu metodą zmiennej apertury;

Dla okrągłej apertury o promieniu *r* zlokalizowanej w odległości *D* od zakończenia optycznego światłowodu pół-kąt aperturowy stożka z wierzchołkiem na zakończeniu światłowodu wynosi: $\theta_{apertury} = \arctan(a/D)$. Moc optyczna przechodząca przez aperturę z zakrzywionego frontu falowego centrowanego na zakończenie światłowodu jest:

$$P(v) = 2\pi \int_{0}^{v} F^{2}(p) p dp$$
(10.4)

gdzie: v=k sin ($\theta_{apertury}$). Ponieważ p = k sin(θ), można powyższe równanie przepisać w formie:

$$P(\Theta_{aperturowy}) \cong \int_{0}^{\Theta_{aperturowy}} F^{2}(\Theta) \sin \Theta \cos \Theta d\Theta \cong \int_{0}^{\Theta_{aperturowy}} F^{2}(\Theta) \sin(\Theta) d\Theta .$$
(10.5)

Równania powyższe stanowią podstawę standaryzowanych metod pomiarowych średnicy pola modu i średnicy efektywnej światłowodu. Na rysunku 10.4. przedstawiono geometrię układu apertury, gdzie R – jest odległością pomiędzy zakończeniem światłowodu a krawędzią apertury. Różnica pomiędzy dwiema wersjami przybliżenia w powyższym wzorze jest widoczna na rys. 10.4. Różnica polega na przyjęciu różnej przyrostowej drogi całkowania frontu fazowego w celu otrzymania całkowitej mocy przechodzącej przez aperturę. Druga część równania stosuje długość łuku wzdłuż zakrzywionego frontu falowego, daną przez R $\delta\theta$. Pierwsza część równania stosuje projekcję tej zakrzywionej części na płaszczyznę równoległą do apertury, R $\delta\theta$ cos(θ). Oczywiście dla małych kątów cos(θ) \cong 1 i różnica pomiędzy obiema zależnościami maleje do zera. Doświadczalnie stwierdzono, że ta różnica prowadzi do różnic w obliczonych wartościach średnicy pola modowego typowo mniej niż0,5%, nawet dla światłowodów z przesuniętą dyspersją o małych rdzeniach i najszerszych rozkładach pól dalekich.

Gdy aperturowa funkcja mocy zostanie określona dla szeregu apertur, względny rozkład mocy w polu dalekim może być obliczony z wartości swojego gradientu. Analiza danych jest prowadzona w analogiczny sposób jak dla bezpośredniej metody pola dalekiego, tzn. transformacja do pola bliskiego i obliczanie średnicy pola modu lub średnicy efektywnej z rozkładu pola. Rozkład pola dalekiego jest obliczany z następujących zależności:

$$F^{2}(p) \cong dP(p) / pdp_{\text{lub}} F^{2}(\Theta) \cong dP(\Theta) / \sin(\Theta) d\Theta$$
 (10.6)

w zależności czy funkcja mocy aperturowej pochodzi z pierwszej czy drugiej części dyskutowanego równania.

Podstawowy zestaw aparaturowy metody pola dalekiego ze zmienną aperturą przedstawiono na rys. 10.4. Apertury o różnych średnicach są zazwyczaj zamocowane na obrotowej przesłonie, więc mogą być stosunkowo łatwo zmieniane i moc przechodząca mierzona przez wszystkie po kolei. Rys.10.4. przedstawia również przykładowy wynik pomiaru światłowodu jednomodowego tą metodą.

Jako źródło stosuje się np. lampę halogenową filtrowaną przy pomocy monochromatora o szerokości spektralnej 10 nm. Niepewność określenia długości fali jest rzędu ± 2 nm. Stosowanych jest np. 20 – 30 apertur dających w przybliżeniu zakres zmiany wartości apertur sin $\theta_{aperturowy} = 0,005 - 0,5$.

11. POMIARY PROFILU REFRAKCYJNEGO

Profil refrakcyjny i maksymalna wartość różnicy współczynników załamania są mierzone wieloma metodami. Niektóre omówiono powyżej, np. metodę pola bliskiego załamanego, która jest używana rutynowo. Stosuje się także inne metody, jak np. osiową mikroskopię interferencyjną (nazywaną mikro-interferometrią poprzeczną) a także mikro-interferometrię podłużną. Dla poprzecznej metody pomiaru przygotowywany jest cienki poprzecznie wycięty plasterek włókna o obu powierzchniach dokładnie równoległych i o jakości optycznej. Mierzona jest różnica długości dróg optycznych w obszarze rdzeniowym plasterka np. za pomocą interferencyjnego wzoru prążkowego. Stąd biorą się wymagania na dopuszczalną grubość plasterka aby otrzymać czytelny obraz odkształcenia prążków. Zaletą metody jest prostota pomiaru polegającego na translacji współczynnika załamania na wymiar geometryczny. Wady to trudności w wykonaniu próbki do pomiaru oraz stosunkowo niewielka rozdzielczość przestrzenna.



Rys. 11.1. Podstawowe rodzaje profili refrakcyjnych światłowodów jednomodowych; .pierwsze dwa – bez przesunięcia dyspersji, trzeci, czwarty i piąty – z przesuniętą dyspersją, szósty – ze spłaszczoną dyspersją

11.1. Metody Mikrointerferometrii Poprzecznej i Podłużnej

Mikro-interferometria poprzeczna polega na umieszczenia odcinka światłowodu w odpowiednim środowisku immersyjnym, np. dopasowanym do płaszcza lub innej wewnętrznej struktury refrakcyjnej światłowodu i oświetleniu interferencyjnym polem prążkowym. Przesunięcie prążków, w odpowiednim systemie analizy obrazu prążkowego jest przeliczane na profil refrakcyjny. W metodach mikro-interferometrycznych istotne jest posiadanie absolutnych wzorców współczynników załamania. Wzorce takie są dostarczane albo poprzez środowisko immersyjne albo np. przez wzorcowy, najlepiej wielowarstwowy światłowód o wielo-skokowym profilu refrakcyjnym i dokładnie znanych współczynnikach poszczególnych warstw. Taki światłowód odniesienia można kupić w niektórych fotonicznych laboratoriach metrologicznych.



Rys. 11.2. Schematycznie przedstawione proporcje lokalnych wartości współczynnika załamania w rzeczywistym profilu refrakcyjnym światłowodu jednomodowego w odniesieniu do wartości współczynnika załamania czystego szkła SiO₂.


Rys. 11.3. Fotografie interferencyjnych obrazów mikroskopowych w polu prążkowym poprzecznym i obliczone z nich profile refrakcyjne światłowodów. Zmiana profilu poprzez obróbkę termiczną preformy.



Rys. 11.4. Mikro-interferogram przekroju poprzecznego światłowodu MCVD przedstawiający obecność sinusoidalnych fluktuacji refrakcyjnych.



Miernictwo światłowodowe



Rys. 11.5. Charakterystyki optyczne i geometryczne standardowego światłowodu wielomodowego, sygnałowego, niskowymiarowego do zastosowań w lamiantach. Wyprodukowany w Oddziale Badawczo – Produkcyjnym Światłowodów Huty Szkła Biaglass metodą dwutyglową.Rysunki opisane od góry dołu.

 A) Fotografia mikroskopowa przekroju poprzecznego (przełom lustrzany) przykladowego światłowodu. Pomiar mikroskopowy wymiarów: średnica zewnętrzna światłowodu 100μm, średnica rdzenia 15μm, apertura numeryczna 0,25, profil refrakcyjny skokowy;

- *B)* Znarmalizowane krzywe profili refrakcyjnych dla rodziny analogicznych światłowodów z dyfuzją pojedynczego składnika szkła w szskle wieloskładnikowym krzemionkowym;
- C) Obraz światłowodu z fotografii A) w interferencyjnym polu prążkowym poprzecznym. Kolejne fotografie mikroskopowe, dolna, górna lewa i prawa pokazują proces dopasowywania środowiska immersyjnego, w którym zanurzone jest włókno, do współczynnika załamania płaszcza światłowodu. Refrakcyjna Neutralizacja płaszcza światłowodu jest idealna na fotografii dolnej. Z tej fotografii metodą skanowania i obróbki, poprzez przeliczanie przesunięcuia prążka na wartość n(r) otrzymuje się profil refrakcyjny światłowodu.



Rys. 11.6. Obraz interferencyjny poprzeczny światłowodu o podwójnym płaszczu.



Rys. 11.7. Fotografia interferencyjnego obrazu mikroskopowego w polu jednorodnym w odróżnieniu od pola prążkowego.

11.2. Pomiary Fluktuacji Współczynnika Załamania w Światłowodzie

Wpływ centralnego obniżenia refrakcyjnego i lokalnych fluktuacji współczynnika załamania na pasmo światłowodu był badany teoretycznie i pomiarowo. Włókna światłowodowe MCVD oraz OVD posiadają sinusoidalne fluktuacje współczynnika załamania w kierunku radialnym. Fluktuacje takie nie występują w kierunku wzdłuż osi długiej światłowodu. Włókna VAD posiadają także sinusoidalne fluktuacje wzdłużne. Faza sinusoidalnych fluktuacji refrakcyjnych zmienia się okresowo wzdłuż włókna optycznego. Na rysunku przedstawiono interferogram włókna optycznego MCVD pokazujący fluktuacje refrakcyjne w kierunku radialnym. Fluktuacje powodują degradację pasma transmisyjnego światłowodu. Marcuse pokazał [18], że sinusoidalne fluktuacje profilu refrakcyjnego nałożone na idealny rozkład potęgowy znacznie redukują pasmo światłowodu wielomodowego. Odwrócenie fazy fluktuacji na osi światłowodu powoduje z kolei znaczną redukcję dyspersji międzymodowej. Pokazano także związek pomiędzy fluktuacjami w kierunku radialnym i wzdłużnym.

11.3. Wizualizacja i Pomiary Profilu Refrakcyjnego Metodą Selektywnego Trawienia

Światłowód ze szkła kwarcowego czystego i domieszkowanych może być selektywnie trawiony o HF. Szybkość trawienia zależy od poziomu domieszki. Dobierając odpowiednio parametry procesu jak: stężenie i rodzaj rozpuszczalnika szkła, czas trawienia , temperatura procesu, rodzaj maskowania, itp. można otrzymywać trójwymiarowe wytrawienia w rdzeniu światłowodu odpowiadające profilowi refrakcyjnemu. Analiza obrazu lub bezpośrednie pomiary geometryczne dają profil refrakcyjny. Na fotografiach przedstawiono przykład takich trawionych obrazów przeznaczonych do dalszych pomiarów dla światłowodu wielomodowego i jednomodowego.



Rys. 11.8. Fotografie wytrawionych profili refrakcyjnych światłowodu wielomodowego gradientowego oraz światłowodu jednomodowego.

12. POMIARY WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH

Wymiary geometryczne światłowodu są mierzone w czasie produkcji przy pomocy laserowego średnicomierza umieszczonego na wieży wyciągowej. Potem mogą być mierzone np. opisaną metodą pola bliskiego. Standardową metodą pomiaru jest zastosowanie mikroskopowego systemu video, z kamerą CCD o dużej rozdzielczości współpracującego z komputerowym systemem akwizycji i obróbki obrazów. W systemie można porównywać obraz mierzony z wzorcowym, wyodrębniać charakterystyczne szczegóły np. krawędzie itp. Dokładności uzyskiwane w takich systemach pomiarowych są bardzo duże.



Rys. 12.1. Określanie i pomiar koncentryczności, niekołowości i rozrzutu parametrów geometrycznych światłowodu.

Tabela. Standardy wymiarowe światłowodów jednomodowych

Parametr standaryzowany	Wartość nominalna [µm]
Średnica pola modu w dla 1300nm	10
Tolerancja w	±1
Średnica płaszcza D	125
Tolerancja D	± 3
Średnica pokrycia zewnętrznego	Ciąg standardowych wartości 250, 500, 1000
Średnica pola modu dla 1550nm	

Tabela. Standardy wymiarowe światłowodów wielomodowych

Parametr standaryzowany	Wartość nominalna [µm]
Średnica rdzenia D _r	50, także 62,5
Tolerancja D _r	± 3
Tolerancja cylindryczności płaszcza	<3
Średnica płaszcza D _p	125
Tolerancja D _p	± 3
Tolerancja cylindryczności płaszcza	<2,5
Dopuszczalna tolerancja nieosiowości rdzenia w	<3
płaszczu	
Średnica pokrycia zewnętrznego	250, 500, 1000

13. POMIARY WYTRZYMAŁOŚCI MECHANICZNEJ

Wzdłuż, nawet poprawnie wykonanego światłowodu, można znaleźć słabsze punkty pod względem mechanicznym. Wynika to z amorficznej struktury szkła spowodowanej niejednorodnością lokalną gęstości materiału czy zaburzeniem powierzchni. Tego typu zaburzenia mogą być opisane w sposób statystyczny, więc wytrzymałość światłowodu można przewidzieć jedynie do pewnego poziomu prawdopodobieństwa. Wytrzymałość danego odcinka włókna zależy od najsłabszego punktu wzdłuż jego długości. W którym istnieje mikro-szczelina. Ponieważ mikro-szczelina może propagować, zgodnie z prawem Hooka σ =E ϵ i teorią Griffitha σ^2 =2 γ E/ π a, gdzie σ -naprężenie światłowodu, E – moduł Younga, γ - energia powierzchniowa, a – wymiar mikro-szczeliny to wytrzymałość światłowodu jest ogólnie procesem niestacjonarnym. Stała wiązania w czystym szkle krzemionkowym wynosi o,16nm, więc graniczna wytrzymałość światłowodu jest 18Gpa. W praktyce, obecnie dla najlepszych włókien otrzymuje się 6GPa, co odpowiada mikro-szczelinie o wymiarze nieco poniżej 1nm [4].



Rys. 13.1. Wielkość szczeliny Griffitha we włóknach światłowodowych

Do opisu prawdopodobieństwa F zerwania (zniszczenia) włókna optycznego o długości L, przy naprężeniu σ w czasie t stosowany jest rozkład prawdopodobieństwa Weibulla:

$$F(l, \sigma, t) = 1 - exp \left\{ (l/l_o) (\sigma/\sigma_o)^a (t/t_o)^b \right\},$$
(13.1)

gdzie a, b są stałymi rozkładu, l_o , σ_o , t_o są stałymi testowymi lub nominalnymi, wszystkie określane eksperymentalnie. Dla $l = l_o$, $\sigma = \sigma_o$, $t = t_o f (l_o, \sigma_o, t_o) = 1 - 1/e = 0,632$ co stanowi nominalną wartość rozkładu Typowe wartości dla stałych rozkładu, w światłowodzie wysoko-krzemionkowym wynoszą: [1] $a=3\pm l$ oraz $b=0,2\pm 0,05$, dla $l_o=20m$, $\sigma_o=2GPa$, $t_o=1s$. Rozkład Weibulla jest zazwyczaj pokazywany w postaci stacjonarnej, tzn. dla $t=t_o$. σ jest wykreślane w skali logarytmicznej a prawdopodobieństwo albo w liniowej albo logarytmicznej [%] lub $log\{ln[1/(1-f(l, \sigma))]\}$, również w skali $ln\{ln[1/(1-f)]\}$. Nachylenie linii prostej, przeciągniętej przez punkty pomiarowe, daje stałą rozkładu a. Wykres w podwójnie logarytmicznej skali zmienia się w

zakresie od -7 do +2 (z zerem dla nominalnej wartości rozkładu), dla zmian od 0,1 do 100 na skali akumulowanego prawdopodobieństwa, wyrażonej w [%].

Wytrzymałość mechaniczna włókna szklanego zmienia się statystycznie wzdłuż jego długości z powodu przypadkowej natury głębokości defektu szczelinowego oraz rozkładu przestrzennego. Pomiary wytrzymałości włókna na zrywanie są skomplikowane przez tą przypadkowość. Wymagana jest odpowiednia ilość, zazwyczaj nadmiarowa, danych, w celu umożliwienia oceny statystycznej na odpowiednim poziomie pewności. Również w celu umożliwienia oceny wytrzymałości długiego włókna na podstawie pomiaru próbek wzorcowych o ograniczonej długości. Pomiar powinien objąć statystyki wszelkich możliwych rodzajów defektów włókna, nawet dużych a rzadko występujących. Tylko w takim wypadku ekstrapolacja z jednej długości wzorcowej na inną może być dokonana ze znaną dokładnością. Dokładniejsze przybliżenie danych jest możliwe jeśli znana jest dokładnie natura rzadkich i znacznych defektów. Ponieważ jest to pomiar niszczący istotne jest zastosowanie urządzeń i procedur pomiarowych nie powodujących nadmiernego marnotrawstwa włókna optycznego. Nadmiarowe dane otrzymane z pomiarów muszą być redukowane w taki sposób aby nie zniekształcać statystyki szczelin.

Stosuje się zasadniczo trzy standaryzowane techniki pomiarowe wytrzymałości światłowodu: dynamiczny test zmęczeniowy, statyczny test zmęczeniowy oraz test uodporniający. Zmęczenie jest degradacją wytrzymałości spowodowaną przez, indukowaną naprężeniem, korozję. Specyfikacja wytrzymałości światłowodu obejmuje rozkład statystyczny wytrzymałości na zrywanie (z takimi parametrami jak szerokość, wartość średnia, wartości ekstremalne), czas do zerwania w funkcji poziomu naprężenia, minimalny oczekiwany czas życia pod nominalnym naprężeniem pracy. Takie specyfikacje otrzymuje się z danych pomiarowych i zastosowania rozkładu Weibulla. Minimalny czas życia jest specyfikowany dla szczegółowo opisanych warunków pracy jak: temperatura, wilgotność, pH, itp.



Rys. 13.2. Zestaw pomiarowy do dynamicznego testu zmęczeniowego włókien światłowodowych. Modyfikowana maszyna zrywająca.



Rys.13.3. Dwa podstawowe zestawy pomiarowe do statycznych testów zmęczeniowych włókien światłowodowych. Test z nawijaniem na kalibrowany trzpień bez naciągu osiowego. Test z naciągiem osiowym na wielokrążku.



Rys. 13.4. Sposób przeprowadzania statycznego testu zmęczeniowego z nawijaniem włókna optycznego na kalibrowany wałek. Brak naprężenia wzdłużnego. Wskutek wygięcia część włókna jest zgniatana, część rozciągana.



Rys. 13.5. Sposób przeprowadzania mechanicznego testu uodporniającego (nieniszczącego) dla całej długości włókna optycznego



Rys. 13.6. Przykładowa charakterystyka wytrzymałości światłowodu wysokiej klasy wytrzymałościowej. Rozkład Weibulla. Na wykresie parametry wytrzymałościowe światłowodu są następujące: średnia wartość naprężenia zrywającego $\sigma_{sr}=1,9$ GPa, dewiacja standardowa $\sigma_{ds.}=0,8$ GPa, maksymalne naprężenie zrywające $\sigma_{max}=4,1$ GPa, minimalne naprężenie zrywające $\sigma_{min}=0,53$ GPa, stała rozkładu Weibulla a=2,47.



Rys. 13.7. Pomiar rozkładu wytrzymałości włókien wyciąganych z preform termicznie obrabianych powierzchniowo. A – bez obróbki termicznej, B – polerowanie płomieniowe, C – odprężanie przez ogrzewanie wysokoczęstotliwościowe i polerowanie płomieniowe.



Rys. 13.8. Wpływ laminarnego przepływu czystego i suchego gazu w piecu na wytrzymałość włókna optycznego. A – brak przepływu gazu filtrowanego, B – przepływ gazu izolującego od zanieczyszczeń środowiska laboratorium technologicznego.



Rys. 13.9. Wpływ pary wodnej w piecu wyciągowym na wytrzymałość mechaniczną włókna optycznego. Wilgotna atmosfera powoduje degradację powierzchni światłowodu.



Rys. 13.10. Pomiary wpływu grubości pierwotnego pokrycia na wytrzymałość światłowodu.

Dynamiczny test zmęczeniowy jest używany w celu szacunku minimalnego czasu życia włókna pracującego pod stałym nominalnym obciążeniem. Test wykonywany jest w, adaptowanej do właściwości włókien optycznych, rozciągarce - zrywarce przy stałej prędkości wzrostu obciążenia. Maszyna posiada dwa uchwyty, jeden nieruchomy ze wskaźnikiem naciągu, drugi ruchomy napędzany silnikiem o zmiennej prędkości ruchu posuwistego. Cała struktura jest umieszczona na stabilnej szynie. Prędkość obciążenia wpływa na przeciętną wytrzymałość i rozkład wytrzymałości w rzeczywistym włóknie co jest spowodowane efektami zmęczeniowymi.

Stosuje się prędkość obciążenia w granicach od 0,1Mpa/s do 0,1Gpa/s. Maszyna naciąga włókno ze stałą prędkością wzrostu naprężenia aż do momentu zerwania. Wartość obciążenia zrywającego podlega akwizycji, jak również średnica zerwanej końcówki włókna. Włókna najwyższej jakości posiadają bardzo wąski rozkład charakterystyki Weibulla. Odpowiedzialne za zerwanie szczeliny są podobne do siebie i posiadają wąski rozkład statystyczny wymiarów.

Statyczny test zmęczeniowy stosowany jest na przypadkowych próbkach włókna światłowodowego w celu pomiaru aspektu czasowego rozkładu Weibulla. Mierzony jest czas do zerwania włókna pod stałym naprężeniem. Zależność czasowa wytrzymałości światłowodu jest badana w trakcie produkcji światłowodu i kabli optycznych w celu gwarancji odpowiednich standardów wytrzymałościowych produktu. Badania wykazały, że włókno ulega zmęczeniu pod stałym obciążeniem, mniejszym niż 50Mpa, z powodu wzrostu szczelin podkrytycznych. Pomiar ten pokazuje pośrednio szybkość wzrostu szczeliny we włóknie jako funkcję zastosowanej siły rozciągającej i jest miarą maksymalnego czasu życia światłowodu w konkretnych warunkach pracy pod względem naprężenia i wilgotności. Stosowane są dwie techniki pomiaru: obciążenie osiowe, analogiczne do zmęczeniowego testu dynamicznego ale przy stałym obciążeniu (lub przy prędkości zmiany obciążenia równej zero) oraz naprężenie zgięciowe. Metoda obciążenia osiowego stosuje oprócz klasycznej zrywarki także dwa bębny o dużej średnicy aby nie wprowadzać naprężenia zgięciowego. Metoda zgięciowa polega na nawinięciu włókna na precyzyjnym trzpieniu o kalibrowanej średnicy bez wprowadzania rozciągającego naprężenia osiowego.



Rys. 13.11. *Statyczny test zmęczeniowy światłowodów telekomunikacyjnych i specjalnych (pomiary własne).*

Test uodporniajacy jest stosowany wobec całej długości gotowego do zastosowania włókna światłowodowego pokrytego płaszczem ochronnym dla konkretnych warunków pracy. Włókno z wyciągarki lub rozwijarki przeciągane jest w trybie ciągłym przez obszar testowego naprężenia do nisko-naprężeniowego odbiornika. Zazwyczaj w tym celu stosuje się system rolek oporowych wywierających naprężenie na pewien odcinek włókna w zakresie 0,2 - 1 GPa (najczęściej 0,35Gpa) w czasie przechodzenia włókna prze ten obszar. Test jest stosowany, ze statystycznego punktu widzenia, w celu zakończenia nieznanego rozkładu szczelin podkrytycznych ze strony artefaktów o dużym rozmiarze. Jest również używany w celu sprawdzenia prawdziwości przewidywania wytrzymałości długich odcinków światłowodu na podstawie pomiaru wytrzymałości wielu odcinków krótkich. Dokładność takiego przewidywania jest znacznie dokładniejsza jeśli rozkład wytrzymałości jest jednorodny oraz określono prawidłowo i dokładnie parametry rozkładu Weibulla. Minimalna gwarantowana wytrzymałość włókna, sprawdzona przez zastosowanie testu uodporniającego, dotyczy także przewidywania czasu życia włókna. Wyższy poziom testu uodporniającego zapewnia minimalny czas życia uodpornionego światłowodu. Mimo iż czas życia wzrasta znacznie przez podniesienie poziomu testu uodporniającego, jednakże zwiększany jest poziom zerwań włókna. Poziom uodporniania włókna światłowodowego musi być wybrany na zasadzie kompromisu, zapewnienia gwarancji dostatecznego czasu życia przy akceptowalnym poziomie niszczenia światłowodu, czego konsekwencją jest wzrost kosztów produkcji. Reguła doświadczalna stosowana w takim przypadku mówi, że poziom testu uodporniającego powinien być trzy razy większy od naprężenia nominalnego długoterminowej pracy światłowodu.

Z pomiarami wytrzymałości mechanicznej pojedynczego światłowodu związane są pomiary odporności korozyjnej włókna na wilgoć, na środowiska chemiczne (głównie kwaśne i zasadowe), na odporność na wilgoć bezpośredniego i pośredniego pokrycia włókna (przepuszczalność jako funkcja czasu), na cykle i szoki termiczne, przypadkowe udary mechaniczne. Wszystkie te elementy wpływają bezpośrednio lub pośrednio na wytrzymałość mechaniczną (a przez to na czas życia) światłowodu.

14. POMIARY ODPORNOŚCI RADIACYJNEJ

Pomiary odporności światłowodów, kabli światłowodowych i elementów optoelektronicznych na podwyższony poziom promieniowania jonizującego są badaniem specjalistycznym nie wymaganym przy wielu zastosowaniach standardowych. Jednakże duzi producenci, których włókna i kable są stosowane w bardzo szerokich warunkach aplikacyjnych nie mogą sobie pozwolić na nieznajomość zachowania elementów systemu w trudnych warunkach środowiskowych obejmujących obciążenia mechaniczne (np. wibracja), chemiczne, termiczne i radiacyjne. Promieniowanie jonizujące powoduje wzrost tłumienia światłowodu, poprzez indukcję powstawania centrów barwnych w szkle wokół domieszek i zmianę wysycenia wiązań tlenowych. Niektóre z tych efektów, w zależności od poziomu narażenia, posiadają charakter odwracalny. Stopień odwracalności jest, między innymi, proporcjonalny do średniego poziomu mocy optycznej transmitowanej światłowodem, wskutek występowania zjawiska foto-odbarwiania. Pomiary odporności radiacyjnej, w układzie podstawowym, wykonuje się przy pomocy klasycznego systemu spektrofotometrycznego. Odporność określa się przy pomocy dopuszczalnych przyrostowych strat radiacyjnych. Poziomy przyrostowe strat radiacyjnych, dla różnych klas światłowodów, określone są w normach międzynarodowych Promieniowanie jonizujące, w większych dawkach, powoduje przyspieszone starzenie światłowodu np. poprzez lokalną dewitryfikację, a więc obniżenie właściwości mechanicznych [9].

Reakcja transmisyjnego systemu światłowodowego na promieniowanie jonizujące zależy od rodzaju promieniowania, całkowitej dawki, mocy dawki, czasu obserwacji po napromieniowaniu, temperatury otoczenia, długości fali optycznej pracy systemu, rodzaju włókna optycznego – rodzajów domieszek i technologii produkcji, średniej gęstości mocy optycznej propagowanej w światłowodzie, rodzaju fotodetektora – objętości obszaru aktywnego optycznie, konstrukcji fotodiody, rodzaju źródła optycznego – dopuszczalnej gęstości prądu pracy, sposobu zabezpieczenia systemu przed promieniowaniem [55].

Stosowanie światłowodów w środowiskach radiacyjnych jest ograniczone dwoma czynnikami. Po pierwsze, większość istniejących kabli światłowodowych posiada stosunkowo wysokie straty indukowane promieniowaniem jonizującym. Ale warunki pracy, gdzie napotykane są duże moce dawki są bardzo rzadkie. Po drugie, wysoki poziom napromieniowania impulsowego powoduje generację w materiale światłowodu zjawiska luminescencji. Światło, którego źródłem jest efekt radioluminescencji, jest prowadzone światłowodem do detektora powodując błędy w systemie odbioru i obróbki informacji cyfrowej.

Dla światłowodowego systemu telekomunikacyjnego przeznaczonego do pracy w środowisku o podwyższonym poziomie promieniowania jonizującego podstawowym parametrem jest czas życia $T_{\dot{z}}$. Ze strony technologicznej, czas życia systemu zależy od własności zastosowanego kabla optycznego i sposobu jego zabezpieczenia przed promieniowaniem jonizującym. Ze strony konstrukcyjnej $T_{\dot{z}}$ zależy od marginesu wzmocnienia systemu, a więc ilości wzmacniaków, całkowitej długości toru oraz od długości kabla podlegającego napromieniowywaniu, rodzaju pracy, dopuszczalnych strat wtrącenia, wymaganej jakości transmisji mierzonej w BER i SNR, możliwości foto-wybielania w systemie poprzez wewnętrzną transmisję dużej mocy optycznej. Ze strony warunków pracy $T_{\dot{z}}$ zależy od miejsca napromieniowania systemu, całkowitej dawki, mocy dawki, temperatury pracy, dopuszczalnego czasu relaksacji.

Badania radiacyjne światłowodów posiadają inne uzasadnienie dla różnych grup światłowodów. Celem pomiarów spektralnych charakterystyk wrażliwości radiacyjnej dla światłowodów telekomunikacyjnych jest określenie ich czułości radiacyjnej wyrażonej w [dB/km rad], dla różnych dawek promieniowania. Celem badawczym było poszukiwanie zależności pomiędzy jakością światłowodu i jego parametrami technologicznymi a charakterystykami radiacyjnymi i termicznymi. Istnieje ścisły związek pomiędzy charakterystykami radiacyjnymi i termicznymi światłowodów telekomunikacyjnych oraz bezpośredni związek wymienionych parametrów z jakością światłowodu.

Tłumienie napromieniowywanych światłowodów mierzono metodą porównawczą, która jest analogiczna do metody odcięcia końca światłowodu. Jako źródło światła stosowano interferometr VSU-2P. Wprowadzane do włókna optycznego światło było modulowane z częstotliwością 660 Hz dla zastosowania detekcji fazoczułej z nanowoltomierzem homodynowym. Światłowody umieszczano w ognisku soczewki na wyjściu spektrofotometru, jeden nad drugim, co odpowiada kształtowi szczeliny. Umożliwia to jednakowe wprowadzenie światła równocześnie do obu światłowodów – badanego i odniesienia. Jako detektory stosowano fotodiody germanowe umożliwiające pomiar tłumienia spektralnego w zakresie 0,6 – 1,6 µm. Wyniki rejestrowano w systemie komputerowym akwizycji danych.

Do pomiarów wykorzystano odcinki światłowodu ustalonej długości, zależnej od dawki całkowitej (duże dawki mniejsza długość mierzonej próbki). Odniesienie stosowano tej samej długości. Próbki napromieniowywano ze źródła Co^{60} oraz impulsowego liniowego akceleratora elektronowego. Pomiary prowadzono w krótkich (godziny i dni po napromieniowaniu) i długich (tygodnie i miesiące) horyzontach czasowych. Stymulowano relaksację światłowodów poprzez ich wygrzewanie oraz transmisję dużych mocy optycznych. Mierzono standardowy telekomunikacyjny wielomodowy światłowód gradientowy ze szkła wysokokrzemionkowego domieszkowanego GeO_2 a także inne światłowody, w szczególności ze szkieł wieloskładnikowych [55].

Rysunki 14.1 oraz 14.2 przedstawiają wyniki pomiarów przyrostu tłumienia spektralnego dl światłowodów napromieniowanych ze źródła promieniowania gamma dawką odpowiednio 0,54 i 1,08 Megarada mocą dawki 0,54 Mrad/h. W obu przypadkach można zauważyć podobny przebieg zmian tłumienia. A upływem czasu tłumienie systematycznie maleje, początkowo szybciej, potem nieco wolniej, aż do nasycenia procesu w danej temperaturze. Jest top spowodowane wewnętrznymi procesami relaksacyjnymi w szkle światłowodu. Nie widać już praktycznie różnicy w tłumieniu spektralnym światłowodów badanych w 44 i 63 dni po napromieniowaniu. Wygrzewanie ponownie obniża tłumienie spektralne w wyniku termicznego uaktywnienia procesów relaksacji.

Wprowadzane radiacyjnie tłumienie jest najmniejsze w przedziale długości fal $\lambda = 0.9 - 1.1$ µm. W miarę wzrostu i malenia długości fali tłumienie wzrasta. Dla światłowodów napromieniowanych większą dawką mierzono transmisję krótkiego odcinka przy pomocy lasera He-Ne i detektora krzemowego o większej czułości dla tego zakresu długości fal. Wyniki pomiarów świadczą o częściowej odwracalności wpływu promieniowania jonizującego. Rys.14.3. przedstawia różnicę w tłumieniu dla światłowodów tuż po napromieniowaniu (krzywe A i B) oraz po wygrzaniu przez 12 godzin w temperaturze 160°C (krzywe C i D). Mimo wygrzewania w tej temperaturze, w dalszym ciągu można odróżnić włókno optyczne silniej i słabiej napromieniowane. Dla uwypuklenia wpływu napromieniowania, na rys.14.1 i 14.2. przedstawiono przebieg tłumienia w funkcji długości fali dla analogicznego światłowodu nie napromieniowanego, zmierzonego w tych samych warunkach.

Rys. 14.4 przedstawia przebieg tłumienia dla włókien optycznych napromieniowanych w liniowym akceleratorze elektronowym (elektrony o energii 13 MeV). Ogólny charakter zmian w charakterystykach światłowodów jest podobny do poprzednich. Próbka silniej napromieniowana (krzywa A) tłumi światło bardziej niż próbka mniej napromieniowana (krzywa B). Wygrzewanie (krzywe C i D) zmniejsza wpływ napromieniowania. Znaczny wzrost tłumienia występuje dla mniejszych wartości długości fali.

Badania radiacyjne światłowodów pozwalają na jakościową ocenę włókien optycznych. Pozwalają na częściowe rozdzielenie różnych źródeł strat w światłowodzie nieidealnym. Radiacyjnym parametrem jakościowym światłowodu może być jego czułość znormalizowana wyrażona w [dB/rad km] lub czułość przyrostowa.



Rys. 14.1. Standardowy, wielomodowy, gradientowy, światłowód telekomunikacyjny ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂ produkcji UMCS. Napromieniowany ze źródła Co⁶⁰ dawką 0,54 Mrad, mocą dawki 0,54 Mrad/h. Długość próbki światłowodu L=5m. a) pomiar po 4h od napromieniowania, b) po 20h, c) po 1000h (44 dni), d) po 63 dniach, wygrzewany przez 12h w $T=160^{\circ}C$, e) charakterystyka spektralna strat analogicznej próbki nie napromieniowanej o długości 500 m. [55], pomiary własne.



Rys. 14.2. Standardowy, wielomodowy, gradientowy, światłowód telekomunikacyjny ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. Napromieniowany ze źródła Co⁶⁰ dawką 1,08 Mrad, mocą dawki 0,54 Mrad/h. Długość próbki światłowodu L=5m. a) pomiar po 24h od napromieniowania, b) po 63 dniach , c) po 64 dniach, wygrzewany przez 12h w T=160°C, d) charakterystyka spektralna strat analogicznej próbki nie napromieniowanej o długości 500 m [55].



Rys. 14.3. Standardowy, wielomodowy, gradientowy, światłowód telekomunikacyjny ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. Napromieniowany ze źródła Co⁶⁰ mocą dawki 0,54 Mrad/h. Długość próbki światłowodu L=5m. a) pomiar po 24h od napromieniowania, dawka 1,08Mrad b) pomiar po 20h, dawka 0,54Mrad, c) dawka 0,54Mrad, pomiar po 64 dniach relaksacji w T=20°C i wygrzewany przez 12h w T=160°C, d) dawka 1,08Mrad, pomiar po 64 dniach oraz wygrzewaniu w temperaturze 160°C przez 12h [55].



Rys. 14.4. Standardowy, wielomodowy, gradientowy, światłowód telekomunikacyjny ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. Długość próbki światłowodu L=5m. Napromieniowany z akceleratora liniowego strumieniem elektronów w sposób impulsowy. Czas pomiaru w dwa miesiące po napromieniowaniu. Światłowód przechowywany w standardowych warunkach. Dawki odpowiednio: a) 25 krad, b) 100 krad, c) 100 krad, wygrzewany prze 12h w T=160°C. [55].



Rys. 14.5. Radiacyjne charakterystyki relaksacyjne i termiczne dla standardowego, wielomodowego, gradientowego, światłowodu telekomunikacyjnego ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. Długość próbki pomiarowej L=5 m. a) i a') - próbka napromieniowana dawką 0,54 Mrad, λ =1,1 µm, b) i b') - próbka napromieniowana dawką 1,08 Mrad, λ = 1, µm; Dla krzywych a) oraz b) oś t mierzy czas po napromieniowaniu; Dla krzywych a') oraz b') oś t mierzy czas wygrzewania w T=160°C. [55].



Rys. 14.6. Radiacyjne charakterystyki tłumienia dla standardowego, wielomodowego, gradientowego, światłowodu telekomunikacyjnego ze szkła kwarcowego domieszkowanego GeO₂. produkcji UMCS. Dane: długość próbki światłowodu L=5 m. długość fali pomiarowej λ =1 µm, t – czas pomiaru po napromieniowaniu, standardowe warunki relaksacji. Pozostałe dane jak na rys.14.1 i 14.2. [55].

15. POMIARY WŁAŚCIWOŚCI NIELINIOWYCH ŚWIATŁOWODÓW

Światłowody wykorzystywane obecnie w telekomunikacji przenoszą znacznie więcej kanałów i większe moce optyczne niż kiedykolwiek poprzednio. Znaczna moc optyczna modyfikuje właściwości transmisyjne włókna, prowadząc do zjawisk nieliniowych. Zjawisko nieliniowe określamy gdy sygnał opuszczający światłowód dla danej długości fali nie wzrasta liniowo ze wzrostem mocy optycznej dla tej długości fali na jego wejściu. Nieliniowość prowadzi do konwersji mocy pomiędzy różnymi długościami fal. Pomiary nieliniowe stały się ważne wraz z zastosowaniem szerokopasmowych wzmacniaczy światłowodowych, co pozwala na dalsze zwiększenie liczby multipleksowanych kanałów. Połączenie wysokiej mocy optycznej, zwiększonej szybkości transmisji, metod optymalizacji dyspersji przez kompensację w różnych odcinkach światłowodów i dużej liczby wąsko położonych kanałów sprzyja powstawaniu zjawisk nieliniowych takich jak: samo-modulacja fazy, skrośna modulacja fazy, mieszanie czterofotonowe, stymulowane rozpraszanie Brillouina i Ramana. Zjawiska nieliniowe występują po przekroczeniu charakterystycznej gęstości mocy, co w światłowodzie jest łatwiejsze niż w materiale objętościowym wskutek zjawiska prowadzenia fali w obszarze rdzenia. Jednakże rozkład pola modu podstawowego w światłowodzie jednomodowym jest zupełnie inny niż rozkład właściwości refrakcyjnych, stąd konieczność określenia z rozkładu pola efektywnej powierzchni, analogicznie do średnicy pola modu. Precyzyjne pomiary nieliniowych parametrów światłowodu będą stawać się coraz ważniejsze, w celu uniknięcia zniekształceń nieliniowych, budowy nieliniowych światłowodowych elementów funkcjonalnych oraz dla potencjalnych przyszłych systemów solitonowych. Mierzone są następujące parametry: nieliniowy współczynnik załamania n₂, efektywna powierzchnia światłowodu (związana z rozkładem pola modowego) Aeff, oraz poziomy rozpraszania stymulowanego SBS, SRS. Badania i pomiary zjawisk nieliniowych w złożonym, szerokopasmowym transmisyjnym systemie światłowodowym będą ulegać dalszej komplikacji ze względu na zastosowanie różnych światłowodów o kompensujących się wzajemnie efektach dyspersyjnych i, być może kompensujących się częściowo, zjawiskach nieliniowych. Spowoduje to być może dalszą potrzebę wejścia w badania zjawisk jeszcze wyższego rzędu.

Rozpraszanie Ramana i Brillouina mogą stać się procesami nieliniowymi w światłowodach wskutek dużej gęstości mocy optycznej i bardzo długiej drogi interakcji. Stymulowane rozpraszanie Ramana (SRR) i stymulowane rozpraszanie Brillouina (SRB) zachodzą, gdy moc optyczna wprowadzona do światłowodu przekracza poziom progowy dla każdego z tych procesów. W takich warunkach rozpraszania stymulowanego, moc optyczna jest efektywnie konwertowana z fali pompy wejściowej do rozproszonej fali Stokesa. Fala rozproszona jest przesunięta w częstotliwości od sygnału pompy, i w przypadku SRB, propaguje w kierunku przeciwnym.

Rozpraszanie Ramana i Brillouina w światłowodach może być zarówno korzystne jak i niekorzystne. Zjawiska rozpraszania są ogólnie niekorzystne dla telekomunikacji światłowodowej ponieważ limitują maksymalną moc w światłowodzie i prowadzą do interferencji między kanałami w systemach wielofalowych. Jednakże SRR może być używane jako zasada działania wzmacniaczy optycznych dla długości fal, gdzie światłowodowe wzmacniacze erbowe nie są odpowiednie. Również SRB było już wykorzystywane jako podstawa budowy rozłożonych czujników naprężenia i temperatury wzdłuż włókna światłowodowego.

Rozpraszanie Brillouina w światłowodzie bardzo zależy od rodzaju zastosowanego źródła światła. Z tego powodu, przy braku obecnie normalizacji w tym zakresie, bardzo trudno jest uzyskiwać wyniki powtarzalne dla konkretnego światłowodu, źródła i sposobu modulacji sygnału. W tej sytuacji poziom SRB może się znacznie zmieniać. Obecnie, z powodu braku normalizacji, określanie poziomu progowego SRB jest ograniczone do dokładnych pomiarów bezwzględnej wartości mocy optycznej wchodzącej do włókna optycznego i opuszczającej to włókno.

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie standaryzowanego źródła o kalibrowanej długości fali i szerokości spektralnej i ściśle ustalonych parametrach energetycznych.

Stymulowane rozpraszanie Ramana występuje dla znacznie większych mocy optycznych niż SRB. Moce progowe są rzędu watów dla SRR w porównaniu z miliwatami dla SRB. W przeciwieństwie do SRB, krzywa wzmocnienia Ramana jest łatwiejsza do pomiaru w praktyce niż wartość progowa, ponieważ wzmocnienie może być mierzone dla mniejszych mocy optycznych. Krzywa wzmocnienia jest bardziej użyteczna niż pojedyncza liczba określająca moc progową, ponieważ można ją zastosować do obliczenia wzmocnienia Ramana w systemach WDM. Poziom progowy SRR może być obliczony z maksymalnej wartości bezwzględnego współczynnika wzmocnienia Ramana.

W światłowodzie, przy odpowiednio dużych poziomach mocy prowadzonej może występować szereg zjawisk nieliniowych. Przyczyną samo modulacji fazowej (SMF) jest zależność współczynnika załamania w ośrodku nieliniowym od natężenia fali. Zjawisko prowadzi w światłowodzie do spektralnego rozszerzenia propagowanego impulsu. Jest czasowym analogiem zjawiska samo-ogniskowania. Badania nad SMF prowadził [Stolen, 78]. Zjawisko to połączone jest także z zależnością prędkości grupowej od natężenia fali świetlnej. Skrośna modulacja fazy zawsze towarzyszy (ŚMF). Powstaje wskutek zależności efektywnego współczynnika załamania nie tylko od oryginalnej źródłowej fali propagowanej w światłowodzie ale od innych fal obecnych we włóknie optycznym w tym samym czasie. Sprzężenie fal poprzez ŚMF prowadzi do szeregu innych zjawisk nieliniowych w światłowodzie.

15.1. Pomiary Nieliniowego Współczynnika Załamania Światła w Światłowodzie

Stosowanych jest kilka metod pomiaru n2. W literaturze przedmiotu [10] można obecnie spotkać liczne rozbieżności dotyczące wyników i ich interpretacji. Wynikało to, między innymi, z braku normalizacji metod pomiarowych. Jeden ze stosowanych często normalizowanych układów pomiarowych przedstawiono na rysunku 15.1. Moc wyjściowa z dwóch jedno-częstotliwościowych laserów światłowodowych z siatką Bragga (DFB) jest łączona w celu generacji w światłowodzie dudnienia. Sygnał dudnienia wzmacniany w światłowodowym częstotliwości jest przedwzmacniaczu i wzmacniaczu domieszkowanym Erbem EDFA i transmitowany w odcinku badanego światłowodu. W czasie propagacji sygnał podlega samo-modulacji fazowej, co prowadzi do generacji wstęg bocznych spektrum optycznego.



Rys.15.1. Zestaw pomiarowy dla nieliniowego współczynnika załamania światłowodu n₂.

Na rysunku 15.2. przedstawiono typowy kształt zmierzonej charakterystyki spektralnej na wyjściu światłowodu. Poprzez zmiany mocy pobudzającego sygnału i pomiar intensywności wstęg bocznych możliwe jest określenie nieliniowego przesunięcia fazy sygnału i stąd nieliniowego współczynnika (n_2/A_{eff}) światłowodu. Znając wartość efektywnej średnicy pola modu światłowodu A_{eff} można określić wartość nieliniowego współczynnika załamania n_2 dla badanego rodzaju włókna światłowodowego.



*Rys. 15.2. Typowy kształt mierzonego wyjściowego spektrum ze światłowodu badanego dla określenia wartości nieliniowego współczynnika załamania n*₂.

Typowe wartości pomiarowe są następujące, dla standardowego włókna telekomunikacyjnego $(n_2/A_{eff}) = 0.27 * 10^{-9} \text{ W}^{-1}$, co odpowiada wartości $n_2 = 2.16 * 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$, przy założeniu średnicy pola modu rzędu 80 µm². Dla światłowodów z przesuniętą dyspersją, nieliniowy współczynnik załamania n_2 jest w przybliżeniu dwukrotnie większy, niż dla włókna standardowego, co jest spowodowane mniejszą wartością efektywnych obszarów pola modowego w takich światłowodach. W jednomodowych światłowodach standardowych nie obserwuje się znacznego rozrzutu wartości parametru n_2 pomiędzy różnymi próbkami światłowodu. Średnio rozrzut ten jest mniejszy od 10%. W światłowodach z przesuniętą dyspersją rozrzut wartości n_2 pomiędzy próbkami różnych producentów jest znacznie większy i wynosi w przybliżeniu 20%. W światłowodach z pasmowo skompensowaną dyspersją nieliniowy współczynnik załamania n_2 jest kilkakrotnie większy niż w światłowodzie standardowym. Rozrzut wartości współczynnika jest jeszcze większy z obserwowana jest zależność pomiędzy wartością rozrzutu a poziomem domieszkowania światłowodu germanem oraz szczegółowych wymiarów poszczególnych warstw włókna i kształtu profilu refrakcyjnego. Pomiarów wartości nieliniowego współczynnika załamania dokonuje się obecnie z dokładnością kilku %, średnio 5% [11].

Rodzaj	Wartość	Średnica pola	Rozrzut mierzonej	Dokładność
jednomodowego	nieliniowego	modowego w	wartości	pomiaru wartości
włókna	współczynnika	$\left[\mu m^2\right]$	współczynnika n ₂	$n_2 \le [\%]$
światłowodowego	załamania n_2 w		pomiędzy	
	$[10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}]$		próbkami różnych	
			włókien w [%]	
1	2	3	4	5
Standardowy	2,16	80	5 - 10	3
Z przesuniętą	4,4	40	15 - 25	5
dyspersją				
Ze	10		20 - 100	5
skompensowaną				
dyspersją				

Tabela 15.1. Mierzone wartości nieliniowego współczynnika załamania dla różnych rodzajów światłowodów jednomodowych

15.2. Pomiary Powierzchni Efektywnej Pola Modowego w Światłowodzie

Wszystkie zjawiska nieliniowe są zależne od natężenia pola elektromagnetycznego w medium. W przypadku pomiarów w technice światłowodowej bada się moc optyczną wchodzącą do światłowodu i opuszczającą go. Do analizy teoretycznej wymagane są zależności pozwalające na konwersję pomiędzy obiema wielkościami. Mierzona moc optyczna opuszczająca włókno jest całką rozkładu natężenia w przekroju poprzecznym światłowodu. Zakładając jednorodny rozkład natężenia I na powierzchni rdzenia A_{rdzenia}, natężenie może być obliczone z mierzonej mocy z zależności:

$$\mathbf{I} = \mathbf{P}_{\text{mierzone}} / \mathbf{A}_{\text{rdzenia}}.$$
 (15.1)

Oczywiście w światłowodzie jednomodowym nie posiada rozkładu jednorodnego a nawet nie jest zamknięte wewnątrz rdzenia. Osiąga wartość maksymalną na osi światłowodu, maleje w kierunku granicy rdzenia z płaszczem i wnika do płaszcza na głębokość zależną od profilu refrakcyjnego. Przyjmując uproszczenie stałego rozkładu pola zaniżano by jego wartość na osi i zawyżano w otoczeniu graniczy rdzenia i płaszcza.

Parametr efektywnej powierzchni pola modowego światłowodu (w skrócie nazywany efektywną powierzchnią światłowodu) został zdefiniowany w celu obliczeń zjawisk nieliniowych. Jest to pojedyncza wartość bazująca na rozkładzie pola modowego w światłowodzie. Wartość ta może być wstawiona do równania (15.1) zamiast powierzchni rdzenia A_{rdzenia}. Natężenie pola, wyrażone kwadratem bezwzględnej wartości amplitudy I = $|E(r)|^2$, od którego zależą zjawiska nieliniowe, wyraża się zależnością I = P_{mierzone}/A_{eff}, E(r) – jest amplitudą pola modu podstawowego dla promienia r od osi światłowodu. Powierzchnia efektywna wyrażona jest zależnością:

$$A_{eff} = 2\pi (\int_{0}^{\infty} I(r)rdr)^{2} / \int_{0}^{\infty} I^{2}(r)rdr$$
(15.2)

W światłowodzie skokowym, gdzie pole można przybliżyć krzywą gaussowską o promieniu *w* w punktach 1/e wartości amplitudy, efektywna powierzchnia wynosi

$$\mathbf{A}_{\rm eff} = \pi w^2(\lambda), \tag{15.3}$$

gdzie $2w(\lambda)$ jest II definicją Petermana średnicy pola modowego dla długości fali λ . Średnica pola modu jest ustabilizowanym parametrem w technice światłowodowej o standaryzowanych procedurach pomiarowych. Dla światłowodów o dowolnym rozkładzie współczynnika załamania, lub dla jednomodowych optymalizowanych światłowodów telekomunikacyjnych, takich jak z przesuniętą charakterystyką dyspersyjną lub ze spłaszczoną charakterystyką dyspersyjną, pole modowe nie może być przybliżone przez funkcję Gaussa, i konieczne są inne metody obliczenia powierzchni efektywnej światłowodu. Przeprowadza się to kilkoma różnymi metodami:

- mierzy się rozkład pola i powierzchnię efektywną oblicza się ze wzoru (15.2), jest to metoda najdokładniejsza ale najtrudniejsza,
- stosuje się w odniesieniu do równania (15.3) współczynnik korekcyjny zależny od rodzaju światłowodu, a przez to wykorzystując znaną lub zmierzoną metodami standardowymi wartość średnicy pola modowego [52].

Średnica pola modowego może być określona w polu bliskim

$$d_{bliskie} = 2\sqrt{2} \left[\int_{0}^{\infty} I(r)^{2} r dr / \int_{0}^{\infty} [I'(r)]^{2} r dr\right]^{1/2}$$
(15.4)

i w polu dalekim

$$d_{dalekie} = 2\sqrt{2} [\int_{0}^{\infty} |F(p)|^{2} p dp / \int_{0}^{\infty} |F(p)|^{2} p^{3} dp]^{1/2}, \qquad (15.5)$$

gdzie |F(p)| jest kątowym rozkładem natężenia pola promieniowanego z zakończenia światłowodu a p=ksin(Θ). Dla włókien o złożonym profilu refrakcyjnym zależność A_{eff}= $\pi w^2(\lambda)$ nie jest prawdziwa. Praktyka pokazuje, że pozornie małe zmiany w rozkładzie pola modowego prowadzą do zasadniczych zmian powierzchni efektywnej. Dla włókien o złożonym profilu refrakcyjnym obowiązuje przybliżona zależność Nahimiry [6]

$$\mathbf{A}_{\rm eff} = \mathbf{k}_{\rm N} \pi w^2(\lambda), \qquad (15.6)$$

gdzie k_N – jest współczynnikiem korekcyjnym Nahimiry, zależnym od λ i rodzaju światłowodu (tzn. profilu refrakcyjnego). Dane eksperymentalne pokazują wartość współczynnika korekcyjnego dla światłowodów z przesuniętą dyspersją na poziomie 0,95 i niewiele zależnego od profilu refrakcyjnego. Dla światłowodów z dużym polem efektywnym k_N jest w zakresie 1.03 – 1,17 i wykazuje bardzo silną zależność od profilu. Ponieważ $k_N=k_N(\lambda)$, musi być określony dla każdego światłowodu. Zaletą stosowania metody korekcji Nahimiry jest wykorzystanie dobrze rozwiniętej, od dłuższego czasu, techniki pomiarowej średnicy pola modowego. Niektóre przyrządy mają taką funkcję wbudowaną. Wadą jest silna, w niektórych wypadkach, zależność określania tego współczynnika, a więc nie daje oszczędności w prostocie pomiaru wobec pełnej metody określenia bezpośrednio rozkładu pola modowego.

Następujące techniki stosuje się do pomiaru powierzchni aktywnej: bezpośrednia metoda pola odległego, skanowanie pola bliskiego, zastosowanie zmiennej apertury w polu dalekim, przesunięcie poprzeczne. Metody te omówiono w częściach pracy dotyczących pomiarów pól dalekiego i bliskiego światłowodu

15.3. Rozpraszanie Stymulowane Fali Optycznej w Światłowodach

Rozpraszanie Ramana i Brillouina są procesami nieelastycznymi, w których część mocy optycznej jest tracona z fali optycznej i absorbowana przez medium transmisyjne, podczas gdy

pozostała część energii jest re-emitowana jako fala o niższej częstotliwości. O procesach takich można mówić jako o konwersji padającego fotonu w rozproszony foton o niższej energii oraz fonon energii drgań. Całkowita energia i momenty przed i po rozproszeniu są równe, tzn. energia fotonu padającego jest dzielona pomiędzy foton rozproszony i fonon. Ponieważ częstotliwość fali optycznej jest proporcjonalna do jej energii, foton rozproszony posiada niższą częstotliwość niż foton padający. Przesunięcie częstotliwości w dół jest nazywane falą Stokesa.

Spontaniczne rozproszenie Ramana i Brillouina było obserwowane często i mierzone w próbkach objętościowych takich materiałów jak kryształ kwarcu i szkło krzemionkowe (które nazywaliśmy szkłem kwarcowym). Natężenie fali rozproszonej jest silnie zależne od kąta rozpraszania i gestości mocy optycznej w materiale. Narastanie fali Stokesa jest proporcjonalne do iloczynu współczynnika wzmocnienia rozproszenia, natężenia fali pompy oraz natężenia jakiejkolwiek obecnej fali Stokesa. W materiałach objętościowych fal Stokesa szybko zanika w miarę propagacji od miejsca generacji. Jednakże sytuacja jest odmienna w przypadku niskostratnych światłowodów jednomodowych, które podtrzymują propagację fali równolegle do swojej osi na dużych odległościach. W konsekwencji, promieniowanie rozproszone w obu kierunkach wprzód i wstecz względem fali pobudzającej, będzie propagowane wewnątrz światłowodu łącznie z sygnałem fali pompy przez długą drogę. W tych warunkach jest możliwe, że fale Stokesa nadal będą oddziaływać z pewną wydajnością z falą pompy i wystąpi zjawisko eksponencjalnego wzrostu mocy optycznej przesuniętej częstotliwościowo w dół. Dla ustalonej długości włókna optycznego, stopniowy wzrost mocy pompy pobudzającej światłowód z jednego końca, będzie prowadził do stopniowego wzrostu mocy fali Stokesa przez mechanizm rozproszenia spontanicznego. Jeśli moc pompy dalej wzrasta, może wystąpić zjawisko eksponencjalnego wzrostu mocy Stokesa. Poziom mocy pompy, dla której fala Stokesa gwałtownie wzrasta, w funkcji mocy pompy, jest nazywana poziomem progowym rozpraszania stymulowanego.

Podstawowa różnica pomiędzy rozproszeniem Brillouina i Ramana polega na rodzaju generowanego fononu. Proces SRR generuje optyczne fonony wysokoenergetyczne. Proces SRB generuje niskoenergetyczne fonony akustyczne. Różnica pomiędzy częstotliwością pompy i fali Stokesa jest znacznie większa dla procesu SRR niż dla SRB. Typowe wartości różnicy fala pompy - fala Stokesa wynosi 10GHz (ok. 0,1 nm dla 1550nm) dla SRB i 13 THz (ok. 110 nm dla 1550 nm) dla SRR. Innym podstawowym rozróżnieniem jest, że rozproszona fala spowodowana efektem SRB porusza się głównie wstecz. Fala Stokesa SRB pojawia się na wejściu światłowodu, podczas gdy fala Stokesa SRR porusza się w kierunku sygnału pompy.

Oba rodzaje rozpraszania posiadają tzw. poziomy mocy progowej pompy, powyżej których fale Stokesa narastają gwałtownie. Dla SRB oznacza to, że ilość mocy optycznej opuszczającej odległy koniec światłowodu nie wrasta liniowo ze wzrostem mocy wejściowej. Maksymalna wartość mocy wejściowej zostaje ustalona i nadmiar mocy jest odbijany z powrotem od światłowodu. Dla systemów (łączy) światłowodowych rozgałęzionych w złożony sposób, ważne jest aby jak najwięcej mocy mogło być wpompowane we włókno wejściowe w celu kompensacji tłumienia i strat podziału mocy optycznej pomiędzy gałęzie. W takiej sytuacji ograniczeniem na maksymalną moc optyczną jest SRB.

Fala Stokesa dla rozproszenia Ramana może być przesunięta od fali pompy w dziedzinie częstotliwości typowo od 10 do 100 nm i jest propagowana wprzód we włóknie łącznie z falą pompy. Jeśli pompa jest w rzeczywistości jednym kanałem telekomunikacyjnego systemu wielokanałowego, wówczas fala Stokesa może pokryć się z innymi kanałami na większych długościach fali, prowadząc do przesłuchu i wzmacniania ramanowskiego. We wzmacnianiu ramanowskim, kanały o mniejszej długości fali doznają strat mocy i działają jako pompa dla wzmacniania fali w kanale o większej długości fali.

Konwersja długości fali, połączona ze stratą mocy optycznej na rzecz fali propagującej w przeciwnym kierunku może mieć poważne implikacje w systemach telekomunikacji światłowodowej. Na przykład, systemy telewizji kablowej stosują silnie rozgałęzione sieci światłowodowe w celu podziału sygnału z pojedynczego nadajnika, i rozsyłają sygnał do jak największej ilości odbiorców. Jak największa moc powinna być wpompowana do systemu dystrybucji, w celu utrzymania u najdalszego odbiorcy akceptowalnej wartości stosunku sygnału do szumu. Stymulowane rozpraszanie Brillouina limituje maksymalną wartość mocy optycznej, która może być wpompowana do światłowodu, ponieważ, każda moc powyżej progu SRB będzie odbita z powrotem.

Poza ograniczającym (pod względem maksymalnej dozwolonej mocy pobudzającej system) wpływem na rozgałęzione systemy transmisyjne krótkodystansowe, rozpraszanie stymulowane może wpływać destrukcyjnie na telekomunikacyjne systemy dalekosiężne, szczególnie te które stosują zwielokratniający system podziału falowego WDM. W systemach WDM o dużej ilości kanałów np. 32, 64 rozseparowanych o 100GHz, kanały o najdłuższych falach mogą znajdować się wewnątrz spektrum wzmocnienia Ramana kanału o najkrótszej fali.

W światłowodowych systemach teletransmisyjnych o gęstym zwielokrotnieniu falowym zaczyna być wykorzystywane pasmo długofalowe trzeciego okna transmisyjnego (tzw. pasmo L) obejmujące długości fal od 1600 do 1625 nm. Moc w kanale o dużej długości fali może zostać wzmocniona poprzez proces wzmocnienia Ramana na koszt utraty mocy kanału o krótszej fali działającego jako sygnał pompy. To wzmocnienie Ramana może prowadzić do pogorszenia parametrów systemu lub w ogóle do utraty właściwości transmisyjnych poprzez gwałtowne narastanie przesłuchów międzykanałowych i silne malenie mocy sygnału optycznego w kanałach pompujących. W związku ze zbliżaniem się gęstości mocy pompującej światłowodowe systemy transmisyjne, dystrybucyjne (rozgłoszeniowe) krótkodystansowe i dalekosiężne teletransmisyjne do poziomów progowych rozpraszania stymulowanego, istotne jest aby projektanci systemów brali pod uwagę istnienie efektów nieliniowych w światłowodach i możliwość, w pewnych warunkach, ich szkodliwego oddziaływania. W tym zakresie konieczne są odpowiednie pomiary poziomów gęstości mocy progowej zjawisk nieliniowych w światłowodach transmisyjnych i właściwości spektralne zjawisk nieliniowych.

Proces wzmacniania ramanowskiego może być wykorzystany pozytywnie w technice światłowodowej, jako podstawa działania światłowodowych wzmacniaczy ramanowskich. Wzmacniacze te mogą służyć w drugim oknie transmisji światłowodowej, w paśmie ok. 1300 nm. W celu ich stosowania konieczne są dokładne pomiary spektralne wzmocnienia ramanowskiego w światłowodach stosowanych w takich wzmacniaczach.

15.3.1. Pomiary Stymulowanego Rozpraszania Brillouina w Światłowodzie

Stymulowane rozpraszanie Brillouina w światłowodach jednomodowych charakteryzuje się efektywnym transferem mocy z fali propagowanej w jednym kierunku do fali w kierunku przeciwnym. Fala pompy generuje fluktuacje współczynnika załamania wewnątrz rdzenia światłowodu poprzez proces elektrostrykcji. Takie fluktuacje współczynnika załamania działają jak siatka dyfrakcyjna Bragga poruszająca się wprzód z prędkością akustyczną. Konsekwencją tego ruchu siatki dyfrakcyjnej jest, że wstecznie rozproszona fala Stokesa jest przesunięta dopplerowsko w kierunku mniejszych częstotliwości, w porównaniu z falą propagowaną wprzód.

Brillouenowskie przesunięcie częstotliwości fali Stokesa jest oznaczane jako v_B i wynosi typowo ok. 10 GHz dla światłowodu. Wielkość przesunięcia jest zdeterminowana przez prędkość poruszania się akustycznej siatki dyfrakcyjnej wzdłuż światłowodu i dlatego jest zależna od mechanicznych właściwości światłowodu takich jak: współczynnik elasto – optyczny, zastosowane naprężenia zewnętrzne i wewnętrzne oraz także od temperatury zewnętrznej. Przesunięcie częstotliwości zależy także od parametrów technologicznych światłowodu takich jak poziomy domieszkowania szkła kwarcowego w rdzeniu i w płaszczu. Współczynnik wzmocnienia fali rozproszonej wstecz w światłowodzie $g_B(v)$ jest często wyrażany w przybliżeniu przez funkcję Lorenza separacji częstotliwościowej pomiędzy falami pompy i Stokesa centrowanej dla wartości v_B. Funkcja ta wyrażona jest zależnością [45]:

$$g_{B}(v) = g_{SRB} \left(1 + \left[(v - v_{B}) / (\Delta v_{B} / 2) \right]^{2} \right)^{-1}$$
(15.7)

gdzie: g_{SRB} – maksymalna wartość współczynnika wzmocnienia Brillouina wyrażona w [m/W], v – przesunięcie częstotliwości od częstotliwości pompy w [Hz], Δv_B – szerokość w połowie wysokości (FWHM) spektralnej krzywej wzmocnienia w [Hz].

Parametr FWHM krzywej wzmocnienia jest typowo rzędu dziesiątków MHz. Na przykład dla światłowodu ze szkła kwarcowego i fali pompy λ =1550 nm wynosi 35 MHz. Doświadczalnie potwierdzono, że przybliżenie krzywej wzmocnienia funkcją Lorenza jest spełnione dla małych wartości mocy pompy, tzn. aż do poziomu progowego SRB. Powyżej progu krzywa ta podlega ewolucji kształtu, zawęża się i zbliża kształtem do krzywej Gaussa, wraz ze wzrostem mocy ciągłej fali pompy. W celu oddania tych zjawisk obserwowalnych doświadczalnie przyjęto następujący kształt krzywej wzmocnienia Brillouina [30]

$$g_B(v) = g_{SRB} \left\{ C / [1 + [(v - v_B) / (\Delta v_B / 2)]^2 \right\} + (1 - C) \exp[-\ln 2(v - v_B)^2 / (\Delta v_B / 2)^2] \right\}$$
(15.8)

gdzie: C jest stałą definiującą wzajemne proporcje pomiędzy funkcjami Lorenza i Gaussa posiadającymi wpływ na kształt krzywej wzmocnienia.

Krzywa wzmocnienia zależy również od czasowej szerokości impulsów pompy. Dane pomiarowe pokazują, że szerokość spektralna rozproszenia Brillouina wzrasta z maleniem szerokości impulsu od pracy quasi CW do warunku czasu życia fononów, czyli ok. 10 ns. Pomiary z impulsami pompy krótszymi niż 5 ns pokazały, że wartość Δv_B ulega zawężeniu z powrotem do wartości przy pracy ciągłej pompy (CW).

Maksymalna wartość współczynnika wzmocnienia Brillouina g_{SRB} zależy od materiałowych właściwości światłowodu, spektralnej szerokości pompy, oraz sposobu modulacji sygnału. Dla pompy o szerokości spektralnej Δv_P (FWHM), szczytowa wartość współczynnika załamania jest dana przez zależność [10,33]:

$$g_{SRB} = \left(\frac{4\pi n^8 p_{12}^2}{c\lambda_P^3 \rho_o v_B \Delta v_B}\right) \left(\frac{\Delta v_B}{\Delta v_B \otimes \Delta v_P}\right)$$
(15.9)

gdzie: n – jest średnim współczynnikiem załamania rdzenia światłowodu, p₁₂ – jest bezwymiarowym wzdłużnym współczynnikiem elasto-optycznym materiału rdzenia światłowodu, c – prędkość światła w próżni w m/s, ρ_o – gęstość materiału rdzenia w kg/m³, v_P – środkowa częstotliwość fali pompy w Hz. Symbol \otimes reprezentuje konwolucję krzywych spektralnych sygnału pompy i sygnału rozproszenia Brillouina. Dla profili gaussowskich konwolucja jest równa: $\Delta v_B \otimes \Delta v_P = (\Delta v_B^2 + \Delta v_P^2)^{1/2}$, podczas gdy, dla częściej używanego przybliżenia funkcją Lorenza jest równa: $\Delta v_B \otimes \Delta v_P = \Delta v_P + \Delta v_P$.

W literaturze przedmiotu [30-45] można znaleźć wiele różnych definicji progowej mocy pompy dla zjawiska SRB w światłowodzie włóknistym, np.:

- 1. wejściowa moc optyczna dla której pojawiająca się fala wsteczna osiąga moc fali wejściowej;
- 2. wejściowa moc optyczna dla której fala wsteczna ma moc fali transmitowanej;
- 3. wejściowa moc pompy dla której moc rozproszona wstecznie zaczyna gwałtownie wzrastać, co jest równoważne dla gwałtownego spadku transmitowanej mocy pompy;
- 4. wejściowa moc dla której moc rozproszona wstecznie na wejściu włókna optycznego jest równa 1% wejściowej mocy pompy w tym punkcie.

Pierwsza definicja wydaje się niepraktyczna, ponieważ zakłada istnienie punktu w którym moc rozproszona wstecz ze światłowodu zaczyna przekraczać moc wprowadzaną do włókna. Ta definicja basuje na założeniu, że fala rozproszona wstecznie jest budowana wskutek wzmocnienia spontanicznego szumu w światłowodzie. W praktyce pomiarowe wartości progu SRB są podawane przy pomocy definicji drugiej lub trzeciej. Wartości pomiarowe są zazwyczaj porównywane z teoretycznymi przy pomocy następującej zależności (która została wyprowadzona na podstawie definicji pierwszej):

$$P_{th} = 21 \frac{K_{SRB} A_{eff}}{g_{SRB} L_{eff}}$$
(15.10)

 A_{eff} – jest powierzchnią efektywną modu, czynnik K_{SRB} jest odpowiedzialny za wpływ polaryzacji fali oraz L_{eff} jest efektywną długością włókna optycznego określoną przez:

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha \qquad (15.11)$$

gdzie: α jest tłumieniem światłowodu w neperach na km. Zakłada się, że współczynnik tłumienia α jest jednakowy dla fal pompy i Stokesa, ponieważ są one bardzo blisko położone od siebie w dziedzinie częstotliwości. Równanie na moc progową P_{th} zakłada również, że krzywa współczynnika wzmocnienia Brillouina posiada kształt funkcji Lorenza – założenie które jest ważne w zakresie małosygnałowym pracy układu.

Wartość współczynnika polaryzacyjnego K_{SRB} zależy od polaryzacji pompy i fal Stokesa i przyjmuje wartość pomiędzy 1 i 2. Wartość czynnika polaryzacyjnego K_{SRB} jest minimalizowana dla impulsów pompy i próbkujących, które są jednakowo spolaryzowane wzdłuż całej długości włókna optycznego. Dla fali całkowicie zdepolaryzowanej, przyjmuje się wartość 1,5, a dla konwencjonalnych włókien 2. Choć równanie na moc progową ze współczynnikiem 21 jest szeroko stosowane do obliczeń, ostatnie rekomendacje ITU, podane po międzynarodowych eksperymentach porównawczych w ramach programu COST, podają wartość tego współczynnika jako 19. Wartość tego współczynnika przyjmuje się także jako 18, co zależy od przyjętej definicji mocy progowej. Definicje 1 i 4 mają przewagę nad definicją 2 (oraz 3 jeśli wskaźnikiem jest transer mocy pompy) przy pomiarach progu SRB. Jeśli próg SRB jest zdefiniowany wyłącznie przy pomocy sygnałów wejściowego i rozproszonego, to konieczny jest pomiar dwóch bezwzględnych wartości mocy optycznej. Gdy w definicji jest moc transmitowana, konieczne są trzy pomiary.

Współczynnik wzmocnienia Brillouina gB składa się z trzech zasadniczych parametrów przesunięcie częstotliwościowe v_B \cong 10 GHz, szerokość spektralna $\Delta v_B \cong$ 40 MHz, oraz szczytowe wzmocnienie $g_{SRB} \cong 5*10^{-11}$ m/W. Pomiary przesunięcia częstotliwościowego stają się coraz ważniejsze jako jedna z technik pomiarowych rozłożonych wartości temperatury i naprężenia wzdłuż światłowodu. Szerokość spektralna i maksymalne wzmocnienie widma Brillouina odgrywają zasadniczą rolę w określeniu progu SRB w warunkach dowolnego spektrum pompy i są dlatego obecnie podstawowym zagadnieniem metrologicznym dla telekomunikacji światłowodowej. Istnieją techniki pomiarowe do jednoczesnego wyznaczania wartości v_B oraz Δv_B jednak potrzebna jest tutaj duża rozdzielczość pomiaru częstotliwości rzędu pojedynczych Mhz do dokładnego określenia szerokości spektralnej. Zasadniczo stosuje się obecnie w praktyce trzy techniki pomiarowe w celu dokładnej charakteryzacji rozpraszania Brillouina w światłowodzie: interferometria Fabry - Perota, metoda dwukierunkowej próbkującej pompy impulsowej, technika samo - heterodynowania.

Ogólny schemat blokowy systemu pomiarowego do badania rozproszonej wstecz fali Stokesa z zastosowaniem interferometru Fabry – Perota przestawiono na rysunku 15.3. Detektory 1 i 2 służą do pomiaru mocy wprowadzanej i rozproszonej wstecznie. Zastosowano optyczny izolator w celu odcięcia wpływu światła rozproszonego wstecz na źródło światła. Pomiary SRB w światłowodach rozpoczęto od stosowania etalonu F-P w celu określenia przesunięcia częstotliwościowego. Rozdzielczość etalonu nie była dostateczna aby zmierzyć kształt krzywej wzmocnienia a jedynie określić wartość przesunięcia częstotliwości. Było to 32GHz dla długości fali pompy 536nm.



Rys. 15.3. Schemat blokowy układu pomiarowego do badania rozproszenia wstecznego Brillouina w światłowodach.

Ostatnio do pomiaru przesunięcia częstotliwości Brillouina zastosowano interferometr F-P o swobodnym zakresie widmowym 9,7GHz i dobroci 195 [Stolen, 72]. Minimalna rozdzielczość widmowa tego urządzenia wynosiła $\Delta v_{FP} = 50$ MHz, nieco więcej niż oczekiwana wartość v_B, którą należało zmierzyć. Częstotliwość transmisji etalonu F-P v_{FP} była skanowana, aż określono maksimum sygnału przechodzącego przez urządzenie dla v_{FP} = v_B. Szczytowa moc przechodząca przez F-P była równa mocy rozproszonej wstecznie, gdyż Δv_{FP} > Δv_{RB} . Pomiary krzywej wzmocnienia Brillouina zostały przeprowadzone w pełni z zastosowaniem interferometru F-P z tzw. "superwnęką" rezonansową o parametrach FSR= 6Ghz, Q=10⁴ [Gaeta, Boyd, 91]. Minimalna rozdzielczość pasmowa tego urządzenia była 0,6MHz, co jest wartością dostateczną w celu pomiaru kształtu spektralnej krzywej wzmocnienia oraz badania zawężania tej charakterystyki i zmiany jej kształtu wraz ze wzrostem mocy pompy o pracy ciągłej z 6mW do 66mW dla konwencjonalnego światłowodu jednomodowego o długości 500m. Zalety tej metody pomiaru: względnie prosta konstrukcja i działanie aparatury. Wady: rozdzielczość kilku MHz jest nietypowym parametrem interferometru F-P, wymaga to zastosowania specjalnej konstrukcji.

Technika impulsowej pompy próbkującej odnosi się do takich metod, gdzie pomiar wzmocnienia Brillouina dla fali ciągłej dokonywany jest przy pomocy impulsów pompy poruszających się w światłowodzie w obu kierunkach. Te metody mogą być używane do rozłożonych pomiarów przesunięcia częstotliwościowego Brillouina, jeśli impulsy pompy są zawężone do takiego stopnia, że droga oddziaływania pomiędzy falami pompy a próbkującą jest rzędu kilku metrów [Horiguchi, 94]. Dla dłuższych impulsów oddziaływanie może przekroczyć długość światłowodu i może być mierzone średnie wzmocnienie Brillouina.

Technika pompy próbkującej została zastosowana ostatnio [Bao, 99] w celu pomiaru zmiany szerokości widmowej wzmocnienia Brillouina w funkcji zmiany szerokości impulsu pompy pomiędzy 1 ns oraz 100 ns. Zastosowany laboratoryjny system pomiarowy przedstawiono schematycznie na rys. 15.4. Dwa lasery wąskopasmowe o fali ciągłej 1320 nm Nd:YAG zostały zastosowane jako źródła sygnałów pompy i sygnałów próbkujących. Impulsowy sygnał pompy uzyskiwano poprzez zastosowanie modulatora elektrooptycznego. Separacja częstotliwościowa

pomiędzy oboma laserami była zmienna i kontrolowana do 1Hz poprzez zastosowanie detekcji heterodynowej i pętli fazowej.



Rys. 15.4. Schemat blokowy laboratoryjnego układu pomiarowego do badania współczynnika wzmocnienia Brillouina w światłowodzie jednomodowym metodą pompy i próbki z zastosowaniem osobnych źródeł pompującego i próbkującego. MEO –modulator elektrooptyczny;

Sygnały pompy i próbkujący były wprowadzane do światłowodu z przeciwnych końców. Mierzono moc w rozprzestrzeniającym się w przód sygnale próbkującym na pompowanym wejściu włókna. Gdy sygnał pompy był nieobecny, oczekiwano że sygnał próbkujący będzie doznawał jednorodnych strat spowodowanych rozpraszaniem Rayleigha i absorpcją. Wyjście z detektora 2 jest dlatego stałe. Gdy impuls pompy jest wprowadzony do światłowodu, propaguje w przeciwnym kierunku do fali próbkującej i wzmacnia ją poprzez proces spontanicznego wzmacniania Brillouina. Wzmocnienie procesu zmienia się wzdłuż światłowodu, ponieważ przesunięcie Brillouina $\Delta v_{\rm B}$ zmienia się z długością z powodu warunków mechanicznych jak naprężenia i temperatura. Zmienny w czasie sygnał próbkujący z detektora 2 może być analizowany w celu budowy mapy wzmocnienia Brillouina dla przesunięcia częstotliwościowego vpróbki - vpompy występującego wzdłuż włókna optycznego. Poprzez przestrajanie tego przesunięcia częstotliwościowego i powtarzanie pomiarów, krzywa wzmocnienia Brillouina może być mapowana wzdłuż światłowodu z rozdzielczością określoną przez szerokość impulsu pompy. Zalety metody: charakterystyka widmowa wzmocnienia może być określona z rozdzielczością ograniczoną parametrami pętli fazowej (tzn., jej rozdzielczością i pasmem); pozwala na rozłożone pomiary, obecnie o rozdzielczości rzędu kilkudziesięciu cm. Wady metody: dokonuje się bezpośredniej detekcji fluktuacji współ-propagującej fali ciągłej pompy niż sygnału rozproszonego wstecz; pomiary w dziedzinie czasu wymagają szybkich układów próbkująco pamiętających (zastosowano układ 4 gigapróbki/s).

Inne rozwiązanie metody pompująco próbkującej przedstawiono w pracy [Thevenaz, Nickles, 94,96]. Pojedynczy laser Nd:YAG o mocy 150mW i długości fali 1,32 μ m, szerokości widma $\Delta v_P = 20$ kHz zastosowano jako generator sygnału pompy i próbkującego. Zestaw pomiarowy przedstawiono na rysunku 15. 5.



Rys. 15.5. Schemat blokowy systemu laboratoryjnego do pomiaru charakterystyki widmowej wzmocnienia Brillouina we włóknie optycznym z zastosowaniem szerokopasmowego modulatora elektrooptycznego (MEO) z LiNbO₃.IO – izolator optyczny.

W układzie pomiarowym na rys.15.5. zastosowano szerokopasmowy modulator natężenia światła na niobianie litu. Modulator generuje i przestraja pasma boczne fali pompy, tak aby pasmo boczne o niższej częstotliwości wypadło wewnątrz pasma wzmocnienia Brillouina dla sygnału fali nośnej. Wyższa wstęga boczna może być stłumiona stosując filtr wąskopasmowy (jeśli to konieczne) pozostawiając w układzie główny sygnał pompy i poruszający się w przeciwnym kierunku sygnał dolnej wstęgi bocznej. Wstęga boczna jest wzmacniana poprzez proces wzmocnienia Brillouina wewnątrz włókna. Spektrum wzmocnienia Brillouina może być obliczone z mierzonego wzmocnienia w funkcji przestrajania częstotliwości modulatora. Jeśli można założyć, że straty sygnału pompy są pomijalne w czasie interakcji z próbką, to analiza zmierzonego wzmocnienia jest uproszczona poprzez aproksymację niezmienionego sygnału pompy. Zakładając, że natężenie fali pompy nie jest znacznie zredukowane wzdłuż badanego światłowodu, współczynnik wzmocnienia Brillouina g_B(v), dla różnicy częstotliwości v może być określony z [Thevenaz, 94]: $I(L,v) = 2I(0,v)\cosh(g_B(v)I_PL_{eff})$, gdzie I(L,v) – jest zmierzonym natężeniem sygnału próbkującego dla częstotliwości v po wzmocnieniu Brillouina we włóknie optycznym o długości L. I(0,v) - jest natężeniem sygnału próbkującego przed wzmocnieniem, IP - jest natężeniem fali pompy. Wartości natężeń w tym równaniu muszą być obliczone z pomiarów mocy optycznej wykonanych dla każdego końca testowanego światłowodu. Moc musi być dzielona przez powierzchnię efektywną Aeff.

Pomiary mocy mogą być wykonane przy pomocy sprzęgaczy światłowodowych na wejściu i wyjściu badanego włókna optycznego. Wyjścia takich sprzęgaczy są podłączone do mierników mocy optycznej. Mierzone wartości muszą być doprowadzone do postaci wielkości absolutnych a nie względnych. Do obliczenia współczynnika wzmocnienia Brillouina konieczne są bezwzględne wartości mocy optycznej. Wartość bezwzględną mocy można uzyskać metodą odcięcia końca włókna z obu stron i pomiar mocy wejściowej z obu stron światłowodu.

Przy pomiarach rozłożonych korzysta się tylko z jednego końca światłowodu i impulsowa pompa i sygnał próbkujący są stosowane w celu skanowania rejonu oddziaływania wzdłuż włókna. Impulsy próbkujące poruszające się w kierunku przeciwnym są wytwarzane w wyniki odbicia Fresnela od odległego zakończenia światłowodu. Sygnały pompujący i próbkujący są generowane ze zmiennym opóźnieniem czasowym, poprzez odpowiednie sterowanie pracą modulatora przy pomocy sygnału impulsowego i składowej stałej. Zaletą pomiarów impulsowych, nawet w przypadku kiedy dane rozłożone nie są potrzebne, jest że interakcja pomiędzy pompowaniem i
próbkowaniem jest ograniczona przestrzennie.. Dlatego łatwiej jest zapewnić warunek nie nadmiernego obciążania sygnału pompy i przyjąć przybliżenie niezmiennej wartości sygnału pompy. Zalety metody: wymaga pojedynczego źródła, rozdzielczość pomiarów spektrum wzmocnienia jest rzędu setek kHz, możliwy bardzo dokładny pomiar rozkładu naprężeń w światłowodzie, przy dostępie tylko do jednego końca włókna. Wady: wymagane zastosowanie modulatora ultraszerokopasmowego, wymagany laser dużej mocy o fali ciągłej, straty wtrącenie modulatora elektrooptycznego są wysokie, rzędu 4–5 dB.

Jeśli fale Stokesa generowane przez rozpraszanie Brillouina mogą być heterodynowane z falą pompy lub falą o podobnej częstotliwości, wówczas możliwe jest zastosowanie analizy spektralnej sygnałów elektrycznych a nie optycznych. Zaletą jest większa rozdzielczość widmowa. Typowy układ pomiarowy z heterodynowaniem przedstawiono na rys. 15.6.



Rys. 15.6. Schemat blokowy laboratoryjnego zestawu pomiarowego do analizy fali wstecznego rozproszenia Brillouina z heterodynową analizą fali świetlnej rozproszonej wstecz [Shiraki, 95]. EDFA – światłowodowy wzmacniacz erbowy

Źródło laserowe musi mieć szerokość spektralną mniejszą niż szerokość spektralna wzmocnienia Brillouina. Używa się do pomiarów laserów Nd:YAG lub lasera półprzewodnikowego DFB z zewnętrznym rezonatorem. Spektrum mocy sygnału dudnienia pomiędzy oscylatorem lokalnym i sygnałem rozproszenia wstecznego jest mierzone, bez przestrajania długości fali lasera źródłowego. Mierzone są jedynie względne częstotliwości pompy i fal Stokesa, więc technika pomiarowa jest bardziej odporna na dryft częstotliwości źródła niż metody z etalonem F-P i metoda pompy i próbki.

Próg dla SRB we włóknie optycznym może być obliczony z widma wzmocnienia, ale zazwyczaj jest mierzony bezpośrednio w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 15.7. [45]. Moc optyczna wprowadzana do światłowodu musi być zmienna w granicach obejmujących próg procesu SRB. Zachodzi to typowo w granicach 10 - 20 mW, ale zależy od długości światłowodu i szerokości spektralnej źródła.



Rys. 15.7. Schemat blokowy laboratoryjnego układu pomiarowego do badania stymulowanego rozpraszania Brillouina w światłowodzie [45,46].PDL – przestrajana dioda laserowa;

Na rysunku 15.7. sygnał wyjściowy z przestrajanej diody laserowej jest wzmacniany przy pomocy wzmacniacza optycznego i poziom jest regulowany przy pomocy zmiennego tłumika, w celu otrzymania mocy pobudzających pomiędzy 0 – 50 mW. Mierniki mocy optycznej mierzą moc wejściową, transmitowaną i rozproszoną wstecz w funkcji mocy wejściowej. Z pomiarów mocy optycznej, określa się próg SRB stosując jedną z definicji.

Przykłady pomiarów mocy optycznej wykonanych w laboratorium NPL [45,46] w czasie których badano SRB w światłowodzie 10 kilometrowej długości przedstawiono na rys.15.8. Rysunek 15.9. przedstawia bardziej dokładnie te same dane dla małych wartości mocy wejściowej, poniżej kilkunastu mW. Dla mocy wejściowej poniżej ok. 20mW, rozproszona wstecz moc optyczna rośnie początkowo liniowo z mocą pobudzającą z powodu odbicia Fresnela na końcu światłowodu. Ja k moc pobudzająca zbliża się do progu SRB, moc rozproszona wstecz wzrasta gwałtownie i zużywana jest na to moc pompy. Poza progiem, transmitowana moc optyczna jest ustalona i nadmiar mocy jest transferowany do fali rozproszonej wstecz. Próg SRB może być oszacowany z takich danych eksperymentalnych stosując jedną z cytowanych definicji. Używając definicji numer 2, próg SRB wynosi w przybliżeniu 22 mW. Definicja 4 daje wartość znacznie niższą około 9 mW [45].



Rys. 15.8. Moc optyczna transmitowana i rozproszona wstecz w funkcji mocy pobudzającej dla 10 km odcinka światłowodu jednomodowego z dopasowanym płaszczem [46].



Rys. 15.9. Moc rozproszona wstecz jako funkcja mocy pobudzającej dla światłowodu 10 km długości o dopasowanym płaszczu. Krzywe z początkowej części wykresu na rys 15.8, tzn. dla małych poziomów mocy pobudzającej.

Dla określonego światłowodu, próg SRB, zdefiniowany przez równanie $P_{th}=21K_{SRB}A_{eff}/g_{SRB}L_{eff}$, jest zależny od względnych szerokości spektralnych sygnału pompy

szerokości Brillouina poprzez maksymalną wartość wzmocnienia Brillouina g_{SRB}. Zasadniczą dla pomiarów sprawą jest znajomość szerokości spektralnej źródła pompy. Szerokość spektralna źródła pompy powinna być znacznie mniejsza niż szerokość spektralna Brillouina. W przeciwnym przypadku zmierzona wartość progowa mocy jest fałszywa. Ten warunek wymaga zastosowania kalibrowanego źródła o ściśle znanych charakterystykach spektralnej źródła należy wziąć pod uwagę jego charakterystyki modulacyjne dotyczące natężenia, fazy, częstotliwości. Do pomiaru poziomu SRB, szerokość spektralna źródła powinna być rzędu dziesiątków MHz lub mniejsza, zależnie od długości światłowodu i mocy źródła [45]. Równanie na moc progową P_{th} zakłada. Że moc pompy posiada rozkład spektralny wg. Funkcji Lorenza. System pomiarowy źródła dla badania rozpraszania Brillouina powinien mieć możliwość dokładnego pomiaru kształtu charakterystyki spektralnej i możliwości potwierdzenia tego założenia.

Trudności z pomiarem spektrum optycznego o szerokości rzędu MHz związane są z brakiem dostatecznej rozdzielczości w optycznych analizatorach spektrum. Typowo graniczną rozdzielczością są GHz. Detekcja heterodynowa może być zastosowana do rozszerzenia zakresu rozdzielczości do wartości wymaganej i dostępnej dla klasycznych elektronicznych analizatorów widmowych. Zapewnienie odpowiedniego lokalnego oscylatora może stanowić trudność dla dowolnych długości fali pompy. Detekcja z opóźnionym samo-heterodynowaniem jest jedną z metod próbujących rozwiązać ten problem [47]. Ta technika została zastosowana zapewniając rozdzielczość 50kHz dla pompy o długości fali 840 nm w celu zmierzenia 20kHz widmo lasera Nd:YAG z falą ciągłą pracującego na 1300 nm [Aoki, 87].

Polaryzacja fali pompy i charakterystyki utrzymywania stanu polaryzacji we włóknie optycznym mają wpływ na próg SRB poprzez stałą K_{SRB}. Oddziaływanie SRB jest maksymalizowane dla fal Stokesa i pompy o równoległych polaryzacjach [vanDeventer, 94]. W przypadku gdy SRB powstaje z szumu w światłowodzie, poniżej poziomu światło rozproszone wstecz jest w przybliżeniu w połowie spolaryzowane prostopadle i równolegle do pompy. Po przekroczeniu progu SRB stopień polaryzacji światła rozproszonego wstecz wzrasta do 100%, i polaryzacja fali dopasowuje się całkowicie do pompy. W celu uniknięcia zależności wyniku pomiaru procesu SRB od stanu polaryzacji, polaryzacja pompy powinna być przypadkowa, jeśli nie można jej utrzymać w ściśle określonym stanie w obszarze oddziaływania. Pomiary w stanie depolaryzacji posiadają przewagę, że unika się zależnych od polaryzacji strat w dzielnikach mocy i cyrkulatorach.

Efektywna długość drogi nieliniowego oddziaływania w światłowodzie nie jest liniowo proporcjonalna do rzeczywistej długości światłowodu, ale jest określona przez równanie $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$. Próg SRB jest zależny od długości włókna i jego współczynnika tłumienia. Równanie na P_{th} przewiduje, że początkowo próg SRB maleje ze wzrostem długości włókna optycznego, ale potem dąży asymptotycznie do stałej wartości. Długość światłowodu wymagana dla osiągnięcia tej wartości asymptotycznej wzrasta dla światłowodów o mniejszych stratach. Rysunek 15.10. przedstawia to zachowanie światłowodu.



Rys. 15.10. Obliczona wartość progu SRB w funkcji długości fali dla światłowodów o różnych tłumiennościach [45].

Próg SRB został obliczony dla światłowodu o $A_{eff} = 500 \ \mu m^2$, $g_{SRB} = 4,6* 10^{-11} \ m/W$, $K_{SRB} = 2$, $\Delta v_B = 40 \ MHz$, $\Delta v_P = 100 \ kHz$, i tłumienia $\alpha = 0,2 \ dB/km$ oraz 0,4 dB/km. Dla pompy z falą ciągłą o wąskim widmie i całkowicie zdepolaryzowanej, przewiduje się asymptotyczną długość na ok. 100 km dla światłowodu o tłumienności 0,2dB/km. Poziom progowy mocy obliczono na 48mW dla długości 1 km i na 2mW dla100 km. Dla typowej długości światłowodu na szpuli, rzędu 20 km, przy tłumienności =0,2dB/km, poziom SRB wynosi ok. 3,5mW, pod warunkiem, że szerokość widmowa pompy jest znacznie mniejsza od szerokości widmowej Brillouina.

Dodatek domieszek do szkła rdzenia światłowodu takich jak german i fluor zmienia wartość przesunięcia częstotliwościowego Brillouina v_B, tzn. wartość częstotliwości Stokesa dla której występuje maksymalne wzmocnienie. Jeśli koncentracja domieszki fluktuuje wzdłuż długości światłowodu, wówczas proces budowy każdej indywidualnej składowej częstotliwościowej fali Stokesa jest mniej wydajna niż dla maksimum ustalonego spektrum wzmocnienia. Próg SRB jest zasadniczo określony przez narastanie częstotliwości Stokesa o największym wzmocnieniu, i dlatego zmiana przesunięcia Brillouina powiększa próg SRB. Badania teoretyczne pokazały, że zmiana progu SRB indukowana przez przesunięcie częstotliwości wzdłuż światłowodu zależy od kształtu rozłożenia przesunięcia Brillouina wzdłuż włókna i nie jest po prostu związana z maksymalną wartością tych zmian [Shiraki, 96].Zmiany w pobliżu pompowanego zakończenia światłowodu mogą mieć większe znaczenie niż na końcu przeciwnym. To może prowadzić do pomiarów zależności progu SRB w zależności od kierunku fali pompy.

Szerokość spektralna i kształt krzywej wzmocnienia Brillouina Δv_B nie są stałe ale zależą od mocy fali pompy i szerokości impulsu pompy. W celu umożliwienia obliczenia progu SRB dla dowolnego sygnału pompy, konieczne są pełne charakterystyki zależności szerokości spektralnej Brillouina od mocy pompy i szerokości spektralnej pompy. Zawężanie szerokości spektralnej z powodu wzrastającej mocy pompy staje się ważne powyżej progu. Pomiary są zazwyczaj wykonywane przy pomocy pompy CW w celu redukcji niepewności dotyczących pomiaru mocy optycznych. Dlatego można założyć, że przy pomiarach w falą ciągłą, dla mocy poniżej i w okolicach progowej, Δv_B jest stałe.

Zastosowanie złączy światłowodowych o powierzchniach nie prostopadłych do osi długiej światłowodu w systemach światłowodowych dużej mocy może zwiększyć niepewność odnośnie bezwzględnych pomiarów mocy wykonywanych komercyjnymi miernikami mocy. Skośne złącza światłowodowe są używane w celu redukcji dużej wartości mocy wstecz, i destabilizacji warunków pracy źródła. Nie ma gwarancji, że detektor optyczny w komercyjnym światłowodowym mierniku mocy będzie w pełni pobudzony przez rozkład mocy optycznej opuszczającej skośnie ucięty światłowód. Niepewność bezwzględnych wartości mocy optycznych ze światłowodów z półzłączem mierzonych we wzorcowych laboratoriach jest rzędu 0,5% [45]. Ocenia się, że pomiary przy pomocy nie przystosowanego sprzętu zwiększa tą niepewność do ok. 2%, w przypadku zastosowania złączy ze światłowodowym skośnie zakończenie światłowodu bezpośrednio jak najbliżej znacznej powierzchni fotodiody. Nie pożądane jest stosowanie pośredniczącego układu optycznego.

Rekomendacje ITU dotyczące pomiarów progu SRB stosują definicję, moc pompy przy której moc transmitowana w światłowodzie na wyjściu jest równa mocy wyjściowej rozproszonej wstecz. Odpowiada to definicji 2. Jednocześni w tych rekomendacjach obliczenia P_{SRB} są rekomendowane wg definicji 1. Typowo dane pomiarowe w literaturze prezentowane są dal mocy transmitowanej i rozproszonej wstecz w światłowodzie, więc można obliczyć wartość progu i porównać z danymi doświadczalnymi.

W literaturze pokazano, zarówno teoretycznie jak i eksperymentalnie, że krzywa wzmocnienia Brillouina zależy silnie od mocy i szerokości spektralnej źródła. Gdyby tak nie było, krzywa wzmocnienia Brillouina byłaby najkorzystniejszym pomiarem dla procesu SRB, ponieważ wzmocnienie i poziom progowy SRB mogą być określone z $g_B(v)$ dla każdego widma źródła. Jednakże pomiar współczynnika wzmocnienia jest procesem skomplikowanym i w rzeczywistości nie da się uniknąć zależności od źródła.

Poziom progowy SRB może być obliczony ze zmierzonej krzywej wzmocnienia Brillouina, ale zależy to także od charakterystyk źródła. Lorenzianowski kształt krzywej wzmocnienia spontanicznego rozproszenia Brillouina ewoluuje w kształt gaussowski ze wzrostem mocy pompy do poziomu progowego SRB. Szerokość krzywej wzmocnienia zmniejsza się ze wzrostem mocy pompy. Jeśli fala pompy jest impulsowa a nie ciągła, wówczas szerokość spektralna jest również zależna od czasu trwania impulsu, zakładając maksymalną wartość szerokości impulsu na 10 ns. Pomiary współczynnika wzmocnienia Brillouina mają tylko sens wtedy, gdy warunki pracy światłowodu w systemie są bardzo podobne do warunków pomiarowych, lub odwrotnie. Na razie nie mogą mieć charakteru pomiarów ogólnych, ze względu na niedostateczną standaryzację sygnałową systemów światłowodowych [45].

W czasie pomiarów progu SRB konieczna jest znajomość szerokości spektralnej stosowanego źródła. Dla źródeł o $\Delta v_P \ll \Delta v_B$, szczegółowa wartość szerokości spektralnej jest mniej ważna i poziom progowy SRB jest efektywnie nie zależny od Δv_P . Gdy szerokość spektralna źródła zbliża się do szerokości spektralnej Brillouina, współczynnik wzmocnienia jest redukowany i mierzona wartość progowa wzrasta. Asymptotyczna wartość pomiarowa progu dla małych szerokości spektralnych źródła jest zgodna z wartością teoretyczną P_{th}. Pomiary SRB powinny być ograniczone głównie do stosowania źródła pompy z falą ciągłą o znanej wąskiej szerokości spektralnej. Konieczne wydaje się opracowanie standardu pomiarowego procesu SRB w światłowodzie jak to się stało w przypadku z pomiarami tłumienności. Możliwe jest opracowanie standardowych włókien o wzorcowym poziomie odniesienia SRB [45].

15.3.2. Pomiary Stymulowanego Rozpraszania Ramana w Światłowodzie

Stymulowane rozpraszanie Rayleigha (SRR) jest podobne do zjawiska SRB. Jest procesem nieelastycznym, w którym energia podlega transferowi do medium, w którym rozprzestrzenia się fala, i generowana jest fala Stokesa o niższej częstotliwości. Niepodobnie do SRB, tutaj fala Stokesa może propagować zarówno w kierunku wprzód jak i wstecz. Interakcja generuje fonony optyczne i różnica energii pomiędzy falami pompy i Stokesa jest większa niż w SRB. Odpowiada to znacznie większemu przesunięciu częstotliwości, rzędu 10THz dla SRR, w porównaniu z 10Ghz dla SRB.

Współczynnik wzmocnienia Ramana $g_R(v)$ jest znacznie mniejszy niż współczynnik wzmocnienia Brillouina i jego wartość określono pomiarowo na ok. $3*10^{-14}$ m/W dla standardowego światłowodu jednomodowego pompowanego falą 1550 nm [Mahgerefteh, 96] [48]. Szerokość spektralna wzmocnienia ramanowskiego szkieł światłowodowych jest także znacznie szersza niż dla SRB. Krzywa wzmocnienia rozciąga się typowo w zakresie ok. 40 THz, zarówno dla próbek szkieł objętościowych jak i światłowodów krzemionkowych. Spektrum wzmocnienia Ramana składa się z głównego piku z kilkoma mniejszymi wartościami maksymalnymi na opadającym ogonie charakterystyki. Typowy przykład krzywej wzmocnienia Ramana przedstawiono na rys.15.11.



Rys. 15.11. Typowa charakterystyka wzmocnienia Ramana w światłowodzie kwarcowym [45].

W literaturze nie można znaleźć funkcjonalnego opisu tej krzywej. Dla celów pomiarowych przyjmuje się, że główna wartość szczytowa posiada największe znaczenie w procesie powstawania fali Stokesa. Zakłada się również, że krzywa wzmocnienia składa się z pojedynczego piku Lorentza [30]. Obliczenia procesu SRR stosują szczytową wartość spontanicznego widma wzmocnienia Ramana g_{SRR}, adaptując ją na wartość wzmocnienia dla rozproszenia stymulowanego SRR. Dla zastosowań w światłowodowych wzmacniaczach Ramana oraz w celu obliczeń przesłuchów w dalekosiężnych systemach WDM, konieczna jest znajomość rzeczywistego kształtu krzywej wzmocnienia Ramana. Współczynnik wzmocnienia Ramana jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali pompy i jest zależny od składu materiału rdzenia, zmieniając się znacznie z rodzajem i koncentracją domieszki [49].

W warunkach stymulowanego rozpraszania Ramana, natężenia pompy i poruszającej się w przód światłowodu fali Stokesa są związane sprzężonymi równaniami natężeń [Agrawal, 95]:

$$dI_{S}(z)/dz = \frac{g_{SRR}}{K_{SRR}}I_{P}(z)I_{S}(z) - \alpha_{S}I_{S}(z)$$
(15.12)

$$dI_P(z)/dz = -\frac{\omega_P}{\omega_S} \frac{g_{SRR}}{K_{SRR}} I_P(z) I_S(z) - \alpha_P I_P(z)$$
(15.13)

gdzie: g_{SRR} – jest maksymalną wartością współczynnika wzmocnienia dla jednakowo spolaryzowanych fal pompy i Stokesa, $I_P(z)$ i $I_S(z)$ są natężeniami fal pompy i Stokesa dla współrzędnej z wzdłuż włókna, wyrażonymi w $[W/m^2]$, ω_P , ω_S – są częstotliwościami kątowymi fal pompy i Stokesa w [rad/s], α_P , α_S – są liniowym współczynnikami tłumienia dla częstotliwości ω_P i ω_S w [neper/m]. K_{SRR} jest czynnikiem zależnym od względnej polaryzacji fal pompy i Stokesa. Wzmocnienie Ramana jest maksymalizowane gdy fale pompy i Stokesa utrzymują jednakowe polaryzacje wzdłuż włókna optycznego. Dla klasycznych światłowodów występuje pewien stopień depolaryzacji i stosowana jest wartość tego współczynnika równa K_{SRR} = 2 [34].

Stosując założenie o nie zmniejszanej mocy pompy, równanie na natężenie fali pompy wzdłuż światłowodu redukuje się do postaci $dI_P(z)/dz=-\alpha_PI_P(z)$, $I_P(z)=I_P(0)exp(-\alpha_Pz)$. Natężenie fali Stokesa po przebyciu drogi L w światłowodzie wynosi [10]:

$$I_{S}(L) = I_{S}(0) \exp\left(\frac{g_{SRR}}{K_{SRR}}I_{P}(0)L_{eff} - \alpha_{S}L\right), \qquad (15.14)$$

gdzie: długość efektywna jest obliczana z zastosowaniem współczynnika tłumienia dla fali pompy. Poziom progowy SRR w przód jest definiowany jako poziom mocy pompy dla którego moce wyjściowego sygnału pompy i fali Stokesa są równe. Poziom, dla światłowodu jednomodowego przybliża się zależnością [29]:

$$P_{th} \cong 16 \frac{K_{SRR} A_{eff}}{g_{SRR} L_{eff}}.$$
(15.15)

Założenia dla równania na moc progową P_{th} są następujące: fala pompy nie jest nadmiernie obciążona przez proces konwersji do fali Stokesa, efektywne powierzchnie światłowodu dla długości fal pompy i Stokesa są jednakowe, wzmocnienie Ramana jest opisane przez krzywą Lorentza, sygnał Ramana jest budowany z rozproszenia spontanicznego a nie wzmacniania sygnału wejściowego.

Gdy rozważana jest fala Stokesa rozproszona wstecz, uzyskuje się analogiczne równanie na moc progową P_{th}, ale współczynnikiem proporcjonalności jest nie 16 lecz 20 [10]. Moc progowa dla rozproszenia wstecznego jest wyższa niż dla rozproszenia wprzód, i rozproszenie wprzód dominuje, nim jakiekolwiek rozproszenie wstecz może być obserwowane. Wzmocnienie Ramana fali rozproszonej wstecz może być obserwowane ponieważ jest ono niezależne od względnych kierunków fal pompy i próbkującej.

Pierwsze pomiary spektrum wzmocnienia we włóknach optycznych były wykonywane z wykorzystaniem impulsowych laserów Xenonowego i Nd:YAG pracujących w zakresie widzialnym dla 526nm i 532nm [Stolen, 72]. Wysokie straty światłowodu dla tych długości fali ograniczały długości efektywne światłowodu do kilku metrów. Wymagało to stosowania mocy pobudzających rzędu kilku W. Podstawowa procedura pomiarowa polegała na pobudzeniu światłowodu pompą i badaniu spektrum wyjściowego przy pomocy pryzmatu. Mierzono względne natężenia składowych częstotliwościowych fali Stokesa. To dawało względny przekrój światłowodu na spontaniczne rozpraszanie Ramana jako funkcję długości fali Stokesa. Nie dawało wartości bezwzględnych. Bezwzględne wartości dla przekroju poprzecznego były określane poprzez zastosowanie tego samego układu pomiarowego do określenia natężenie fali rozproszonej w komórce benzenowej, dla której bezwzględny przekrój poprzeczny rozproszenia był znany. Z bezwzględnej wartości przekroju rozproszenia Ramana był obliczany współczynnik wzmocnienia $g_R(v)$, jako funkcja długości fali Stokesa. Podobna metoda została zastosowana do określenia maksymalnej wartości przekroju Ramana innych szkieł i domieszek do rdzenia światłowodu jak GeO₂, B₂O₃, P₂O₅ względem przekroju rozproszenia dla szkła kwarcowego SiO₂ [49]. Szkło kwarcowe posiada najmniejszą wartość przekroju rozproszenia z tych wszystkich materiałów. Zalety tej metody: prosty układ pomiarowy. Wady: metody impulsowe sprawiają kłopoty w określeniu szczytowych wartości mocy w impulsie, wymaga kalibracji do bezwzględnego odniesienia, nie wygodna dla długości fal telekomunikacji światłowodowej.

Metoda ze skanowaniem impulsowym [48] pomiaru wzmacniania Ramana w światłowodzie polega na zastosowaniu jedno-impulsowego źródła w okolicach długości fal 1550nm. W przeciwieństwie do metody pomiaru względnego przekroju na rozpraszanie, mierzone jest stymulowane rozpraszanie Ramana a nie spontaniczne. Bezwzględne wartości współczynnika wzmocnienia mogą być znalezione bez konieczności stosowania odniesienia. Technika używa laserowej pompy z falą ciągłą i modulatora LiNbO₃ w celu generacji impulsów prostokątnych o czasie trwania w zakresie od 1 ns do 100 ns. Te impulsy generują fale Stokesa wewnątrz włókna optycznego, które propagują wspólnie z falą pompy, ale z różną prędkością grupową, ze względu na dyspersyjne właściwości światłowodu. Niedopasowanie prędkości grupowej powoduje, że impulsy pompy i Stokesa rozchodzą się i w związku z tym droga interakcji SRR jest ograniczona. Długość drogi interakcji może być regulowana poprzez zmianę szerokości impulsów. Układ pomiarowy stosowany w tej metodzie skanowania impulsowego przedstawiono na rys. 15.12



Rys. 15.12. Schemat blokowy zestawu pomiarowego do pomiaru wzmocnienia Ramana w światłowodzie metodą skanowania impulsowego [48].

Średnia moc w impulsie była ustalona na 120 mW dla wszystkich impulsów poprzez pracę wzmacniacza optycznego w stanie nasycenia. Moc szczytowa była także ustalona, rzędu 4W, poprzez utrzymywanie stałego współczynnika wypełnienia, częstotliwości powtarzania i stałej mocy średniej. Stymulowane rozpraszanie Brillouina było tłumione poprzez zastosowanie modulatora fazy na niobianie litu działającego pomiędzy 2 i 3 GHz.

Średnia moc fali Stokesa opuszczająca światłowód dla częstotliwości v była mierzona jako funkcja czasu trwania impulsu. Krzywą pomiarową przybliżano krzywą parametryczną z parametrami w postaci współczynnika wzmocnienia $g_R(v)$ i rozdopasowaniem prędkości grupowych. Maksymalna wartość współczynnika wzmocnienia g_{SRR} obliczona tą metodą zgadzała się z rezultatami innych pomiarów wzmocnienia wykonanych dla tego samego światłowodu. Typowe wartości pomiarowe dla g_{SRR} , określone przy pomocy tej metody były ok. $3*10^{-4}$ [m/W] z bezwzględną wartością niepewności obliczoną na ±5%. Głównym ograniczeniem tej metody jest, że sygnał rozproszony w przód musi być odseparowany od fali pompy na wyjściu światłowodu. Dla składowych fali Stokesa o odległości 3 THz od fali pompy koniecznym było zastosowanie przestrajanego filtra pasmowego przed spektrometrem w celu maksymalizacji czułości. W innym przypadku dokładność wzmocnienia Ramana znacznie maleje w pobliżu długości fali pompy. Nawet z zastosowaniem filtru pasmowo przepustowego nie można było w tej metodzie zmierzyć współczynnika wzmocnienia w odległości mniejszej od 1 THz od sygnału pompy. Zalety metody: bezwzględna wartość współczynnika wzmocnienia może być określona bez potrzeby kalibracji do odniesienia, wymaga pojedynczego źródła, sygnały popy i próbkujący są ko-polaryzowane automatycznie. Wady: wymagany wysoki poziom mocy do osiągnięcia progu SRR, wymagany pomiar mocy impulsowej, choć impulsy stosunkowo długie, dokładność maleje w pobliżu długości fali pompy, ponieważ metoda polega na dyskryminacji pomiędzy falą Stokesa rozproszoną w przód i fala pompy.

Obecnie częstą metodą stosowaną do pomiaru współczynnika wzmocnienia Ramana w światłowodzie jest tzw. metoda wzmocnienia Ramana z falą ciągłą [45]. Podstawowy schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 15.13.



Rys. 15.13. Schemat blokowy układu laboratoryjnego do pomiarów wzmocnienia Ramana w światłowodzie metodą wzmocnienia Ramana z falą ciągłą [45].

Fale pompujące i próbkujące propagują w światłowodzie wzmacniającym w przeciwnych kierunkach i są separowane na każdym końcu włókna przy pomocy optycznych cyrkulatorów OC1 oraz OC2. Fala pompy składa się z wyjścia ze światłowodowego lasera Ramana o szerokości widmowej 1nm na 1455nm – co odpowiada szerokości spektralnej 150 GHz. Próg SRB dla tego światłowodu z tym źródłem wynosi w przybliżeniu 20 W, co znacznie przekracza wartość 870mW, typowo sprzęganą do światłowodu. Konfiguracja systemu pomiarowego z falami propagującymi w

przeciwnych kierunkach uśrednia fluktuacje mocy wysokiej częstotliwości w pompie i również redukuje wymagania na selektywność optyczną w analizatorze spektrum.

W celu pomiaru szerokiego zakresu spektralnego wzmocnienia Ramana, zastosowano przestrajany laser półprzewodnikowy w zakresie 1459 nm – 1580 nm z szerokością spektralną 700 kHz. Względne spektralne pomiary wzmocnienia są prowadzone przez przestrajanie lasera i pomiar mocy wejściowej i wyjściowej we wzmacniającym włóknie przy pomocy analizatora widma. Przykładową zmierzoną charakterystykę widmową wzmocnienia przedstawiono na rys.15.14 [45].



Rys. 15.14. Zmierzona charakterystyka widmowa wzmocnienia Ramana [Imperial College, Londyn],[45]

Krzywa wzmocnienia nie uwzględnia strat wewnątrz wzmacniacza spowodowanych tłumieniem linowym. Straty są mierzone odrębnie dla niskich poziomów mocy w celu uniknięcia efektów nieliniowych. Gdy znana jest charakterystyka spektralna strat wzmacniacza efektywne wzmocnienie wzmacniacza Ramana jest obliczane przez odejmowanie obu krzywych. Efektywne wzmocnienie wzmacniacza Ramana jest odnoszone do współczynnika wzmocnienia Ramana poprzez równanie $I_s(L)$ w postaci:

$$g_{eff}(v) = P_{S}(L,v) / P_{S}(0,v) = \exp\left(\frac{g_{R}(v)P_{P}(0)L_{eff}}{K_{SRR}A_{eff}} - \alpha_{S}L\right).$$
 (15.16)

Równanie zakłada przybliżenie nie obciążania sygnału pompy, a więc jest ważne dla małych poziomów sygnałów tzn. wzmocnienia małosygnałowego. W celu obliczenia współczynnika wzmocnienia Ramana z powyższego równania, trzeba znać powierzchnię efektywną światłowodu A_{eff} , moc pompy pobudzającą światłowód wzmacniający $P_P(0)$, efektywne wzmocnienie i względne polaryzacje fal pompy i Stokesa. Przykłady wielkości tych parametrów z niepewnościami ich określenia przedstawiono w tabeli [45]. Dodatkowe błędy w procedurze pomiarowej zawierają zmienne straty rozłączalnych złączy światłowodowych stosowanych na wejściu i wyjściu światłowodu wzmacniającego. Wartość współczynnika wzmocnienia Ramana dla przesunięcia

Stokesa 95 nm od fali pompy dla 1455 nm wynosi $4,17*10^{-14}$ [m/W] z niepewnością ±10%. Zalety metody: stosowanie fali ciągłej ułatwia dokładne pomiary mocy, przeciwbieżne fale pompy i próbkująca poprawia stosunek sygnały do szumu SNR i pozwala na pomiary wzmocnienia na długości fali pompy, unika się czułości polaryzacyjnej systemu pomiarowego poprzez stosowanie źródła zdepolaryzowanego oraz przeciwbieżnych sygnałów pompy i próbkującego.

Tabela 15.1. Typowe wartości parametrów światłowodowego wzmacniacza Ramana [45] z błędami pomiarowymi.

Parametr	wartość	Szacowany błąd
Długość światłowodu	9 km	±1%
Straty światłowodu dla 1455 nm	0,3 dB/km	±5%
Efektywna powierzchnia światłowodu	$50,3 \ \mu m^2$	±5%
Straty wzmacniacza dla 1550 nm	4,6 dB	±4%
Wzmocnienie wzmacniacza światłowodowego	16,4 dB	±3%
dla 1550 nm		
Moc pompy	870 mW	$\pm 8\%$

Moc progowa obliczona według równania na P_{th} wynosi 4,79 W dla 1550 nm dla SRR w typowym światłowodzie jednomodowym o długości 10 km, $A_{eff} = 50 * 10^{-12} \text{ m}^2$, $g_{SRR} = 4,17 * 10^{-14}$ W, $\alpha=0,2$ dB/km, $K_{SRR} = 2$. Ta wartość mocy jest zbyt duża aby mogła być doświadczalnie potwierdzona dla 1550 nm. Definicja wartości P_{th} dla SRR wymaga jednoczesnego pomiaru mocy wejściowej pompy, wyjściowej pompy i sygnału Stokesa. Wyjście ze światłowodu w kierunku w przód musi być rozdzielone na składowe pompy i Stokesa odseparowane w przybliżeniu o 12 THz (ok. 100 nm dla 1550 nm). Podstawowy zestaw pomiarowy do badania poziomu SRR w światłowodzie jest przedstawiony na rys. 15.15.



Rys. 15.15. Schemat blokowy podstawowego rozwiązania systemu pomiarowego do określania wartości progu SRR w światłowodzie w przód [45]

Trzeba stosować środki zapobiegawcze aby maksymalna wartość mocy ciągłej fali wprowadzanej do światłowodu nie była ograniczona przez SRB. Moc progowa dla SRB wynosi

typowo jedynie kilkadziesiąt mW, gdy jest zastosowana dioda z falą ciągłą o wąskiej charakterystyce spektralnej (<100 MHz). Ten poziom może być zwiększony przez zastosowanie źródła o szerszym spektrum lub przez zastosowanie modulatora fazy w celu spektralnego rozszerzenia sygnału pompy.

Większość rozważań specjalistycznych odnośnie pomiarów SRR jest taka sama jak dla pomiaru SRB. Stosowanie dużej mocy optycznej oznacza, że źródła muszą być zabezpieczone optycznymi izolatorami w celu uniknięcia destabilizacji pracy lasera. Trzeba stosować ukośne złącza światłowodowe z tego samego powodu. Skośne złącza powodują te same problemy z pomiarami mocy bezwzględnej. Czułoś polaryzacyjna mierzonego współczynnika wzmocnienia jest problemem i najprościej jej uniknąć poprzez zastosowanie źródła o polaryzacji przypadkowej. Zależność progu SRR od długości tak jak dla SBS. Poziomy SRR dla światłowodów o następujących danych: $A_{eff} = 50 \ \mu m^2$, $g_{SRR} = 4,17*10^{-14} \ m/W$, $K_{SRR} = 2$, $\alpha=0,2 \ dB/km$ są przedstawione na rys.15.16. w funkcji długości światłowodu. Widać, że poziom mocy spada zasadniczo dla dłuższych światłowodów, ale zawsze pozostaje ok. trzy rzędy większy niż poziom SRB dla pompy wąskopasmowej.



Rys. 15.16. Obliczone wartości progów SRR w funkcji długości światłowodu dla światłowodów o różnych tłumiennościach [45].

Pomiary SRR wymagają znacznego wzrostu progu SRB. Wymagana jest szerokość spektralna sygnału pompy powyżej 40 GHz aby podnieść próg SRB dla światłowodu o długości 10 km do poziomu ok. 5 W. Tłumienie procesu SRB można uzyskać stosując modulację fazy sygnału pompy [33,48] albo poprzez generację sygnału dudnienia pomiędzy dwoma bliskimi sobie źródłami [32]. Stosując modulację 1 π -PSK z pseudoprzypadkową sekwencją binarną dla szybkości bitowej B przewidziano liniowy wzrost progu SRB w funkcji B według zależności: P_{PSK} = P_{CW} (B+ Δ v_B)/ Δ v_B. Pokazano również w [32], że SRB może być znacznie stłumione w światłowodowym kanale komunikacyjnym ASK poprzez zastosowanie duplikacji danych na dwie blisko położone optyczne częstotliwości nośne. Ta sama zasada stosuje się do pompy z falą ciągłą. Przewidziano wzrost poziomu progowego SRB w światłowodzie kwarcowym do 15 W, jeśli zastosuje się dwa źródła o falach ciągłych odseparowanych od siebie o 1GHz.

Tłumienie SRB otrzymano również poprzez zastosowanie zmiennego naprężenia w światłowodzie. Naprężenie powoduje "rozmycie" agregowanego współczynnika wzmocnienia na szerszy zakres częstotliwości [25]. Dla szerokości widmowej pompy znacznie mniejszej niż normalna szerokość spektralna Brillouina, maksymalna wartość współczynnika wzmocnienia staje się odwrotnie proporcjonalna do Δv_B poprzez równanie na g_{SRB}. Rozszerzenie widma Brillouina z 50 MHz na 406 MHz spowodowało poziom SRB z, w przybliżeniu 7 dBm do ponad 14 dBm, co było największą mocą użytą w tym pomiarze. Zakładając, że próg SRB wzrasta liniowo z szerokością spektralną Brillouina, naprężenie zastosowane wobec włókna jest spodziewane podnieść poziom progowy mocy o 9 dB. Ten wzrost jest ciągle niewystarczający aby pozwolić na pomiary progu SRR, co typowo wymaga mocy pobudzających rzędu 30 dBm.

Natężenie rozproszenia Ramana jest proporcjonalne do ramanowskiego przekroju poprzecznego ośrodka rozpraszającego. Ten parametr jest charakterystyczną stałą danego ośrodka. Przedmiotem szczególnego zainteresowania w światłowodach są przekroje na rozpraszanie szkieł krzemionkowych i germanowych. Pomiary pokazały, że szkło germanowe jest znacznie silniejszym ośrodkiem rozpraszającym niż szkło kwarcowe. Dlatego silnie domieszkowane światłowody kwarcowe posiadają zredukowane wartości poziomów SRR [49]. Wyższe koncentracje germanu w rdzeniu bardziej ograniczają pole modowe i dają mniejsze wartości pola efektywnego. Większy poziom domieszkowania zwiększa także straty we włóknie optycznym, redukując efektywną drogę oddziaływania nieliniowego L_{eff}. Wszystkie te efekty zwiększają szybkość z jaką moc pompy jest transformowana wzdłuż światłowodu w moc fali Stokesa – zarówno przez wzrost aktywności nieliniowej jak i większe straty liniowe. Zależność progu SRR od różnicy współczynników załamania pomiędzy rdzeniem i płaszczem jest stosunkowo skomplikowana, ponieważ zależy od funkcji wzrostu strat liniowych z poziomem domieszkowania, powierzchni efektywnej światłowodu i współczynnika wzmocnienia Ramana [45].

Podobnie jak w procesie SRB, fala Stokesa w SRR jest budowana ze wzmacniania szumu dla częstotliwości największego wzmocnienia krzywej Ramana. Każda przyczyna, która powoduje fluktuacje tej częstotliwości wzdłuż drogi oddziaływania w światłowodzie powoduje spowolnienie akumulacji promieniowania Stokesa i wzrost poziomu progowego SRR. Przesuniecie częstotliwościowe maksymalnej wartości wzmocnienia Ramana w światłowodzie domieszkowanym germanem zmienia się jedynie nieznacznie z koncentracją domieszki germanowej [51]. Wartość szczytowa jest w procesie SRR słabiej zdefiniowana niż w procesie SRB. Światłowody jednomodowe posiadają bardzo niewielkie wzdłużne fluktuacje poziomu domieszki, więc zjawisko to można pominać.

Istnieją dwie główne metody pomiaru SRR: skanowanie impulsowe i wzmacnianie fali ciągłej. Obie metody zostały praktycznie wykorzystane do pomiarów w zakresie spektralnym 1550 nm, gdzie wzmocnienie Ramana może dotyczyć systemów pracujących według standardu ITU WDM oraz systemów w paśmie L. Niepewności pomiarów według tych metod wynoszą obecnie 5% i 10% [45, 48]. Technika skanowania impulsowego traci na dokładności pomiaru przesunięcia Stokesa mniejszego niż kilka THz z powodu rozdzielczości spektrometru oraz współ-propagujących fal pompy i Stokesa.

Mierząc wzmocniony sygnał propagujący w przeciwnym kierunku niż fala pompy pozwala na poprawienie stosunku sygnału do szumu. Największym pojedynczym źródłem niepewności w metodzie wzmacniania fali ciągłej był pomiar bezwzględnej mocy pompy 870mW, wykonywany przez termiczny miernik mocy. Spodziewać się można poprawy dokładności pomiaru światłowodowych mierników mocy do zakresu 1 W do poziomu ok. 1,5% [45].

Metody pomiarowe z falą ciągłą są preferowane ponad metody impulsowe, ponieważ moc optyczna może być mierzona bardziej dokładnie. Trudnością techniczną związaną z zastosowaniem metod z falą ciągłą w zakresie długości fal telekomunikacji światłowodowej jest dostarczenie dostatecznego poziomu mocy optycznej aby przekroczyć próg SRR. Pomiary mogą być teoretycznie wykonane dla dowolnej długości fali ponieważ współczynnik wzmocnienia może być skalowany dla innej długości fali pompy. Źródła dużej mocy takie jak Nd:YAG są dostępne dla widzialnych długości fal. Trudności powstają przy obliczaniu długości efektywnej i powierzchni efektywnej dla dowolnej długości fali. Efektywna długość zależy od liniowego współczynnika tłumienia światłowodu, który dla systemów telekomunikacyjnych nie jest specyfikowany dla długości fali odcięcia, co typowo zachodzi dla ok. 1200 nm, gdzie jednomodowe telekomunikacyjne włókno optyczne staje się wielomodowe.

Dostatecznie wysokie podniesienie progu SRB, aby przekroczył próg SRR jest ważnym zagadnieniem pomiarowym, jeśli nie jest stosowane stosunkowo szerokopasmowe źródło. Wzmocniony sygnał wyjściowy ze światłowodowego lasera Ramana posiada dostateczną szerokość spektralną aby wyeliminować problem progu SRB.

Standaryzacja metod pomiarowych SRR powinna bazować na pomiarach współczynnika wzmocnienia. Współczynnik wzmocnienia Ramana może być używany do obliczeń progu SRR dla jednej długości fali a również do określania profilu wzmocnienia Ramana odnośnie zastosowań w systemach WDM i wzmacniaczach ramanowskich. Preferowane jest zastosowanie metod z falą ciągłą [45] ponieważ umożliwia to znacznie bardziej dokładne pomiary mocy optycznej niż w przypadku metod impulsowych. Najbardziej przyszłościowa wydaje się technika ramanowskiego wzmacniania fali ciągłej. Ta technika nie oferuje jednakże takiego samego potencjału w zakresie pomiarów rozłożonych jak technika skanowania impulsowego. Jednakże pozwala na ocenę krzywej wzmocnienia Ramana blisko pompy, co jest ważne dla określenia wzmocnienia Ramana w kanałach DWDM dalekosiężnych i dystrybucyjnych systemów światłowodowych.

15.4. Mieszanie Czterofalowe w Światłowodzie

W stymulowanych procesach rozpraszania światłowód działa jako optyczny ośrodek nieliniowy odgrywający aktywną rolę poprzez zjawiska fononowe i wibracje molekularne. W wielu zjawiskach nieliniowych światłowód odgrywa rolę bierną, w sensie pośredniczenia pomiędzy oddziaływaniem kilku propagowanych fal, poprzez nieliniową odpowiedź związanych elektronów. Takie procesy nazywane są parametrycznymi ponieważ ich przyczyną jest modulacja przez falę świetlną parametru ośrodka np. współczynnika załamania. Taki procesy zawierają: generację fal harmonicznych, mieszanie czterofalowe, wzmacnianie parametryczne.

Mieszanie czterofalowe zachodzi gdy dwie lub więcej częstotliwości światła propagują razem w światłowodzie. Jeśli spełniony jest warunek dopasowania fazowego, generowana jest fala świetlna dla nowej częstotliwości używająca mocy optycznej z oryginalnych sygnałów. Generacja światła przez mieszanie czterofotonowe posiada poważne implikacje dla światłowodowych systemów transmisyjnych z WDM. Generacja nowych częstotliwości z dwóch lub trzech sygnałów wejściowych jest pokazana schematycznie na rys. 15.17. Przedstawiono również równanie definiujące częstotliwości mieszania czterofotonowego.



Rys. 15.17. Dodatkowe częstotliwości generowane w wyniku procesu mieszania czterofotonowego w światłowodzie; a) lewy wykres, przypadek częściowo zdegenerowany, b) prawy wykres, przypadek całkowicie zdegenerowany.

Systemy WDM przesyłają dane w wielu kanałach, typowo w 16, 32 itd. Każdy o ściśle określonej częstotliwości. Jeśli dwa lub więcej kanałów doznają interakcji poprzez mieszanie czterofalowe, wówczas moc optyczna jest generowana dla nowych częstotliwości na koszt redukcji mocy w kanałach oryginalnych. Taka strata mocy powoduje silne obniżenie mocy w niektórych kanałach transmisyjnych i niemożność detekcji w nich sygnału dla określonej wartości stosunku sygnału do szumu, co prowadzi do redukcji pasma transmisyjnego systemu.

Jednakże mieszanie czterofalowe może być także wykorzystane jako efekt pozytywny w systemach transmisyjnych WDM, jak np.:

- Całkowicie optyczna bardzo szybka metoda konwersji częstotliwości,
- Metoda kompensacji dyspersji w światłowodowych łączach dalekosiężnych,
- Metoda rozłożonych pomiarów dyspersji i nieliniowych parametrów światłowodu,
- Metoda generacji fal milimetrowych dla celów ruchomej komunikacji mikrokomórkowej.

Pomiaru obecności zjawiska mieszania czterofalowego i innych zjawisk parametrycznych w transmisyjnym systemie światłowodowym dokonuje się poprzez monitoring mocy we wszystkich kanałach WDM, oraz monitoring spektralny całego sygnału transmisyjnego. Zapobieganie tym zjawiskom polega na uniemożliwieniu spełnienia warunku fazy w światłowodzie dla żadnej z par propagujących fal. Sprzyjanie tym zjawiskom polega, odwrotnie, na umożliwieniu spełnienia warunku fazy dla propagowanych fal w światłowodzie.

16. POMIARY ŚWIATŁOWODÓW AKTYWNYCH

Pomiary światłowodów aktywnych i światłowody aktywne w systemach pomiarowych

Rozwój metody CVD doprowadził w połowie lat osiemdziesiątych do możliwości domieszkowania preformy światłowodowej jonami ziem rzadkich. Od roku 1987 obserwowany był gwałtowny wzrost liczby prac nad światłowodami aktywnymi. Najwięcej z nich dotyczyło domieszki erbowej w światłowodzie wysoko-krzemionkowym pracującym w paśmie 1550nm, ważnym dla telekomunikacji światłowodowej. Światłowody aktywne zapewniają kompensację strat w systemie transmisyjnym a także dzięki wzmocnieniu zapewniają budowę systemów funkcjonalnych, w tym pomiarowych w rozwiązaniu całkowicie światłowodowym. Domieszka erbowa posiada stosunkowo szerokie widmo wzmocnienia, wynoszące ok. 50nm w okolicach 1550nm. Stanowi to podstawę do budowy wielu układów laserów światłowodowych z przełączaniem modów przeznaczonych do generacji impulsów ultrakrótkich - femtosekundowych. Najbardziej udane konstrukcje dotyczyły laserów z biernym przełączaniem modów, w których nieliniowy współczynnik załamania światłowodu jest odpowiedzialny za mechanizm przełączania modów. Dzieje się to np. poprzez nieliniowy obrót polaryzacji lub w nieliniowym światłowodowym zwierciadle pętlowym. W takich systemach, nieliniowość światłowodu i dyspersja mogą działać wspólnie powodując skracania długości impulsu poprzez, podobną do transmisji solitonowej, kompresję impulsu. Prowadzi to do generacji wewnątrz światłowodu bardzo krótkich impulsów. Praca takich laserów zależy w dużym stopniu od subtelnych szczegółów konstrukcyjnych, więc rozwinięto cały szereg metod pomiarowych umożliwiających optymalizację konstrukcyjną laserów światłowodowych. Procesem ograniczającym w solitonowych laserach światłowodowych, a także w systemach telekomunikacyjnych z periodycznie rozłożonymi wzmacniaczami światłowodowymi jest ciągła utrata energii z impulsów do dyspersyjnego kontinuum. Występuje to, gdy długość wnęki rezonansowej lasera światłowodowego (lub odległości pomiędzy wzmacniakami światłowodowymi) staje się porównywalna do charakterystycznego okresu impulsów solitonowych. W laserze światłowodowym, ta energia pozostaje wewnątrz wnęki i zaczyna odgrywać rolę interferencja pomiędzy promieniowaniem utraconym z impulsów w czasie różnych etapów periodycznego pokonywania wnęki. Prowadzi to do systematycznego powstawania pasmo bocznych wokół widma solitonu. W czasie gdy soliton podlega procesowi kompresji w laserze, coraz więcej energii jest traconej z widma częstotliwościowego impulsu. Ten mechanizm powoduje ograniczenie procesu skracania się impulsu.

Przedmiotem zainteresowania są także inne jony domieszek aktywnych w światłowodzie, jak np. prazeodym Pr. Z takim jonem domieszki możliwe jest uzyskanie wzmocnienia w paśmie ok. 1300nm, które jest pierwszym oknem transmisyjnym i naturalnym oknem minimum dyspersyjnego. Prazeodym posiada, jako domieszka w światłowodzie krzemionkowym, bardzo krótki czas życia w stanie górnym pobudzenia, wskutek występowania procesów nie-radiacyjnych. W celu wbudowania prazeodymu w układ radiacyjny, jako szkło bazowe stosuje się materiały cięższe np. szkła fluorkowe. Mimo iż przedłuża to czas życia Pr w stanie górnym o ok. dwa rzędy wielkości, wprowadza szereg innych problemów związanych z właściwościami materiału szklistego. Szkła fluorowe charakteryzują się niskimi temperaturami topnienia, co powoduje duże trudności w technologii spawania takich światłowodów z włóknami wysoko-krzemionkowymi. Mimo takich problemów prazeodym jest przedmiotem zainteresowania jak aktywny materiał światłowodowy i zbudowane zostały femtosekundowe lasery światłowodowe z przełączaniem modów.

Większość prac badawczych i pomiarowych nad laserami światłowodowymi jest stymulowana przez zastosowania telekomunikacyjne. Stosowane są one jako źródła impulsów, a więc metody pomiarowe odnoszące się do nich dotyczą np. pomiarów stabilności generacji. Lasery

światłowodowe, już na obecnym etapie rozwoju, posiadają szereg zalet technicznych takich jak: prostota konstrukcyjna, stabilność, łatwość zastosowania, zintegrowaną budowę. Są bardzo wydajnymi źródłami o poziomie mocy średniej osiągającej kilka watów i szerokich możliwościach zastosowań, także poza bezpośrednim obszarem telekomunikacji np. w metrologii optoelektronicznej, czy do generacji szerokopasmowych impulsów o bardzo wysokiej energii.



Rys. 16.1. Schemat blokowy światłowodowego lasera z przełączaną dobrocią

Do generacji impulsów o wysokiej energii wykorzystywane jest zjawisko biernego przełączania dobroci lasera światłowodowego, powodowane prze rozłożone rozproszenie wsteczne ze światłowodu do obszaru wzmocnienia. Proces ten jest wzmacniany poprzez zastosowanie całkowicie światłowodowego interferometru pętlowego, jak przedstawiono na rysunku. Wynikające z tego przełączanie dobroci jest procesem stabilnym z częstotliwością powtarzania w zakresie 1 – 20kHz, w zależności od mocy pompy. Proces może być dodatkowo stabilizowany, jeśli moc pompy jest modulowana rezonansowo. Taką technikę zastosowano w odniesieniu do laserów erbowych i iterbowych. W przypadku domieszki erbowej, dla lasera pracującego w okolicy 1545nm, otrzymano impulsy o czasie trwania 5 – 15ns i mocy szczytowej rzędu 100W oraz częstotliwości powtarzania przestrajanej w zakresie 100Hz – 20kHz.

Światłowodowy laser iterbowy generuje impulsy krótsze niż 2nm o średniej mocy 1W dla 1060nm. Energia wynosi w przybliżeniu 0,05mJ, co daje moc szczytową rzędu 10kW. Tak wysoka moc jest wystarczająca do generacji super-kontinuum Ramana nawet w krótkich światłowodach. Na rysunku pokazano widmo generowane na wyjściu pompowanego diodą lasera Yb o średniej mocy 450mW. Podstawowa długość generowanej fali wynosi około 1060nm, jednak większość mocy jest konwertowana do super-kontinuum rozciągającego się w całym obszarze podczerwieni, gdzie światłowód jest przezroczysty aż do 2,3µm.



Rys. 16.2. Zmierzona charakterystyka spektralna światłowodowego lasera domieszkowanego Yb z przełączaną dobrocią pompowanego diodą półprzewodnikową. Na charakterystyce spektralnej jest widoczna obecność większości zjawisk nieliniowych występujących w światłowodzie.

Połączenie szerokiego widma spektralnego z wysoką mocą szczytową może być wykorzystane dla podwajania częstotliwości i generacji przestrajanego promieniowania w zakresie widzialnym. Stosuje się do tego np. przestrajany kątowo, dopasowany fazowo kryształ LiIO₃ [13-15].

Rozwój techniki gęstych systemów multipleksowania falowego w kierunku dłuższych fal w połączeniu z rozwojem wzmacniaczy światłowodowych jest stymulowany popytem na pasmo. Techniki te wymagają rozwoju systemów i metod pomiarowych. W paśmie C (1530 – 1562 nm), w systemach pracujących umieszcza się ok. 100 niezależnych kanałów transmisyjnych WDM. To pasmo jest zdefiniowane i ograniczone tradycyjnie przez pasmo wzmocnienia światłowodowego wzmacniacza erbowego. Obecny popyt na pasmo wzrasta dwukrotnie w skali roku. Przewiduje się, że za kilka lat popyt przerośnie możliwości systemów pracujących w paśmie C dla standardu OC-48, 2,5Gb/s z odległością międzykanałową 100GHZ (0,8nm).

Przewiduje się wprowadzenie trzech zasadniczych zmian do systemów DWDM w kierunku zasadniczego zwiększenia pojemności transmisyjnej [21]:

- Wzrost szybkości transmisji w pojedynczym kanale. Standardy OC-192 (10Gb/s) oraz OC-768 (40Gb/s). Przy długich odcinkach światłowodu odgrywa rolę dyspersja dla tak szerokich pasm transmisji.
- Zmniejszenie odległości międzykanałowych, co jest równoważne ze zwiększeniem liczby kanałów. Redukcja będzie postępowała od obecnych 100GHz, poprzez 50GHz (0,4nm) nawet do 25GHz (0,2nm) a w przyszłości nawet dalej do 0,1nm. Trudności związane ze zmniejszeniem odległości pomiędzy kanałami poniżej 100GHz są spowodowane nieliniowymi właściwościami włókien optycznych. Przy gęstym upakowaniu kanałów następuje wzrost poziomu mocy sprzężonej.

Zwiększenie iloczynu pasmo-wzmocnienie. Wzmacniacze światłowodowe erbowe mogą wzmacniać także w paśmie długofalowym od 1570nm do 1605nm. Wykorzystanie pasma długofalowego L podwaja pole wzmocnienia światłowodowego systemu transmisyjnego ze wzmacniaczem, bez zastosowania poprzednich metod. Łącznie z poprzednimi metodami można ocenić potencjał wzrostowy tej techniki transmisji. Wzmacniacze w paśmie L stosują podobną technologię jaka jest używana w paśmie C. Przewiduje się stosowanie hybrydowych rozwiązań obu rodzajów wzmacniaczy w sieciowej architekturze równoległej.

Pomiędzy oboma rodzajami wzmacniaczy istnieją pewne różnice. Wzmocnienie można przedstawić zależnością: $G=g_cL$, gdzie g_c – współczynnik wzmocnienia, L – długość wzmacniającego światłowodu erbowego. Ponieważ pasmo L zawiera ogon pasma wzmocnienia erbu, to współczynnik wzmocnienia jest trzy do czterech razy mniejszy niż odpowiednia wartość w paśmie C. Zmiany wzmocnienia w funkcji długości fali dla obu pasm przedstawiono na rysunku.



Rys. 16.3. Charakterystyka spektralna współczynnika wzmocnienia światłowodowego wzmacniacza erbowego dla umownych pasm C oraz L.

Relatywnie mniejsze wzmocnienie w paśmie L powoduje konieczność zastosowania wzmacniaczy o znacznie większych długościach (przy zastosowaniu światłowodu standardowego Typu-2) niż w paśmie C. Stosunkowo większa długość wzmacniaczy nakłada szereg problemów projektowych, technologicznych, konstrukcyjnych i pomiarowych. Po pierwsze, całkowite straty włókna biernego (iloczyn stratności i długości światłowodu) w paśmie L są większe. Wzmacniacz powinien rekompensować te różnice, co powoduje zmniejszenie wydajności konwersji sygnału pompującego (moc pompy wymagana do otrzymania określonego poziomu sygnału wyjściowego). Następnie, różnice w wartości współczynnika wzmocnienia powodują znacznie większą akumulację wzmocnionej, emitowanej spontanicznie mocy, co powoduje wzrost poziomu szumów związanych z procesem wzmocnienia. Ponownie, wydajność konwersji sygnału pompy spada. Moc pompy wzmacnia ogólny poziom emisyjny zamiast poziomu sygnału. Dodatkowa wzmocniona emisja spontaniczna powiększa współczynnik szumów. Współczynnik szumów jest tu miarą szumowej jakości pracy wzmacniacza, tzn. ile niepożądanego szumu dodaje do systemu wzmacniacz.

Wskutek tych procesów zmniejszających wydajność konwersji wymagana moc pompy jest większa i jakość szumowa systemów w paśmie długofalowym L jest ogólnie znacznie gorsza w porównaniu w systemami z pasma C. Takie porównanie przedstawiono na rysunku. Do tych problemów dochodzi zagadnienie technologiczne większej trudności produkcji dłuższych odcinków światłowodów erbowych. Te czynniki jak: ryzyko związane z masową produkcją wzmacniaczy i pogorszenie parametrów jakościowych, powodują szybki rozwój wysoko-domieszkowanych, niskostratnych, światłowodów erbowych na wzmacniacze przeznaczone do pracy w paśmie L.



Rys. 16.4. Porównanie mierzonych parametrów wzmacniaczy światłowodowych erbowych w paśmie C i paśmie L. Wzmocnienie w paśmie L jest ok. pięciokrotnie mniejsze. Wahania wzmocnienia w paśmie L są o rząd wielkości mniejsze. Współczynnik szumów w paśmie L jest nieco większy.

Inną ważną różnicą pomiędzy pasmem C i L jest przeciętny poziom inwersji. Ten poziom oznacza procent jonów erbu, które uczestniczą w procesie wzmacniania. Poziom inwersji można związać z kształtem spektralnej krzywej wzmocnienia. Wzmacniacze w paśmie L pracują dla niskiego poziomu inwersji, ok. 40% w celu zminimalizowania wewnętrznego wahania poziomu zmian wzmocnienia. Wahanie wzmocnienia jest definiowane jako względny stosunek maksymalnego i minimalnego wzmocnienia w paśmie wyrażony w procentach: $g=[(G_{max}-G_{min})/G_{min}]100\%$. Dla porównania, wzmacniacze w paśmie C pracują przy poziomie średniej inwersji rzędu 60-65%. Dla najlepszego przypadku, wahania wzmocnienia w paśmie L jest o rząd wielkości mniejszy. Ta redukcja wahań wzmocnienia oznacza, że wymagania na filtry wyrównujące poziom wzmocnienia w paśmie są łatwiejsze do spełnienia niż w paśmie C.

Jakość wzmacniacza światłowodowego, jako gotowego elementu funkcjonalnego, zależy w dużej mierze od współpracujących elementów fotonicznych takich jak: izolatory, multipleksery, odsprzęgacze, filtry i rozdzielacze pasmowe. Elementy takie, wykonywane dla pasma C wykazują zauważalny wzrost strat wtrącenia dla większych długości fali. Przedstawiono to na rysunku. Izolatory zaprojektowane dla pasma C wykazują izolację 20dB pomiędzy 1550nm oraz 1580nm. Dlatego elementy w paśmie L stosują izolację dwupasmową (w celu rozszerzenia zakresu izolacji) albo izolatory optymalizowane dla pasma L. Widać stąd, że potrzebne są elementy funkcjonalne wykonywane odrębnie dla pasma L.

Warunki pracy w paśmie L dotyczą także długości fali pompy. Światłowodowe wzmacniacze erbowe stosują dwie długości fali pompy 980nm oraz 1480 nm. W paśmie C, efektywność konwersji pompy dla 980nm jest mniejsza niż dla 1480nm, co jest spowodowane różnicą w konwersji energii fotonu, która jest proporcjonalna do $\lambda_{pompy}/\lambda_{sygna\lambda u}$. Pompa 980nm musi dostarczać więcej mocy niż pompa 1480nm aby efekt był taki sam. Ta różnica w efektywności konwersji sygnału pompy jest jeszcze większa w paśmie L. Ponieważ koszt źródła laserowego pompy stanowi zasadniczą część całkowitego kosztu wzmacniacza, więc zwiększenie wydajności konwersji pompy jest istotnym czynnikiem dla wzmacniaczy w paśmie L. W paśmie L istnieją nowe możliwości wyboru długości fali pompy I jej konfiguracji.

Jedną z metod powiększenia wydajności konwersji sygnału pompy jest wprowadzenie przestrajania długości fali. Wydajność pompy 980nm można poprawić o kilka decybeli poprzez jej przestrajanie o±25nm od maksimum absorpcyjnego pompy na 980nm. Taką samą technikę można zastosować w odniesieniu do pompy 1480nm dla wzmacniaczy w paśmie L. Z powodu niskiej wartości stopnia inwersji w paśmie L jako pompę można rozważać sygnał 1550nm. Taka opcja jest ważna ponieważ daje możliwość wzmacnianego pompowania emisji spontanicznej, w której wstecznie wzmocniona emisja spontaniczna (posiadająca maksimum w paśmie C) jest mocą pompującą. Taka technika wydajnie używa ponownie moc pompy, która została konwertowana w moc wzmocnionej emisji spontanicznej. Druga możliwość polepszenia sprawności konwersji sygnału pompy polega na zastosowaniu laserów światłowodowych jako pomp.



Rys. 16.5. Zmierzone straty wtrącenia elementów funkcjonalnych dla typowego wzmacniacza w paśmie C zmieniają straty całkowite o 0,25dB w paśmie C oraz o 0,6dB w paśmie L.

Sygnały optyczne we wzmacniaczu światłowodowym L – pasmowym łatwiej doznają mieszania czterofalowego niż w C – pasmowym. Interakcje nieliniowe pomiędzy sygnałami optycznymi powodują przesłuch międzykanałowy. Odbiornik widzi ten przesłuch jako szum, który powoduje degradację parametrów systemu transmisyjnego. To zjawisko występuje wewnątrz światłowodu erbowego i jest przypisywane długości pętli tego światłowodu. Wydaje się, ze redukcja długości światłowodu, przy większej koncentracji erbu może zredukować ten problem.

Wzmocnienie i współczynnik szumów we wzmacniaczach L – pasmowych są bardzie czułe na temperaturę pętli światłowodu erbowego. Stanowić to może poważną przeszkodę praktyczną bowiem w warunkach polowych wzmacniacze powinny pracować stabilnie w szerokim zakresie temperatur (ogólnie 0-70°C). Wzmocnienie wzmacniacza I współczynnik szumów są projektowane dla konkretnych warunków aplikacyjnych (budżet mocy dla łącza) I nadmierne fluktuacje tych parametrów z temperaturą mogą uniemożliwić pracę systemu.

Wzmacniacze L – pasmowe wykazują również inną reakcję na przejściowe stany mocy zasilania niż w paśmie C. Dodawanie lub odejmowanie kanałów optycznych może spowodować nieprzewidywalne I nagłe spadki mocy wejściowej do wzmacniacza. Istotne impulsowe zaburzenia sygnału będą interpretowane w odbiorniku jako błędy. Poznanie natury I minimalizowanie propagacji takich zjawisk przejściowych jest obecnie istotną sprawą badawczą w dziedzinie wzmacniaczy światłowodowych L – pasmowych. Co więcej, wprowadzane nowe światłowody o rozszerzonym paśmie transmisyjnym aż do 1620nm dalej rozszerzają obszar pasma L dodając nowe możliwości zwiększenia pojemności transmisyjnej.

17. POMIARY I PROJEKTOWANIE ŚWIATŁOWODÓW WIELORDZENIOWYCH

Techniki pomiarowe światłowodów kształtowanych a w tym szczególnie wielordzeniowych wymagają adaptacji metod sprzęgania mocy optycznej w celu umożliwienia pobudzania indywidualnych rdzeni kształtowanych oraz detekcji wyjściowej mocy optycznej z indywidualnych rdzeni, nawet położonych blisko siebie. Zastosowano metodę wykorzystującą specjalnie przygotowany światłowodowy wielowłóknowy sprzęgacz stożkowy. Jeśli rozkład rdzeni w światłowodzie wielordzeniowym jest regularny geometrycznie (np. liniowy o równych odstępach, trójkątny równoboczny, kwadratowy, heksagonalny, itp.), wówczas technologia wytworzenia wielowłóknowego sprzęgacza stożkowego ulega uproszczeniu. Sprzęgacz stożkowy jest wykonywany zazwyczaj z odpowiedniego układu włókien optycznych jednordzeniowych. Jego część końcowa jest delikatnie zgrzana, tak aby nie zniekształcić pojedynczych włókien. Odpowiedni stopień zbiegu kąta stożkowości otrzymuje się poprzez rozciągnięcie odpowiednio złożonego układu światłowodów. W ogólnym przypadku włókna wielordzeniowego proporcje wymiarowe rdzeń – płaszcz są niestandardowe, co dodatkowo utrudnia sprzężenie.

Inną metodą wykonania sprzęgacza jest wytworzenie w czasie tego samego procesu technologicznego produkcji światłowodu, znacznie grubszego włókna przy zmniejszonej prędkości wyciągania. Tego rodzaju "preforma" jest następnie wyciągana w odrębnym etapie obróbki wysokotemperaturowej do postaci stożka. Układ rdzeni w takim stożku odpowiada dokładnie układowi rdzeni we włóknie mierzonym. Stożek jest łamany na takiej długości dla której średnica przełomu lub rozstaw i wymiary rdzeni odpowiadają wymiarom i topologii przekroju poprzecznego światłowodu sprzęganego. Detektor wyjściowej mocy optycznej ze światłowodu wielordzeniowego pracuje w typowym układzie z homodynowym kanałem odniesienia.



Fot. 17.1. Fotografia światłowodowego stożkowego sprzęgacza wielo-włóknowego o zgrzanym końcu do sprzęgania ze światłowodem wielordzeniowym.

Proces wytwarzania światłowodów dwurdzeniowych. Zestaw technologiczny jest umieszczony w odrębnej hali, częściowo izolowanej od zanieczyszczeń zewnętrznych. Wieża wyciągowa składa się z wysokiej jakości pieca sylitowego, układów zasilania i automatyki, układów pomiarowych (temperatura w różnych miejscach pieca), układu nadmuchu argonu, układów regulacji i stabilizacji temperatury, układu wielokrotnego powlekania włókna warstwą zabezpieczającą oraz automatycznego urządzenia wyciągającego. Bęben wyciągający obracany jest bardzo precyzyjnie z regulowaną prędkością. Bęben posiada także precyzyjny napęd poprzeczny. Regulacja obrotów jest możliwa w zakresie 0 –10 obrotów na sekundę, przy średnicy bębna 63 cm. Daje to zakres

Miernictwo światłowodowe

prędkości wyciągania 0-20 m/s. Laserowy miernik średnicy włókna połączony jest układem sprzężenia zwrotnego z układem wyciągającym w celu stabilizacji parametrów włókna. Wielopunktowy pomiar temperatury pieca dokonywany jest z dokładnością znacznie lepszą niż 0,1°C, przy typowych poziomach temperatury procesu w zakresie 800 - 1200°C dla szkieł wieloskładnikowych. Moc pieca wynosi w zakresie 15 – 20 kW. Komora pieca jest cylindryczna i posiada 350 mm średnicy. Spiralne elementy grzejne są umieszczone równolegle do osi wyciąganego włókna, dając odpowiednio jednorodny rozkład temperatur. Pomiary temperatur wewnątrz pieca są wykonywane oprzy pomocy termopary PtRh-Pt. Piec jest wyposażony w zamknięty układ obiegu argonu. Przepływ argonu wokół włókna jest laminarny.

Podstawowe zakresy parametrów wytwarzonych światłowodów dwurdzeniowych: Zakres przezroczystości: 0,35µm – 1,35µm nominalnie; Współczynnik tłumienia: 300 – 800 dB/km; Apertura Numeryczna: 0,3 – 0,5 nominalnie; Średnica włókna: 50µm nominalnie, dostępne w szeregu 35µm, 45 µm, 55µm, 100µm; Inne średnice włókna dostępne na żądanie; Średnica rdzenia: 5 – 25 µm nominalnie; Separacja międzyrdzeniowa: 5µm – 25 µm nominalnie; Stosunek wymiarów rdzeni dla światłowodu heterordzeniowego: 1:2, 1:3, nominalnie; Długość próbek włókna: 1m, 3m, 5m nominalnie, inne długości dostępne na żądanie; Pokrycie zewnętrzne włókna: lakier termoutwardzalny, polimer grubowarstwowy;



Fot. 17.2 A. Światłowód dwurdzeniowy o różnych rdzeniach (heterordzeniowy). Średnica zewnętrzna włókna $60\mu m$; Średnice rdzeni $7\mu m$ oraz $3,5\mu m$; Separacja rdzeni ok. $1,5\mu m$; Apertura Numeryczna 0,3; B. Przedstawiciel rodziny światłowodów typu Twin-core (bliźniaczo – rdzeniowych). Dokładne dane tych światłowodów znajdują się w cytowanej bibliografii. Średnica włókna $60\mu m$, Średnica rdzeni 2,5 μm , Separacja międzyrdzeniowa ok. $1\mu m$; NA=0,3; C. Światłowód bliźniaczo-rdzeniowy. Średnica włókna $60\mu m$; średnica rdzeni 2,5 μm , separacja międzyrdzeniowa 7,5 μm ; NA=0,3;



Fot. 17.3. Przełączanie mocy optycznej w wielomodowym światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym. Analogicznie do technik TDM, FDM oraz WDM, ten proces można nazwać CDM – core division multiplexing, Przełączenie mocy optycznej uzyskano stosując naprężenie poprzeczne na pewnej długości światłowodu.. Średnica włókna wynosi 45µm, średnica rdzeni około 14µm, NA=0,25. Proces CDM w światłowodzie wielordzeniowym budzi duże zainteresowanie badawcze poniważ pozwala potencjalnie na budowę jednowłóknowych, całkowicie optyczych przełączników i multiplekserów.



Rys. 17.4. Zmierzone profile refrakcyjne indywidualnych rdzeni w próbce światłowodu dwurdzeniowego. A. Próbka nr sd230499 – profil gradientowy, B. próbka nr sd250499 – profil quasi – skokowy, C. próbka nr 250499a – profil skokowy. Metoda pomiaru – automatyczne przetwarzanie obrazu z mikroskopu interferencyjnego.



Rys. 17.5. Spektralne charakterystyki transmisji wyrażone w % mocy optycznej na wyjściu światłowodu dwurdzeniowego, dla różnych par szkieł rdzeń–płaszcz $T(\lambda)$. Długość światłowodu 10m; $\lambda[\mu m]$;

Sprzężenie między rdzeniami w światłowodzie dwurdzeniowym. Analizując sprzężenie międzyrdzeniowe wprowadza się standardowe wartości początkowe i zakłada pewne niezbędne uproszczenia. Przyjmujemy, że separacja międzyrdzeniowa jest porównywalna do promienia rdzenia, światłowód jest słabo propagujący, profil refrakcyjny jest skokowy, geometria rdzenia i włókna jest idealnie cylindryczna. Zakładamy, że jeden z rdzeni jest sprzężony ze źródłem mocy optycznej. W takim przypadku, mod podstawowy z rdzenia pobudzonego rozciąga się na obszar sąsiedniego rdzenia. Przepływ mocy optycznej pomiędzy rdzeniami, o periodycznym charakterze, jest rezultatem tego zjawiska rozciągania się profilu modu poza rdzeń. Współczynniki sprzężenia pomiędzy przyległymi rdzeniami wynoszą:

$$C_{ij} = C_o \int_{A_j} n_j^2 \Psi_i^{clad} \Psi_j^{core} dA$$
, $i \neq j, i, j=1,2,$ (17.1)

gdzie

ie
$$C_o = \frac{k\sqrt{\varepsilon_o}}{4\sqrt{\mu_o N_i N_j}}$$
, $N = \left(\pi a^2 n_{core} / 2\right) \sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}} \frac{V^2}{U^2} \frac{K_1^2(W)}{K_o^2(W)}$, A_j - przekrój poprzeczny j-tego

rdzenia. Przyjmując dalsze uproszczenia, które są oczywiste jak: pominięcie zjawiska samo sprzężenia, używając znanych rozwinięć funkcji K oraz substytutów dla całek funkcji Bessela, można otrzymać współczynniki sprzężenia w formie analitycznej. Dla światłowodu o M rdzeniach, równanie na współczynniki sprzężenia trzeba modyfikować uwzględniając sumę całek po wszystkich M-1 rdzeniach:

$$C_{ij}^{M} = C_{ij} + C_o \sum_{\substack{core=1\\c\neq i, c\neq j}}^{M} \int_{A_c} n_{core}^2 \Psi_i^{clad} \Psi_j^{clad} dA$$
(17.2)

Drugi składnik w tym równaniu jest sprzężeniem pomiędzy i-tym oraz j-tym rdzeniem poprzez serię rdzeni przyległych (sąsiadujących) pomiędzy nimi i zakładamy, że jest do pominięcia. Ta sytuacja występuje jedynie w przypadku, gdy sprzężenie pomiędzy nie-sąsiadującymi rdzeniami może być pominięte, lub gdy występuje w układzie rdzeni sąsiadujących sprzężenie dominujące. Gdy tego rodzaju założenia nie są spełnione w światłowodzie, współczynniki sprzężenia nie mogą być wyrażone w prostej postaci. Moc optyczna jest wówczas złożoną superpozycją mocy modów z różnych rdzeni. Zależności fazowe w sprzężeniu mocy optycznej nigdy nie osiągają wartości 0 –1 w dowolnym światłowodzie wielordzeniowym, jak to ma miejsce w idealnym światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym. Analityczna forma współczynnika sprzężenia międzyrdzeniowego, w naszym uproszczonym przypadku jest: $C_{ij} = C_o \Theta_{ij}$, gdzie Θ_{ij} jest algebraiczną zależnością pomiędzy funkciomi *L* Laraz *K* o postacii.

funkcjami I, J oraz K o postaci:

$$\Theta_{ij} = \frac{a_j K_o (W_i d / a_i)}{K_o (W_i) J_o (U_j)} \frac{(W_i / a_i) I_1 (W_i a_j / a_i) J_o (U_j) + (U_j / a_j) I_o (W_i a_j / a_i) J_1 (U_j)}{(W_i / a_i)^2 + (U_j / a_j)^2}.$$
 (17.3)

Zazwyczaj wprowadzanych jest do analizy kilka użytecznych wielkości falowych jak: Średni współczynnik sprzężenia: $C = \sqrt{C_{12}C_{21}}$; Kilka zależności na znormalizowaną stałą propagacji,

$$\beta^{s} = (\beta_{1} + \beta_{2})/2, \ \Delta\beta = \beta_{1} - \beta_{2}, \ \Delta\beta^{r} = (\beta_{1} - \beta_{2})/\beta_{1}, \ \Delta\beta^{r}_{AS} = (\beta_{AS} - \beta_{SA})/\beta_{AS}, \tag{17.4}$$

$$V_p^{AS} = \overline{\sigma} / \beta_{AS} \text{ -predkość fazowa; } \beta_N = \left(\beta^2 / k_o^2 - \varepsilon_{cclad}\right) / \left(\varepsilon_{core} - \varepsilon_{clad}\right) ; \quad (17.5)$$

Sprawność transferu mocy pomiędzy rdzeniami oraz moc znormalizowana:

$$P^{te} = \left(1 + (\Delta \beta / 2C)^2\right)^{-1/2} ; \qquad (17.6)$$

Kontrast międzyrdzeniowy:

$$P_{ij}^{\ c} = \left(P_i - P_j\right) / \left(P_i + P_j\right) \Big|_{z = mZ_b} = -\cos(2mZ_b C_{ij}) \,. \tag{17.7}$$

AS jest określeniem indeksowym modów w światłowodzie dwu-rdzeniowym w aspekcie ich właściwości symetrii – antysymetrii rozkładu pola modowego względem osi włókna optycznego. Różnicowa wartość stałych propagacji w światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym jest miarą jego dwójłomności. Droga dudnienia modowego jest definiowana jako prosta funkcja współczynnika sprzężenia $Z_b = \pi P^{te}/2C$. Z ostatnich zależności można wnioskować, że wartości C oraz P^{te} zachowują się jako dodatkowe stałe propagacji. Jest to zrozumiałe, ponieważ mody sprzężone mogą być traktowane jako nowe mody propagujące w światłowodzie o złożonej strukturze dwurdzeniowej a w tym wypadku o rdzeniu dwuczęściowym. Notacja modowa Symetryczny – Antysymetryczny wynika w światłowodzie dwurdzeniowym właśnie z takiego założenia.

Światłowody dwurdzeniowe jednomodowe. Mod podstawowy HE_{11}^x ulegnie całkowitemu sprzężeniu z jednego rdzenia do drugiego, jeśli całkowite przesunięcie fazy $\Delta \Phi$ spełnia następujący warunek $\Delta \Phi = (2m+1)\pi$. Dla modów S.A. jest on równoważny następującej zależności:

$$\Delta \Phi = \varpi \int_{-1}^{1} [(V_p^{AS_1})^{-1} - (V_p^{AA_1})^{-1}] ds , \qquad (17.8)$$

gdzie V^{AS}_p jest prędkością fazową danego modu S.A. Warunek całkowitego transferu energii modu

jest:
$$k_o \sqrt{\varepsilon_{core}} \int_{-1}^{1} \left[\left(1 - \Delta \left(1 - \beta_N^{AS_1} \right) \right)^{1/2} - \left(1 - \Delta \left(1 - \beta_N^{AA_1} \right) \right)^{1/2} \right] ds = (2n+1)\pi$$
 (17.9)

Dla niewielkich wartości Δ wyrażenie pod całką jest upraszczane do postaci $\Delta \beta_N^{XX} = \beta_N^{AS_1} - \beta_N^{AA_1}$. Załóżmy, że jeden z rdzeni jest pobudzany modem HE_{11}^x , co jest ekwiwalentne do pobudzania następującą sumą modów S.A. - $AS_1 + AA_1$. Na wyjściu powinniśmy otrzymać ponownie mod HE_{11}^x ale z drugiego rdzenia, co odpowiada następującej kombinacji modów AS - $AS_1 - AA_1$.

Rozważmy obecnie jak wpływa materiał światłowodu na proces sprzegania między rdzeniami. Gdy rdzenie w światłowodzie nie są identyczne i początkowo niezbyt silnie sprzężone, wówczas stałe propagacji modów podstawowych HE_{11}^x w każdym rdzeniu są różne i wynosza β_1 oraz β_2 . Ogólnie, bezpośredni transfer mocy pomiędzy modami podstawowymi nie jest łatwy, jeśli mody nie są dokładnie dopasowane w fazie. Z punktu widzenia materiału z jakiego jest zrobiony światłowód dwurdzeniowy oraz jego dyspersji falowodowej istnieje taki punkt na charakterystyce dyspersyjnej, gdzie $\Delta \beta = 0$. Dzieje się to dla szczególnej długości fali $\lambda = \lambda_{\alpha}^{disp}$. Rysunek 17.6 przedstawia obliczone krzywe dyspersyjne $\Delta\beta^2(\lambda)$ dla kilku rzeczywistych wyciągnietych próbek jednomodowego światłowodu dwurdzeniowego. Krzywe dyspersji dla różnych światłowodów przecinają się w kilku miejscach. Osiągają wartość zerową w różnych miejscach dla różnych długości fal. Wartość długości fali λ_{α}^{disp} dla włókna dwurdzeniowego wzrasta z malejącą różnicą wymiarów rdzeni oraz ze wzrastającą wysokością skokowego profilu refrakcyjnego. Współczynniki wzajemnego C12 oraz C21 nie są jednakowe w światłowodzie dwurdzeniowym. sprzężenia Sprzężenie może być silniejsze w jednym kierunku, czyli może być silnie niesymetryczne. Konsekwentnie, więcej mocy będzie propagować, średnio w jednym z rdzeni.



dwurdzeniowym. Dwójłomność osiąga zero dla λ_{α}^{disp} . Ta długość fali jest funkcją geometrii

dwurdzeniowego włókna optycznego i jego parametrów materiałowych. Dane światłowodu i rdzeni: 1- $a=3\mu m$, $\Delta=0,2\%$, rdzeń #2, $a=9\mu m$, $\Delta=0,15\%$; 2 - $a=3\mu m$, $\Delta=0,3\%$, rdzeń #2, $a=9\mu m$, $\Delta=0,2\%$; 3 - rdzeń #1, $a=3\mu m$, $\Delta=0,4\%$, rdzeń #2, $a=9\mu m$, $\Delta=0,2\%$; 4 - rdzeń #1, $a=3\mu m$, $\Delta=0,4\%$, rdzeń #2, $a=7,5\mu m$, $\Delta=0,2\%$; 5 - rdzeń #1, $a=3\mu m$, $\Delta=0,4\%$, rdzeń #2, $a=6,5\mu m$, $\Delta=0,2\%$; $d=10\mu m$; B) Obliczone charakterystyki dyspersji efektywności transferu mocy w światłowodzie dwurdzeniowym. Dane włókien takie same jak na poprzednim rysunku. C) Obliczona dyspersja kontrastu międzyrdzeniowego w światłowodzie dwurdzeniowym. Dane światłowodu jak na rys. A) Próbki światłowodu #4 (linia ciągła) oraz #5 (linia przerywana). D) Spektralne charakterystyki mocy optycznej wyjściowej ze sprzężonego rdzenia światłowodu dwurdzeniowego, próbka # 4.

Miarą symetrii sprzężenia i sprawności transferu mocy optycznej jest wzgl. współczynnik sprzężenia wzajemnego $C_{ii}^r = C_{ii} / C_{ii}$ (lub odstrojenia od punktu λ_o^{disp}). Wykresy wartości funkcji $C_{21}^{r}(\lambda)P_{12}^{te}(\lambda)$, odpowiadające krzywym z rys. 17.6.A. przedstawiono na rys. 17.6.B. Efektywność transferu mocy nie przekracza 60% w badanych przypadkach światłowodów dwurdzeniowych. Dla takiej geometrii włókien dwurdzeniowych nie jest możliwa większa efektywność transferu. Kilka przeciwstawnych procesów falowodowych wpływa na kształt krzywych efektywności sprzężenia. Współczynniki sprzężenia wzrastają z długością fali dla $\lambda > \lambda_o^{disp}$. Dla większych wartości separacji między-rdzeniowej, sprzężenie ogólnie maleje i jest mniej czułe na różnice stałych propagacji w obu rdzeniach. Względny współczynnik sprzężenia wzajemnego $C_{ij}^r = C_{ij} / C_{ji}$ dla długości fali λ_o^{disp} zależy wyłącznie od różnicy wysokości profilu refrakcyjnego obu rdzeni. Optymalizacja sprzężenia mocy w światłowodzie dwurdzeniowym zawiera takie parametry jak: separacja rdzeni, wysokość bezwzględna (i ewentualnie różnicowa) profili refrakcyjnych, średnice rdzeni, różnice wymiarów rdzeni. Gdy wybrać długość światłowodu równą drodze dudnienia, wówczas mierzony sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do kontrastu między-rdzeniowego P_{12}^c . Dyspersja kontrastu międzyrdzeniowego, dla badanych próbek włókna dwurdzeniowego została przedstawiona na rys. 17.6.C. Spektralne charakterystyki sprzężenia mogą być zawężone poprzez zwiększenie wartości parametru separacji międzyrdzeniowej. To powoduje jednak znaczne zwiększenie długości drogi dudnienia Z_b . Rysunek 17.6.D. prezentuje charakterystyki spektralne wyjściowej mocy optycznej z drugiego (większego) rdzenia światłowodu dwurdzeniowego, próbka # 4. Jest to typowa charakterystyka filtru pasmowo-przepustowego. Niektóre z tych cech światłowodu dwurdzeniowego mogą być potencjalnie wykorzystane w systemach WDM.

Wpływ parametrów szkła na właściwości transmisyjne światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego. Przedmiotem analizy jest tutaj zależność współczynnika sprzężenia fali pomiędzy rdzeniami w światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym od geometrycznych i optycznych (materiałowych i technologicznych) parametrów włókna. Tak więc interesuje nas projektowanie procesu wytwarzania światłowodu, tak aby wyjściowym produktem było włókno o pożądanych rdzeni. Dobór odpowiednich charakterystykach sprzeżenia charakterystyk procesu technologicznego pozwala nam na produkcję światłowodów dwurdzeniowych o ściśle założonych wartościach współczynnika sprzężenia. Parametry podlegające zmianie przy wyborze i optymalizacji procesu technologicznego są: wybór zestawów szkieł, metoda modyfikacji procesu wielotyglowego (separacja tyglowa, diafragmowanie przestrzeni między-dyszowych, aperturowanie dysz), szczegóły konstrukcji indywidualnych tygli, temperatura i prędkość wyciągania.

Obliczone charakterystyki modów podstawowych światłowodów dwurdzeniowych w notacji modowej AS przedstawiono na rys. 17.7.



Rys. 17.7. Podstawowe modowe charakterystyki transmisyjne jednomodowego światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego. A): Krzywe dyspersji $\beta(V)$ dla modów SA1, AS1, HE11 oraz modów SS1, AA1, Δ =1,5%;B): funkcja $\Delta\beta_{AS}(V)$ dla różnych wartości parametru d/a; C): funkcja $\Delta\beta_{AS}(\Delta)$ dla V=1,3 (krzywa górna) and V=3,2 (krzywa dolna).D) Dyspersyjne charakterystyki kontrastu międzyrdzeniowego P_{12}^c w dwóch wytworzonych próbkach światłowodu bliźniaczo – rdzeniowego. Próbka #1 - rdzeń, a=3µm, Δ =0,4%, d=3µm, V=2,2; Próbka #2 - rdzeń a=2µm, Δ =0,4%, d=4µm, V=1,5;

W przypadku światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego mamy do czynienia z dwoma dokładnie jednakowymi rdzeniami. Rdzenie o promieniu "a" są usytuowane symetrycznie względem osi włókna optycznego. Odległość pomiędzy rdzeniami wynosi "D", a pomiędzy osiami rdzeni "d". Tak więc, osie rdzeni są odległe od osi włókna o a+D/2. Współczynniki załamania rdzenia i płaszcza wynoszą odpowiednio n_r oraz n_p . Zakłada się warunki słabej propagacji w analizowanym światłowodzie dwurdzeniowym. Podstawowe charakterystyki światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego przedstawiono na rys. 17.7. Jeśli fala świetlna jest sprzężona wyłącznie do pojedynczego rdzenia, wówczas znormalizowana moc optyczna w drugim rdzeniu wynosi $P(z) = \sin^2(Cz)$, gdzie C – jest współczynnikiem wzajemnego sprzężenia rdzeni. W światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym oba współczynniki sprzężenia wzajemnego rdzeni są sobie równe. Współczynnik sprzężenia w światłowodzie bliźniaczo-rdzeniowym wynosi:

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2}}{a} \frac{U^2}{V^3} \frac{K_o(Wd/a)}{K_1^2(W)},$$
(17.10)

lub droga dudnienia $Z_b = \pi/C$, gdzie: U=ka $(n_r^2 - \beta^2/k^2)^{1/2}$, W=ka $(\beta^2/k^2 - n_p^2)^{1/2}$ - argumeny funkcji Bessela, V=ka $n_r(2\Delta)^{1/2}$ - częstotliwość znormalizowana, $\Delta = (n_r^2 - n_p^2)/2n_r^2$ - współczynnik profilu refrakcyjnego. Rozwiązano równanie własne dla różnych zestawów wartości parametrów technologicznych. Z tych rozwiązań przedstawiono poniżej dwa przykłady dla dwóch różnych zestawów "A" oraz "B" szkieł rdzeniowo – płaszczowych. A - $n_r = 1,516$ oraz $n_p = 1510$; B - $n_r = 1,522$ oraz $n_p = 1511$. W porównaniu ze światłowodem dwurdzeniowym, światłowód bliźniaczordzeniowy spełnia następujące warunki modowe i sprzężenia rdzeniowego: $C_{21} = C_{12}$ oraz $\beta_1 = \beta_2$ dla $z = z_b$. Konsekwencją tych warunków jest, że moc optyczna może być transferowana z efektywnością 100% pomiędzy rdzeniami (w całkowicie idealnym włóknie optycznym). Efektywność sprzężenia nie jest dyspersyjna, jak we włóknie dwu-rdzeniowym. Wyłącznie współczynnik sprzężenia jest dyspersyjny we włóknie bliźniaczo-rdzeniowym. Jednakże, wszystkie niedoskonałości fizyczne włókna jak: odstępstwo od idealnej geometrii cylindrycznej, różnice w promieniach rdzeni i profilach refrakcyjnych, zjawiska temperaturowe (niesymetryczne osiowo), naprężenia, zakrzywienia, zjawiska nieliniowe, efekty wyższego rzędu, zmieniają sprzężenie, wartość drogi dudnienia oraz transfer mocy optycznej pomiędzy rdzeniami.



Rys. 17.8. Zależność charakterystyk światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego od materiału włókna. [53] Wykresy przedstawiają drogę dudnienia jako funkcję współczynnika separacji międzyrdzeniowej $Z_b(d)$ dla kilku próbek światłowodów o różnych średnicach rdzenia i wykonanych z dwóch różnych zestawów szkieł rdzeniowo - płaszczowych; Wykres lewy: A – zestaw szkieł $n_r = 1,516$, $n_p = 1,510$; promienie rdzeni i długości fal: $I - a = 2,4\mu m$, $\lambda = 0,85\mu m$; $II - a = 2,4\mu m$, $\lambda = 1,3\mu m$; $III - a = 3,6\mu m$, $\lambda = 0,85\mu m$; $IV - a = 3,6\mu m$, $\lambda = 1,3\mu m$; Wykres prawy: B – zestaw szkieł $n_r = 1,522$, $n_p = 1,511$; promienie rdzeni i długości fal: $I - a = 1,75\mu m$, $\lambda = 0,85\mu m$; $II - a = 1,75\mu m$, $\lambda = 1,3\mu m$; $III - a = 2,7\mu m$, $\lambda = 0,85\mu m$; $IV - a = 2,7\mu m$, $\lambda = 1,3\mu m$;





Rys. 17.9. Zależność charakterystyk światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego wytworzonego metodą MMC od materiału włókna. Obliczona długość drogi dudnienia w funkcji długości fali $Z_b(\lambda)$ dla konkretnych wytworzonych próbek światłowodu bliźniaczo-rdzeniowego. Światłowody posiadały rdzenie o dwóch różnych wartościach promienia $a=2,0\mu$ m oraz $a=2,4\mu$ m i wykonano je z zestawu szkieł rdzeniowo – płaszczowych "A"; Wykres pierwszy od lewej: $a=2\mu$ m, $I - d=5,5\mu$ m, $II - d=11\mu$ m, III - $d=16,5\mu$ m, $IV - 22\mu$ m; Wykres drugi: $a=2\mu$ m, $I - d=6\mu$ m, II - $d=10\mu$ m, III - $d=15\mu$ m; Wykresy trzeci i czwarty: Światłowody posiadały dwie różne średnice rdzeni $a=1,5\mu$ m oraz $a=1,75\mu$ m. Światłowody wykonano z kilkoma różnymi wartościami parametru separacji międzyrdzeniowej z układu szkieł płaszczowo – rdzeniowych "B"; Wykres trzeci: $a=1,75\mu$ m, $I - d=10\mu$ m, III - $d=10\mu$ m, III - $d=15\mu$ m;

Dla tych szczególnych próbek jednomodowych światłowodów bliźniaczo-rdzeniowych, wykonanych z dwóch różnych zestawów szkieł rdzeniowo – płaszczowych badano długość drogi dudnienia jak o funkcję długości fali i separacji międzyrdzeniowej "d". Rysunek 17.9 przedstawia wartość długości drogi dudnienia jako funkcji parametru separacji między-rdzeniowej "d". Funkcja $Z_b(d)$ jest liniowa dla wszystkich kombinacji argumentów " λ " oraz "a". Parametry światłowodu zostały wybrane w ten sposób aby zapewnić warunki jego jednomodowości.

Rysunek prezentuje długość drogi dudnienia jako funkcję długości fali $Z_b(\lambda)$. Porównanie krzywych na tych rysunkach pokazuje silną zależność drogi dudnienia od długości fali. Obliczone zależności posiadają poważne znaczenie praktyczne, ponieważ pozwalają na określenie warunków technologicznych wytwarzania światłowodów dwurdzeniowych i bliźniaczo-rdzeniowych o założonych wartościach współczynnika sprzężenia pomiędzy rdzeniami.

Rysunek 17.7.D. pokazuje obliczoną wartość kontrastu między-rdzeniowego w światłowodzie bliźniaczo – rdzeniowym, analogicznie do kontrastu między – rdzeniowego w światłowodzie dwu – rdzeniowym, co pokazano na rysunku 17.6.C. Tutaj jednak, transfer mocy nie jest dyspersyjny i zawsze wynosi 100%.

18. SPECYFIKA POMIARÓW ŚWIATŁOWODÓW KSZTAŁTOWANYCH

18.1. Pomiary Światłowodów Nisko-Wymiarowych

Wśród technik pomiarowych światłowodów kształtowanych szczególną przyszłość wydają się mieć metody rozwijane na potrzeby tak zwanych inteligentnych materiałów kompozytowych i światłowodowych sieci czujnikowych. Wiadomo obecnie, że stosowany w tych metodach światłowód jednomodowy powinien mieć jak najmniejszą średnicę zewnętrzną. W chwili obecnej poniżej 80µm a w przyszłości znacznie poniżej 50µm, przy drodze transmisji obecnie rzędu setek m a w przyszłości wielu kilometrów. W światłowodach tych podstawowe mierzone charakterystyki to reflektometria polaryzacyjna oraz opóźnienie grupowe i dyspersja. Pomiary te odczytują stan rozłożonego czujnika światłowodowego, pełniącego również rolę linii transmisyjnej oraz umożliwiają kompensację metrologicznych wpływów niepożądanych. Przykład takiego jednoczesnego pomiaru kilku parametrów przedstawiono na rysunku. System pomiarowy pracuje bez przerwy monitorując stan światłowodu wewnątrz laminatu.



Rys. 18.1. Pomiar opóźnienia grupowego i dyspersji w światłowodzie przeznaczonym do budowy rozłożonej sieci pomiarowej wewnątrz materiału kompozytowego (Uniwersytet Herriott-Watt).

18.2. Pomiary Światłowodów Dwójłomnych

W światłowodzie jednomodowym rozprzestrzeniają się dwa mody zdegenerowane spolaryzowane w kierunkach ortogonalnych. W idealnych warunkach, idealnej cylindrycznej geometrii i izotropii światłowodu mod o polaryzacji x nie jest sprzężony z modem o polaryzacji y. W rzeczywistości, mała zaburzenia cylindrycznej geometrii, fluktuacje anizotropii materiału powodują mieszanie dwóch stanów polaryzacyjnych, łamiąc zdegenerowanie modu. Stała propagacji β jednakowa dla obu stanów polaryzacji w stanie zdegenerowanym staje się nieco różna i wynosi β_x oraz β_y . Stopień dwójłomności jest zdefiniowany jako:

$$\mathbf{B} = |\mathbf{\beta}_{\mathbf{x}} - \mathbf{\beta}_{\mathbf{y}}|/\mathbf{k}_{\mathbf{o}} = |\mathbf{n}_{\mathbf{x}} - \mathbf{n}_{\mathbf{y}}|, \qquad (18.1)$$

gdzie: n_x , n_y – efektywne modowe współczynniki załamania dwóch ortogonalnych stanów polaryzacyjnych modu podstawowego. W zależności od tego która wartość efektywnego współczynnika załamania jest większa a która mniejsza tą oś nazywamy wolną lub szybką. Moc pomiędzy oboma modami jest wymieniana okresowo wzdłuż światłowodu. Okres ten nazywany jest drogą dudnienia i wynosi i:

$$\mathbf{L}_{\mathbf{B}} = 2\pi/|\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{y}}| = \lambda/\mathbf{B}$$
(18.2)

W jednomodowym światłowodzie konwencjonalnym wartość B nie jest stała wzdłuż jego długości ale zmienia się przypadkowo. Stan polaryzacji fali wejściowej nie jest utrzymywany wzdłuż włókna. Dla wielu zastosowań konieczne jest aby światłowód utrzymywał stan polaryzacji fali wejściowej. Duża dwójłomność jest wprowadzana do takich światłowodów konstrukcyjnie i technologicznie (eliptyczny rdzeń lub płaszcz, lub wewnętrzne pręty naprężeniowe) tak, że niewielkie przypadkowe fluktuacje naturalne nie mają większego znaczenia. Dwójłomność modowa zależy od szczegółów konstrukcji włókna, jak: lokalizacja, grubość, kształt prętów naprężeniowych. Na rys. 18.2. przedstawiono charakterystyki dwójłomności B w zależności od konstrukcji światłowodu.



Rys. 18.2. Zmiana współczynnika dwójłomności B w funkcji grubości d pręta naprężającego dla czterech różnych konstrukcji światłowodu tzn. różnych kształtów wewnętrznych elementów naprężeniowych.

Pomiary i zastosowania światłowodów dwójłomnych wymagają lokalizacji osi szybkiej i wolnej. Jeśli stan polaryzacji fali wejściowej jest w koincydencji z którąkolwiek z osi polaryzacji to pozostanie stały wzdłuż światłowodu. Jeśli oś polaryzacji fali wejściowej tworzy dowolny kąt z osią polaryzacji światłowodu, to stan polaryzacji fali zmienia się okresowo z drogą dudnienia.

Światłowody dwójłomne są wykorzystywane w systemach światłowodowych jako polaryzatory, jednopolaryzacyjne linie transmisyjne do transmisji koherentnej, czujniki, sprzęgacze polaryzacyjne, itp. Technika pomiarowa światłowodów dwójłomnych jednopolaryzacyjnych musi uwzględniać charakterystyki polaryzacyjne takich światłowodów spowodowane anizotropią optyczną indukowaną naprężeniami. Typową charakterystykę spektralną tłumienia takiego światłowodu przedstawiono na rys. 18.3.



Rys. 18.3. *Charakterystyka spektralna tłumienia polaryzantów ortogonalnych modu podstawowego w jednomodowym światłowodzie o dużej dwójłomności.*

W laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20] wykonuje się pomiary właściwości spektralnych podzespołów światłowodowych, włączając w to charakterystyki światłowodów dwójłomnych. Wykorzystuje się zmodyfikowany układ pomiaru tłumienia spektralnego metodą odcięcia.

Ze względu na polaryzacyjne właściwości tych światłowodów i konieczność orientacji kątowej względem osi długiej, konieczna jest modyfikacja metod pomiarowych. Pomiary właściwości polaryzacyjnych światłowodów są odrębną szeroką dziedziną miernictwa światłowodowego.


Rys. 18.3. Pomiar rozkładu naprężeń wewnętrznych w światłowodzie anizotropowym.

18.3. Pomiary Światłowodów Eliptycznych

Światłowody o eliptycznych rdzeniach posiadają właściwości dwójłomne. Są one słabsze niż dla światłowodów z mechanicznie indukowaną dwójłomnością. W przypadku światłowodów eliptycznych znormalizowany parametr dwójłomności jest rzędu $B=10^{-6}$, podczas gdy dla światłowodów panda i bow-tie wynosi $B=10^{-4}$ (droga dudnienia jest rzędu $L_B=1$ cm). Metody pomiarowe są podobne jak dla światłowodów dwójłomnych z różnicą w systemie sprzężenia mocy uwzględniającą eliptyczny kształt rdzenia.



Rys. 18.4. Fotografie światłowodów o rdzeniach eliptycznych, jednomodowego i wielomodowego.

19. POMIARY KABLI ŚWIATŁOWODOWYCH

Kable światłowodowe posiadają swoją odrębną specyfikę pomiarów optycznych, mechanicznych i fizyko-chemicznych, oraz środowiskowych, wyrażoną nawet poprzez istnienie osobnych międzynarodowych norm pomiarowych. W zasadzie dla testowych partii kabli, u wytwórcy, powtarza się większość pomiarów optycznych dla indywidualnych światłowodów umieszczonych w kablu. Kable posiadają wiele standaryzowanych rozwiązań, przy czym najbardziej interesująca jest ta część struktury kabla, która bezpośrednio współdziała mechanicznie z włóknem. Strukturę tą nazywamy buforem od roli którą pełni wobec włókna, czyli buforowania zmian długości kabla w funkcji naprężenia. Podstawowe rodzaje buforów to: luźny jednowłóknowy i wielo-włóknowy (wypełnione i niewypełnione), obcisły i mieszany oraz wstążkowy. W ramach takich struktur podstawowych istnieją rozwiązania konstrukcyjne z tzw. buforem rurkowym, rowkowym, z pokryciem miękkim, twardym, mieszanym, poślizgowym. Różne struktury kabli powinny mieć teoretycznie jak najmniejszy wpływ na charakterystyki propagacyjne światłowodu. Tak jest w pewnym zakresie warunków pracy kabla. Jednakże w zakresie warunków nominalnych wpływ kablowania może być także mierzalny, np. poprzez mikro-zgięcia światłowodu. Dopuszczalny wpływ opisują przyjęte normy międzynarodowe. Szczególnie w przypadku pracy kabla w trudnych warunkach środowiskowych (systemy przemysłowe, municypalne, podwodne) dokładne charakterystyki wpływu struktury kabla na światłowód powinny być znane zarówno teoretycznie jak i precyzyjnie zmierzone.

Jeszcze inną specyfiką charakteryzują się pomiary polowe kabli optycznych i światłowodów w rzeczywistych warunkach pracy systemów telekomunikacyjnych, przy czym rozróżnia się tu szereg grup warunków np. otwarte środowisko czy wewnątrz budynku itp. Używany jest inny rodzaj sprzętu przeznaczonego do pracy w warunkach polowych. Stosowaną metodą pomiaru jest reflektometria do lokalizacji uszkodzeń włókna czy np. rosnących ponadnormatywnie strat złącza i spawu.

Ze względu na dylatację termiczną kabla, włókna optyczną biegną drogą helikalną (skrętną). Zależność pomiędzy wymiarami promienia oplotu R, długości włókna oplotu L [mm], długości kładzenia kabla S [mm], kąta oplotu α [°], obwodu koła oplotu 2π R, promieniem krzywizny linii śrubowej ρ , jest:

$$L = S \sqrt{1 + (\frac{2\pi R}{S})^2},$$
 (19.1)

$$\alpha = \arctan(S/2\pi R), \tag{19.2}$$

$$\rho = R\{1 + (S/2\pi R)^2\}, \qquad (19.3)$$

co przedstawiono na rys.19.1. Dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości i strat światłowodu promień ρ nie powinien być zbyt mały. Wyróżnia się kilka sposobów oplotu: helikalny jednokierunkowy oraz helikalny naprzemienny typu SZ. NA rys.19.1. przedstawiono zależność promienia ρ od długości kładzenia S dla ustalonej wartości promienia oplotu dla dwóch granicznych przypadków oplotu SZ i oplotu helikalnego. Typowa wartość ρ dla światłowodów wielomodowych wynosi ρ =65mm.



Rys. 19.1. a) Zależność pomiędzy parametrami geometrycznymi kabla i długością światłowodu, 1 – S, długość kładzenia kabla; 2 – L, długość elementu oplotu; 3 - $2\pi R$, długość obwodu koła oplotu; α - kąt zwoju oplotu; (wstawka na wykresie) b) Funkcja $B_r = \rho(S)$, zależność promienia zakrzywienia ρ od długości kładzenia dla różnego oplotu kabla światłowodowego.

Dopuszczalna względna zmiana długości (skrócenie lub wydłużenie) kabla optycznego $\epsilon=\Delta L/L$ spowodowane zmianami temperatury i naprężeniem wynosi:

$$\varepsilon = -1 + \sqrt{\frac{4\pi^2 R^2}{S^2} \left(\frac{2\Delta R}{R} \pm \frac{\Delta R^2}{R^2}\right)},$$
(19.4)

gdzie znak plus w nawiasie jest dla skurczenia kabla a znak minus dla wydłużenia. Charakterystykę pomiarową wydłużenia światłowodu ε_F i wydłużenia kabla światłowodowego ε_K oraz skurczenia kabla ε_{TK} dla konstrukcji oplotu światłowodowego w pojedynczym luźnym buforze przedstawiono na rys. 19.2.



Rys.19.2. Charakterystyka wydłużenia światłowodu w funkcji zmian długości kabla światłowodowego dla konstrukcji luźnego buforu jedno-światłowodowego. ε_F – wydłużenie światłowodu, ε_K – wydłużenie kabla, ε_{TK} – skurczenie kabla, D – średnica oplotu, B – obszar naprężenia krytycznego.

Wiele wymagań nakłada się na kable optyczne jeśli chodzi o właściwości transmisyjne i warunki środowiskowe pracy. Podczas gdy właściwości transmisyjne zależą oczywiście głównie od zastosowanych włókien światłowodowych, odpowiedź kabla na warunki środowiskowe zależy od jego konstrukcji. Istnieje szereg metod mechanicznych i termicznych testowania i pomiarów kabli optycznych. Pomiary te są stosowane w celach projektowych, określenia parametrów katalogowych produktu, przewidywania zachowania kabla w nietypowych i typowych warunkach pracy, optymalizacji konstrukcyjnej, a także w celach eksploatacyjnych. Najważniejsze z tych pomiarów dotyczą wytrzymałości mechanicznej na zrywanie i narażenia poprzeczne oraz odporności termicznej.

Silne naprężenia wzdłużne mogą występować w czasie układania kabla. Naprężenia te nie mogą przekroczyć takiego poziomu aby wpływać bezpośrednio na pracę włókien optycznych. To samo dotyczy już zainstalowanych kabli. Poziom naprężeń nie może się akumulować i posiadać stałego wpływu na włókna. Z tego powodu stosuje się wewnątrz kabla strukturę bezpośrednich buforów dla światłowodów. Bufory mogą być jedno-światłowodowe lub wielo-światłowodowe i posiadać jedną z kilku standardowych struktur. Włókno posiada stopień swobody poruszania się w buforze, co stanowi izolację od naprężeń przenoszonych przez inne struktury wewnętrzne kabla optycznego, np. linkę centralną, oplot Kevlarowy itp. Zakres tego stopnia swobody stanowi tzw.

okno pracy kabla optycznego. Na rysunku 19.3. przedstawiono przykładową charakterystykę okna pracy kabla światłowodowego.



Rys. 19.3. Przykład charakterystyki "okna pracy" kabla optycznego. Przykładowy kabel z luźnym buforem jedno- lub wielo-światłowodowym.

Szerokość tego okna mechaniczno – termicznego jest precyzyjnie mierzona przez wytwórców kabli i większych użytkowników i zależy od wielu szczegółów konstrukcyjnych kabla optycznego. Parametr ten także podlega normalizacji i klasyfikacji. Pomiary wykonywane są na kablu katalogowym. Mierzone są: zakres wydłużeń w teście wytrzymałości na zrywanie i zakres kurczenia się w teście termicznym. Rejestrowane są następujące parametry w teście zrywania: $\varepsilon_{\rm K}$ – wydłużenie kabla, $\varepsilon_{\rm F}$ – wydłużenie włókna optycznego, zmiana w tłumieniu sygnału optycznego $\Delta \alpha$. Wymienione parametry są mierzone w funkcji siły rozciągającej F. Precyzyjniejsze pomiary uwzględniają także reflektometrię polaryzacyjną i modową dyspersję polaryzacyjną także w funkcji siły F. Przykładowe rozwiązanie kablowego systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 19.4. Mierzone jest jednorazowo ok. 100 m długości kabla.



Rys. 19.4. Schemat blokowy systemu pomiarowego do badania wytrzymałości mechanicznej kabla optycznego na rozciąganie. 1 – maszyna wyciągająca, 2 – miernik wydłużenia, 3 – kabel optyczny, 4 – laser impulsowy, 5 – nadajnik pomiarowy, 6 – odbiornik pomiarowy, 7 – odbiornik impulsowy, 8 – system obrazowania danych, 9 – komputerowy system nadzoru pomiarów.

Wydłużenie kabla jest mierzone przez miernik wydłużenia umocowany do zewnętrznego pokrycia kabla a wydłużenie włókna optycznego jest określane poprzez pomiar czasu opóźnienia impulsu. Zmiana tłumienia jest mierzona w specjalizowanym wielokanałowym układzie pomiaru tłumienia przyrostowego, tak że mierzone są w czasie jednego cyklu rozciągania kabla, wszystkie umieszczone w nim włókna optyczne, zarówno wielomodowe jak i jednomodowe. Pomiary mogą być dokonywane w funkcji długości fali raczej w sposób wielopunktowy (kilka długości fali) niż ciągły. Dane z takiego pomiaru są zapisywane w systemie komputerowym. Przykładową charakterystykę pomiarową przedstawiono na rysunku. Wyniki pomiarów pokazują, że gdy włókno zaczyna się rozciągać, przy sile rozciągającej F = 3000N, tłumienie zaczyna także wzrastać. Zmiany w tłumieniu są do pewnego obciążenia kabla, w zasadzie całkowicie, odwracalne. To znaczy po zdjęciu obciążenia tłumienie maleje.



Rys. 19.5. Zapis zmierzonej charakterystyki kabla optycznego z luźnym buforem jednoświatłowodowym lub wielo-światłowodowym. Przedstawiono następujące funkcje siły rozciągającej kabel F: $\Delta\alpha(F)$ – optyczne tłumienie przyrostowe, $\varepsilon_K(F)$ – wydłużenie kabla optycznego, $\varepsilon_F(F)$ – wydłużenie światłowodu.

Kable optyczne mogą być narażane ogólnie na stosunkowo szerokie zmiany warunków pracy, w tym szczególnie termicznych, zarówno w czasie przechowywania jak i w nominalnych warunkach pracy. Kable zakopane lub ułożone w duktach kablowych narażone są zazwyczaj na stosunkowo niewielkie termiczne zmiany warunków pracy. Kable zawieszone powietrzne doznają znacznie większych zmian warunków pracy zarówno pod względem termicznym jak i mechanicznym. Dla znormalizowanych zakresów temperatur nominalnych kabel nie może w żaden sposób zmieniać swoich parametrów transmisyjnych. W celu określenia charakterystyk termicznych kabla optycznego dokonuje się standaryzowanych pomiarów w komorze termicznej. Układ pomiarowy jest analogiczny do systemu pomiaru tłumienia. Kabel bada się dla różnych cykli termicznych, krótko, średnio i długo-terminowych a także dla cyklicznie powtarzanych szoków termicznych. Na rysunku 19.6 przedstawiono przykładową zmierzoną charakterystykę termiczna kabla optycznego.



Rys. 19.6. Zmiana tłumienia kabla optycznego $\Delta \alpha(T)$ dla długości fali λ =1300nm jako funkcja temperatury. Przykładowy wynik pomiaru dla kabla z luźnym buforem wielo-włóknowym.

Przykładowa pomiarowa charakterystyka funkcji $\Delta\alpha(T)$ pokazuje, że średnia zmiana tłumienia dla długości fali λ =1300nm i T=-40°C jest mniejsza niż 0,1dB/km. Obie charakterystyki termiczną i mechaniczną dla kabli optycznych przedstawia się na jednym wykresie nazywanym oknem pracy kabla optycznego.

W zależności od zastosowania kabel światłowodowy może podlegać innym narażeniom. Takie charakterystyki także są mierzone. Kable światłowodowe powietrzne a także kładzione wzdłuż dróg, na mostach, wzdłuż torów kolejowych mogą podlegać stosunkowo silnym drganiom. W aparaturze przemysłowej i medycznej kable światłowodowe stanowiące część sygnałowego okablowania strukturalnego mogą podlegać szerokiemu zakresowi cyklicznych ruchów zgięciowych i skręceniowych. W czasie instalacji trzeba brać także pod uwagę odporność kabla na mechaniczne oddziaływania poprzeczne. Ze względu na koszty kabla i instalacji przeznaczone są one często do pracy w dłuższym okresie czasu, w związku z czym przeprowadzane są długoterminowe (ok. pół roku) pomiary starzeniowe w podwyższonej temperaturze, ok. 70^oC. Niektóre kable wymagają podwyższonej odporności na otwarty ogień, co jest także przedmiotem znormalizowanych procedur pomiarowych. Inne pomiary obejmują grupę odporności na oddziaływania chemiczne: oleje, benzyna, roztwory kwaśne i zasadowe. Specjalistyczne pomiary właściwości kabli optycznych mogą obejmować: blokowanie gazu i cieczy, odporność na wysokie ciśnienie, odporność na gryzonie, bakterie, pleśnie, odporność na promieniowanie jonizujące.

20. POMIARY SYSTEMU ŚWIATŁOWODOWEGO

Pomiary teletransmisyjnych systemów światłowodowych obejmują następujące grupy elementów składowych systemu:

- Pomiary światłowodów i kabli światłowodowych, osprzętu kablowego,
- Pomiary biernych elementów światłowodowych, sprzęgaczy, złączy światłowodowych, polaryzatorów,
- Pomiary aktywnych elementów światłowodowych, wzmacniaczy, światłowodowych elementów unilateralnych np. izolatorów, cyrkulatorów fotonicznych
- Pomiary aktywnych elementów optoelektronicznych: diod elektroluminescencyjnych, laserów półprzewodnikowych, fotodiod.,
- Pomiary układów optoelektronicznych i elektronicznych, nadajników i odbiorników, modulatorów, koderów, przełączników,
- Pomiary systemu transmisyjnego jako całości.

20.1. Pomiary Biernych i Aktywnych Elementów Światłowodowych

Poprzednio mierzyło się każdy element w sposób indywidualny, w zależności od jego specyfiki. Obecnie wyraźna jest dominacja metody optycznego rozproszenia wstecznego. Wraz z wszechstronnym rozwojem tej metody w sensie dynamiki pomiaru i rozdzielczości przestrzennej dla zakłócenia pojedynczego i wielokrotnego stosuje się OTDR do szerokich pomiarów wielu elementów światłowodowych biernych jak sprzęgacze światłowodowe, złącza, ale także innych jak obudów elementów biernych i aktywnych, światłowodów aktywnych, itp. Oczywiście w wielu przypadkach nadal utrzymała się specyfika dokładnych kalibracyjnych pomiarów poszczególnych fotonicznych elementów funkcjonalnych.

W Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW [20] do pomiaru właściwości spektralnych podzespołów światłowodowych wykorzystuje się modyfikowany układ do pomiaru tłumienia w funkcji długości fali metodą odcięcia. Dla sprzęgaczy światłowodowych mierzy się następujące parametry (parametry te wyraża się w [%] lub [dB]:

- Współczynnik sprzężenia C_R jako stosunek mocy światła w danej gałęzi wyjściowej do sumy mocy we wszystkich gałęziach wyjściowych;
- Współczynnik podziału S_R jako stosunek mocy w dwóch gałęziach wyjściowych;
- Efektywność sprzężenia lub straty wtrącenia L_I jako tłumienność określonej drogi przez element;
- Straty wewnętrzne L_E jako wielkość mocy traconą wewnątrz sprzęgacza;
- Kierunkowość D jako tłumienność sygnału wejściowego na innym wejściu nie pobudzonym.

Dla multiplekserów światłowodowych w wymienionym laboratorium [20] mierzy się: efektywność sprzężenia, izolację między gałęziami wyjściowymi, pasmo przenoszenia dla określonego poziomu izolacji oraz kierunkowość.

Przy pomiarach właściwości polaryzacyjnych do układu monochromatora w podstawowym rozwiązaniu systemu pomiarowego [20] należy dodać dodatkowe elementy: depolaryzator, którego zadaniem jest usunięcie stanu częściowej polaryzacji wywołanej przejściem światła przez siatkę dyfrakcyjną monochromatora i umieszczony na wyjściu obrotowy szerokopasmowy polaryzator, który służy do ustalenia kierunku polaryzacji wprowadzanego światła względem np. dwójłomnej struktury światłowodu, przy czym współczynnik ekstynkcji polaryzacji światła w polaryzatorze określa stosunek mocy na wyjściu spolaryzowanego liniowo sygnału transmitowanego względem mocy sygnału tłumionego do niego ortogonalnego.

20.2. Pomiary Źródeł Światła

W Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20] dokonywane są pomiary źródeł światła głównie dla potrzeb techniki światłowodowej. Na rysunku przedstawiono schemat funkcyjny stanowiska laboratoryjnego do pomiaru gęstości falowej luminancji energetycznej źródeł termicznych i elektroluminescencyjnych dla wybranych długości fali. Pomiary obejmują np. moc promieniowania. Diody elektroluminescencyjne mierzone są w układzie przedstawionym na rysunku 20.1. Pomiarom podlegają: charakterystyka spektralna, gęstość falowa luminancji energetycznej.



Rys. 20.1. Schemat funkcjonalny laboratoryjnego stanowiska do pomiaru gęstości falowej luminancje energetycznej źródła termicznego i diody elektroluminescencyjnej oraz charakterystyki widmowe diody elektroluminescencyjnej. Zestaw jest częścią laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20]



Rys. 20.2. Schemat funkcji stanowiska do pomiaru zależności optycznej mocy wyjściowej od prądu pompowania diody elektroluminescencyjnej i lasera półprzewodnikowego. . Zestaw jest częścią laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20].



Rys. 20.3. Schemat funkcyjny stanowiska laboratoryjnego do pomiaru rozkładu przestrzennego promieniowania diody elektroluminescencyjnej i lasera półprzewodnikowego. Zestaw jest częścią laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20].



Rys. 20.4. Schemat funkcyjny stanowiska laboratoryjnego do pomiaru widma i rozkładu przestrzennego promieniowania lasera gazowego He-Ne. Zestaw jest częścią laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20].W układzie uzyskuje się zobrazowanie widma lasera, a z geometrii rezonatora wyznacza się odstęp modów osiowych lasera w dziedzinie częstotliwości i dziedzinie długości fali. Dokonuje się także pomiaru rozkładu przestrzennego promieniowania.

20.3. Pomiary Fotodiod

Charakterystyki zastosowanych fotodiod w systemie światłowodowym zależą w dużej mierze od zadania systemu. W fotonicznych systemach pomiarowych fotodiody są używane jako kalibrowane odbiorniki sygnału pomiarowego, w systemach transmisyjnych jako odbiorniki strumienia danych optycznych. Konstrukcja obudowy fotodiody powinna umożliwiać łatwe sprzężenie ze światłowodem. Połączenie powinno być łatwo rozłączalne w przypadku systemów pomiarowych, gdzie mierzonych jest np. wiele próbek włókna optycznego. W systemach transmisyjnych takiej potrzeby nie ma, więc fotodiody są na stałe zakańczane wejściem światłowodowym, a niskostratne połączenia robi się pomiędzy światłowodami.

Tutaj ograniczymy się do kilku uwag na temat zastosowań i charakterystyki fotodiod w układach pomiarowych. Przy pomiarze tłumienia światłowodu zakończeniem optycznym systemu pomiarowego jest fotodioda. Wspomniano o problemie powtarzalnego połączenia światłowodu ze źródłem światła. Wielu problemów technicznych z tym związanych unika się poprzez zastosowanie metody odcięcia. Nie można tak zrobić w odniesieniu do fotodiody. Występuje tutaj również problem uzyskania powtarzalnego sprzężenia końca światłowodu z fotodiodą. Nie jest on tak drastyczny jak w przypadku źródła. Praktycznie najlepsze rozwiązanie uzyskuje się w najprostszy sposób optycznego połączenia na styk z zastosowaniem płynu immersyjnego. Średnica powierzchni fotoczułej diody powinna być jak najmniejsza, ze względu na właściwości szumowe (proporcjonalne do wielkości powierzchni fotoczułej) oraz szybkość działania. Jeśli zastosowano w systemie pomiarowym sprzężenie światłowodu na styk to przy odpowiednio precyzyjnej obudowie fotodiody w sensie centrowania z zakończeniem światłowodu, jej powierzchnia fotoczuła może być niewiele większa od średnicy rdzenia włókna optycznego. Jeśli sprzężenie następuje przez szczelinę powietrzną to średnica fotodiody powinna uwzględniać rozbieżność wiązki ze światłowodu. Jeśli sprzężenie następuje przy pomocy układu optycznego to wymiary skupionej plamki świetlnej ze światłowodu zależą od szczegółów budowy optycznego układu sprzężenia. Sprzężenie ze światłowodem wielomodowym zależy od wielkości apertury numerycznej, a w światłowodzie jednomodowym od średnicy pola modu. Jeśli układ pomiarowy jest uniwersalny i służy do pomiaru wielu światłowodów to sprzeżenie powinno być dobrane do światłowodu o największej mierzonej aperturze numerycznej.

Istotnymi parametrami fotodiody, oprócz jej wymiarów i sposobu sprzężenia ze światłowodem, są: czułość i jednorodność czułości po powierzchni fotoczułej fotodiody. Powierzchniowa stałość czułości w sprzężeniach rozłączalnych (a więc w układach pomiarowych) jest istotna bo przy każdym połączeniu światłowód może nieco inaczej przylegać do fotodiody, a więc nieco inny będzie rozkład natężenia promieniowania ze światłowodu na powierzchni fotodiody. Przy pomiarach światłowodów, a w szczególności tłumienia i dyspersji stosowane są selekcjonowane fotodiody o wysokich standaryzowanych parametrach, dokładnie zmierzone i katalogowane. Na rysunku 20.5. pokazano przykładowe zmierzone charakterystyki fotodiody takie jak: mapa rozkładu czułości po powierzchni fotoczułej, pojedynczy skan czułości w przekroju poprzecznym oraz liniowość charakterystyki.



Rys. 20.5. *Charakterystyki rozkładu czułości na powierzchni fotoczułej i liniowości charakterystyki fotodiody Ge stosowanej w przyrządach pomiarowych (firma 3M-Photodyne) [20].*

Jeśli mierzone są charakterystyki spektralne tłumienia światłowodu istotne są charakterystyki spektralne fotodiody. Na rys. 20.6. podano przykładowe charakterystyki fotodiod z różnych materiałów półprzewodnikowych. Fotodiody krzemowe są odpowiednie dla pasma 300 – 900 nm. Fotodiody germanowe posiadają stosunkowo duży prąd ciemny. Najczęściej obecnie stosuje się fotodiody z półprzewodników czteroskładnikowych.



Rys. 20.6. Charakterystyki czułości spektralnej fotodiod: Si – krzemowej, Ge – germanowej, InGaAsP – wieloskładnikowej [20].

20.4. Pomiary Modulatorów Światła

W skład światłowodowego systemu teletransmisyjnego wchodzą układy modulacji fali świetlnej. W systemach eksploatacyjnych są to urządzenia zintegrowane z nadajnikiem optoelektronicznym współpracującym z laserem półprzewodnikowym. Lasery półprzewodnikowe mają bardzo szerokie możliwości modulacji jeśli chodzi o ograniczenia częstotliwościowe, natomiast są ściśle ograniczone pod względem energetycznym, dając przy większych częstotliwościach modulacji impulsy o coraz mniejszej energii. W systemach laboratoryjnych często, także ze względów dydaktycznych i badawczych używa się zewnętrznych modulatorów elektrooptycznych, także w rozwiązaniach przystosowanych dla techniki światłowodowej.

W Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW [20] opracowano zestaw laboratoryjny do badania i pomiarów elektrooptycznych modulatorów światła. W modulatorach elektrooptycznych stosuje się monokryształy optycznie anizotropowe. Anizotropia optyczna polega na tym, że właściwości optyczne zależą od kierunku. Można to przedstawić przy pomocy przestrzennego wykresu współczynnika załamania. Taką figurę nazywamy indykatrysą współczynnika załamania.



Rys. 20.7. Indykatrysa współczynnika załamania dla optycznego kryształu anizotropowego. W ogólnym przypadku wszystkie trzy wartości współczynnika załamania mogą być różne. Jeśli dwie wartości są równe to elipsoida jest obrotowa i mówimy o kryształach jednoosiowych. $n_o -$ współczynnik załamania fali zwyczajnej, $n_e -$ współczynnik załamania fali nadzwyczajnej. Dla tantalanu litu LiTaO₃ – kryształu optycznie dodatniego zachodzi $n_o < n_e$. Dla niobianu litu LiNbO₃ – kryształu optycznie ujemnego zachodzi $n_e < n_o$.

Nieliniowa zależność polaryzacji ośrodka w którym rozprzestrzenia się fala optyczna od pola elektrycznego jest źródłem elektów elektrooptycznych. Efekty magnetooptyczne, akustooptyczne i elastooptyczne mają podobne podłoże tylko odnoszą się do pól magnetycznych i akustycznych oraz stałych naprężeń mechanicznych. Wśród efektów elektrooptycznych można wymienić: liniowy efekt elektrooptyczny Pockelsa, kwadratowy efekt elektrooptyczny Kerra oraz szereg efektów elektrooptycznych wyższego rzędu. Pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola elektrycznego następuje zmiana kształtu indykatrysy. Nazywamy to wymuszoną anizotropią optyczną (wymuszoną dwójłomnością). Liniowy efekt elektrooptyczny Pockelsa opisany jest zależnością: $\Delta(1/n_i^2)=r_{ij}E_{j}$, gdzie 1=1,2...6, j=1,2,3, r_{ij} – są współczynnikami liniowego efektu elektrooptycznego tworzącymi macierz 6x3, E_j – składowe modulującego pola elektrycznego. Liniowy efekt Pockelsa zachodzi w kryształach bez środka symetrii – piezoelektrykach. Współczynniki r_{ij} są rzędu 10⁻¹¹ [m/V].Natężenia pól modulujących są rzędu 10⁵V/m, więc zmiany $\Delta(1/n_i^2)$ są rzędu 10⁻⁶. Równanie Pockelsa można zapisać w postaci uproszczonej: $\Delta n_i = -n_i^3 r_{ij}E_i/2$.

Kwadratowy efekt elektrooptyczny występuje w ośrodkach środkowo-symetrycznych.

W akustooptycznych modulatorach światła wykorzystuje się ugięcie fali świetlnej na generowanej w krysztale optycznym drogą akustyczną siatce Bragga. Komórka Bragga może wykorzystywać objętościową bądź powierzchniową falę ultradźwiękową. Ośrodkiem jest najczęściej kryształ piezoelektryczny ale także szkło kwarcowe.



Rys. 20.8. Komórka Bragga jako akustooptyczny modulator światła. A – fala nieugięta rzędu zerowego, b – fala ugięta rzędu +1, c – fala a zwiększonym ugięciu spowodowanym wzrostem częstotliwości fali akustycznej o Δf_a [20].

W akustooptycznym modulatorze natężenia światła wykorzystuje się zależność natężenia ugiętej fali świetlnej I_s od mocy fali akustycznej P_a modulowanej częstotliwością f_a. Zakładając proporcjonalność mocy akustycznej w ośrodku akustooptycznym i mocy elektrycznej pobudzającej przetwornik w postaci P_a = kU_m otrzymuje się prosty opis modulatora: I_s = I_o sin²(kU_m). Istnieje cały szereg ograniczeń na częstotliwość f_s. Nie może być zbyt mała ze względu na rozdzielczość przestrzenną pomiędzy wiązkami ugiętą i nie ugiętą. Powinna być większa od maksymalnej częstotliwości sygnału modulującego amplitudę napięcia modulującego, czyli od szerokości pasma modulatora B. Szerokość pasma modulatora ograniczona jest czasem przejścia fali akustycznej przez wiązkę świetlną o średnicy d_{opt}.

Modulatory akustooptyczne znajdują liczne zastosowania w fotonicznych układach pomiarowych, do modulacji dobroci rezonatora lasera w celu uzyskania pracy impulsowej, jako deflektory wiązki laserowej, w analizatorach widma w czasie rzeczywistym, w analogowych procesorach fotonicznych (splot, korelacja sygnałów optycznych) w reflektometrach światłowodowych. Na rysunku przedstawiono akustooptyczny układ pomiarowy do analizy widmowej sygnałów w czasie rzeczywistym.



Rys. 20.9. Schemat blokowy układu pomiarowego do akustooptycznej analizy widma sygnału wzbudzającego w czasie rzeczywistym. W analizatorze wykorzystuje się zależność kąta ugięcia wiązki światła od częstotliwości akustycznej. Przetworniki elektroakustyczne w układzie schodkowym zapewniają optymalne ukierunkowanie fali akustycznej dla każdej częstotliwości analizowanego widma [20]. Fragment Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW.

Mechaniczny modulator światła w połączeniu ze wzmacniaczem i woltomierzem homodynowym jest często używany w laboratorium pomiarowym optoelektroniki do pomiaru bardzo słabych sygnałów świetlnych. Napędzany jest synchronicznym silnikiem elektrycznym. Wzmacniacz homodynowy dokonuje wzajemnej korelacji sygnałów odniesienia i pomiarowego. Sygnał pomiarowy jest maskowany przez szum i zakłócenia. Zakłócenia o częstotliwości innej niż częstotliwość odniesienia mogą być uśrednione do zera przez dostatecznie długi czas pomiaru, będący czasem uśredniania. Uzyskuje się poprawę stosunku sygnału do szumu nawet o 100dB.



Rys. 20.10. Mechaniczny modulator światła i woltomierz/wzmacniacz homodynowy w zastosowanie do pomiaru bardzo słabych sygnałów optycznych. Część Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20].

W Laboratorium Optoelektroniki ISE PW przedmiotem pomiaru jest kilka różnych modulatorów światła stosowanych w optoelektronice i technice światłowodowej: skompensowany termicznie modulator na tantalanie litu oraz nie skompensowany termicznie modulator na ADP [20]. Stanowisko pomiarowe do badania elektrooptycznego modulatora światła przedstawiono na

rys. 20.11. Źródłem jest laser He-Ne (633nm) o liniowo spolaryzowanej wiązce promieniowania. Odwrócony teleskop zmniejsza średnicę wiązki i ją kolimuje. Jako odbiornik promieniowania zastosowano fotopowielacz. Do modulatora można doprowadzić napięcia stałe i zmienne.



Rys. 20.11. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru elektrooptycznego modulatora natężenia światła. Część Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW [20].

W Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego ISE PW przedmiotem pomiaru jest także modulator akustooptyczny wykonany przez IFT WAT na krysztale PbMoO₄. Modulator jest przeznaczony do współpracy z laserem He-Ne, zakres częstotliwości akustycznych $f_a = 100 - 140$ MHz, kąt Bragga 3°, moc wzbudzenia 3W. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 20.12.



Rys. 20.12. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru akustooptycznego modulatora natężenia światła. Część Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW [20]

20.5. Pomiary Systemu Transmisyjnego

Pomiary światłowodowego systemu teletransmisyjnego jako całości są opisane międzynarodowymi normami dotyczącymi układów i systemów telekomunikacyjnych. Do grupy parametrów systemowych, które podlegają pomiarom bezpośrednim, bądź obliczeniom i ocenie należą, między innymi: bilans mocy optycznej systemu transmisyjnego, szumy w systemie, stopa błędów transmisji, odporność na zakłócenia środowiskowe i wiele innych.

20.6. Inne Pomiary Fotoniczne

Inne pomiary fotoniczne mogą obejmować wszystkie systemy elektroniczne, gdzie zastosowano elementy, podzespoły i sprzęt fotoniczny. Przykładem są układy z fotonicznym sprzężeniem zwrotnym otwartym i zamkniętym (transoptory szczelinowe, linijki fotoniczne, itp.), napędy CD/DVD ze źródłem laserowym, itp.

Pomiary fotoniczne obejmują także systemy zobrazowania, akwizycji informacji obrazowej, transmisji, bezpośrednich fotonicznych metod obróbki obrazu, itp.

Pomiary fotoniczne obejmują również analogowe i cyfrowe procesory informacji fotonicznej. Analogowe procesory fotoniczne mogą dokonywać operacji matematycznych na sygnale obrazowym jak: transformatę Fouriera, podstawowe działania arytmetyczne, wykonywanie funkcji złożonych jak: splot, korelacja, konwolucja itp.

Niektóre z wymienionych powyżej funkcji pomiarowych wykonywane są w rozszerzonym zestawie Laboratorium Miernictwa Optoelektronicznego w ISE PW i oferowane zainteresowanym zespołom badawczym i kontrahentom przemysłowym.

21. SPRZĘT POMIAROWY

Do pomiarów światłowodów i kabli światłowodowych stosowanych jest kilka grup sprzętu. Systemy laboratoryjne stosowane w laboratoriach badawczych i wzorcowych posiadają na ogół jeszcze ciągle unikalny charakter i stanowią połączenie sprzętu komercyjnego z aparaturą unikalną własnej konstrukcji. Wraz z rozszerzeniem zakresu standaryzacji pomiarów, przechodzi się na aparaturę komercyjną klasy wzorcowej i laboratoryjnej. Jeszcze przez dłuższy czas pozostanie tutaj margines badawczy, gdzie system tworzenia aparatury nie będzie nadążał za postępem potrzeb badawczych. Na rynku aparaturowym dostępny jest szeroki wybór sprzętu metrologicznego dla techniki światłowodowej. Jest to zarówno sprzęt laboratoryjny (najwyższej klasy, oferujący najwyższe dokładności pomiarowe, ale i najdroższy) jak i sprzęt przeznaczony do pomiarów bieżących, eksploatacyjnych, serwisowych, polowych, przenośny i stacjonarny, itp. Pojawiły się ostatnio także laboratoria wzorcowe oferujące kalibrację sprzętu pomiarowego dla techniki światłowodowej.

Na rynku aparaturowym dostępna jest cała gama sprzętu pomiarowego dla techniki światłowodowej różnych klas oraz sprzętu pomiarowego wykorzystującego światłowody.



Rys. 21.1. Analizator widma światła laserowego 200-1700nm z wejściem światłowodowym (Sensor Physics) Dane techniczne: długość fali: 200nm, 400nm, 600nm, 760-1000nm, 1450-1650nm, rozdzielczość pomiaru: od 0,3nm do 2,0nm, dokładność pomiaru $\pm 0,02$ nm, połączenie z PC poprzez port RS lub ISA, oprogramowanie LabView, czas całkowania 5ms – 60s, złącze światłowodowe FC



Rys. 21.2. Wielopasmowy generator do testowania systemów DWDM (firma ILXLigtwave)



Rys. 21.3. Automatyczny wieloosiowy system pomiarów, justacji, łączenia i spawania światłowodów między sobą i z elementami optoelektronicznymi stosowany przy produkcji światłowodowych systemów telekomunikacyjnych (firma VersaWeld).

Długoletnia współpraca pomiędzy technologicznym laboratorium przemysłowym i uczelnianymi laboratoriami fotonicznymi w kraju doprowadziło do powstania w Białymstoku na terenie OBPŚ i Politechniki Białostockiej Środowiskowego Laboratorium Metrologicznego Techniki Światłowodowej. Laboratorium zgromadziło znaczną ilość unikalnego sprzętu optoelektronicznego, dzięki uczestnictwu w ogólnokrajowych i międzynarodowych (w ramach Unii Europejskiej) programach badawczych, technicznych i dydaktycznych z zakresu fotoniki.

Podobne laboratoria pomiarowe fotoniki istnieją w innych ośrodkach akademickich np. na Uniwersytecie Marii Curie Skłodowskiej w Lublinie

Dzięki dostępowi do takiego sprzętu możliwe było przeszkolenie wielu osób zainteresowanych pracą badawczą i techniczną w laboratorium. Możliwe stało się również uruchomienie laboratoryjnych zajęć dydaktycznych z zakresu fotoniki światłowodowej.

Podstawowy zestaw laboratoryjny obejmuje: reflektometry światłowodowe, spektrofotometry, interferometry światłowodowe, mikroskopy specjalizowane, urządzenia do pomiaru aktywnych elementów optoelektronicznych a także podstawowych parametrów światłowodów.

Specjalnością Środowiskowego Fotonicznego Laboratorium Pomiarowego w Białymstoku są badania światłowodów kształtowanych. Takie pomiary wymagają bardzo specjalistycznej adaptacji sprzętu pomiarowego do światłowodów niestandardowych pod względem wymiarowym i sygnałowym.

Drugą specjalnością, także nieczęsto spotykaną w laboratoriach metrologicznych fotoniki, są kompleksowe pomiary wiązek światłowodowych, prostych, złożonych, oświetleniowych, do transmisji dużych poziomów mocy optycznych oraz koherentnych. Laboratorium mierzy także właściwości sztywnych światłowodowych elementów spiekanych.

Laboratorium oferuje komercyjne usługi pomiarowe w zakresie techniki światłowodowej.



Rys. 21.4. Przykładowe wyposażenie metrologicznego laboratorium techniki światłowodowej. Fotografie przedstawiają sprzęt środowiskowego laboratorium w Białymstoku (Huta Szkła Biaglass i Politechnika Białostocka.

22. KOMUTERYZACJA SYSTEMÓW I BAZ DANYCH POMIAROWYCH

W dzisiejszych czasach trudno sobie wyobrazić sytuację, żeby np. komercyjny system pomiarowy nie miał wielu funkcji automatycznych. Zakres takich funkcji nieustannie się powiększa obejmując szereg warstw funkcjonalnych: mechanicznych, optycznych, elektronicznych, transmisyjnych, prezentacyjnych, itp. Początkowo funkcje te obejmowały jedynie wybrane proste zadania wstępnej obróbki danych pomiarowych np. obliczenia statystyczne błędów pomiarowych na podstawie automatycznie zadanej serii pomiarowej, uśrednianie sygnału, redukcja szumów, zapis danych. Obecnie sprzęt pomiarowy wyposaża się standardowo w porty komunikacyjne (uznanych i nowych typów): RS-232, RS-488, Camac, GPIB/HPIB, VME, CAN, PCI, USB, IEEE-1294, IEEE-1394, SCSI i inne. Sądzi się obecnie, że niektóre z tych portów (np. COM - RS-xxx, Centronics/Bitronics, itp.) będą ewolucyjnie zastępowane nowymi standardami cyfrowymi jak np. USB. Już obecnie część nowoczesnego sprzętu pomiarowego oferowana jest z rozgałęźnikami (hubami) USB. Prowadzone są także prace nad światłowodowymi interfejsami do szybkiej komunikacji szeregowej USB oraz FireWire/I-Link Rozwijana jest także specyfikacja standardu PCI, który już w chwili obecnej niemal nieodwracalnie zastąpił wysłużony już standard ISA. Karty pomiarowe z wejściem światłowodowym oferowane są dla magistrali PCI. Częstotliwość magistrali, w nowych specyfikacjach ulega zwiększaniu od 33MHz przez 66MHz do 100MHz i dalej. Pozwala to na szybszą transmisję i akwizycję danych pomiarowych oraz zastosowanie sprawniejszych przetworników A/C i C/A niezbędnych w wielu przypadkach precyzyjnych pomiarów światłowodów.

Wydaje się, że sprzęt pomiarowy będzie coraz częściej bazował na standardowych rozwiązaniach analogicznych do techniki PC. Bardzo silną determinantą są tu opracowania takich standardów popularnych i jednocześnie akceptowanych przez przemysł jak dhtml, interaktywność systemów (fast cgi, perl, itp.), bazy danych, uniwersalne systemy prezentacji i wyszukiwania informacji, uniwersalne języki zapytań itp. Te techniki posiadają wspólny motor rozwoju w postaci internetu i jego systemu dominującego WWW. Wydaje się, że opracowywanie własnych systemów metrologicznych i prezentacyjnych, nawet przez duże firmy sprzętowe, ma obecnie jedynie ograniczony sens. Przede wszystkim wymaga od użytkownika opanowania i stosowania specyficznych procedur technicznych, podczas gdy systemy GUI (graficzny interfejs użytkownika systemu profesjonalnego - pomiarowego i innego np. bazodanowego) pod WWW stają się standardem ogólnoświatowym. Systemy te mają kolosalną przewagę polegającą na tym, że nie są zależne od platformy sprzętowej i systemowej. GUI pod WWW jest taki sam pod Linuxem, Solarisem czy Windowsami.

Na Politechnice Warszawskiej opracowano i rozwijane jest przykładowe rozwiązanie sprzętowo - programowego, bazodanowego systemu pomiarowego. System ten posiada modularną budowę i oprócz innych zastosowań, np. jako uniwersalna sieć telemetryczna, służy także jako sieciowy system pomiarowy i baza danych pomiarowych światłowodów i elementów optoelektronicznych. Na bazie takiego systemu, pracującego pod protokołem TCP/IP, a więc całkowicie w sieci Internet, możliwe jest stosunkowo proste i z niewielkimi nakładami kosztów zbudowanie ogólnopolskiej sieci pomiarowej i bazy danych fotonicznych. Początek takiej bazy i struktury fotonicznego systemu pomiarowego zaczęto tworzyć serwerze na http://nms.ise.pw.edu.pl.

Charakterystyka funkcjonalna współczesnych systemów pomiarowych i sieci telemetrycznych

Burzliwy rozwój różnorodnych metod przekazu informacji w połączeniu z postępem technologicznym dokonują fundamentalnych i nieodwracalnych zmian w metrologii. Zmiany te mają dwojaki charakter [54]:

- obserwuje się ewolucję metod pomiarowych i sposobu realizacji procesów pomiarowych,
- dokonują się bardzo znaczące zmiany w sferze aparaturowej

Widocznym efektem tych zmian, obserwowanym na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat, jest odejście od niezależnych urządzeń pomiarowych do zintegrowanych i skomputeryzowanych systemów pomiarowych. Kolejny przełom dokonuje się obecnie. Jest on związany przede wszystkim z próbami wykorzystywania w procesach pomiarowych globalnych metod przekazu informacji za pomocą sieci komputerowe i innych usług telekomunikacyjnych opartych na łączach światłowodowe. Te prace mają swoje silne uzasadnienie. Wynika ono z coraz częstszych potrzeb realizacji pomiarów o rozproszonym, wieloparametrowym i wielowątkowym charakterze. Przykładem, niezwykle ważnym z naukowego oraz społecznego punktu widzenia, są pomiary środowiskowe.

Biorąc pod uwagę współczesne wymagania stawiane metrologii, nowoczesne komputerowe sieciowe systemy pomiarowe powinny umożliwiać:

- 1) pomiary rozproszone i wieloparametrowe, czyli realizowane na rozłożonych obszarach przy pomocy złożonego i bardzo różnego sprzętu pomiarowego i współpracujących z tym sprzętem elektronicznych torów przesyłania, akwizycji i przetwarzania sygnałów. Przykładem może być objęcie jednolitym sieciowym pomiarowym systemem komputerowym dużego laboratorium badawczego lub wręcz grupy laboratoriów z tej samej dziedziny (tutaj fotoniki) na terenie jednej uczelni, resortu, czy na obszarze całego kraju. Celem tego jest natychmiastowy dostęp do wyników prac badawczych oraz budowa wspólnej bazy danych naukowych.
- 2) pomiary wielowątkowe polegające na jednoczesnej realizacji wielu niezależnych torów pomiarowych o cechach opisanych w punkcie (1), w obrębie tego samego systemu pomiarowego,
- *3) wielodostępność operatorską*, która pozwala na jednoczesny dostęp dużej liczby użytkowników do komputerowego sieciowego systemu pomiarowego. Każdy z użytkowników powinien mieć możliwość interaktywnego kreowania pomiarów wielowątkowych ujętych w punkcie (2).

Tak postawione wymagania powodują, że bazodanowy system pomiarowy, pod względem strukturalnym i oprogramowania można rozpatrywać wręcz jako "*pomiarowy system operacyjny*" na podobieństwo *komputerowych systemów operacyjnych* o charakterze wielozadaniowym i wielodostępnym:

- *procesy* (programy) można utożsamiać z rozproszonymi i wieloparametrowymi procesami pomiarowymi (por. punkt 1),
- wielozadaniowość można przyrównać do pomiarów wielowątkowych (por. punkt 2),
- wielodostępność jest równoważna wielodostępności operatorskiej w systemie (por. punkt. 3).

Takie rozumowanie prowadzi wprost do bardzo ciekawego stwierdzenia, że system pomiarowy stanowi *sprzętową platformę operacyjną* na której wielu operatorów może uruchamiać niezależnie wielowątkowe, rozproszone i wieloparametrowe pomiary (zwane dalej *procesami pomiarowymi*). Procesy pomiarowe realizowane w ramach systemu:

- 1. *mają charakter stochastyczny*, czyli moment ich powstania i czas istnienia nie jest określany przez system pomiarowy, ale przez niezależnych operatorów,
- 2. *są oparte na wirtualnych magistralach potokowych*, co oznacza, że operator kreuje strukturę procesu pomiarowego łącząc za ich pomocą dostępne w systemie bloki funkcjonalne (sondy pomiarowe, czujniki, urządzenia pomiarowe, bloki przetwarzania elektronicznego i komputerowego itp.). Wirtualność magistrali wynika z faktu, że zrealizowane w ramach procesu połączenia w rzeczywistości zapewniane są przez system telemetryczny i ich forma oraz czas istnienia nie jest zdefiniowana jednoznacznie.

Czołowi producenci sprzętu i oprogramowania pomiarowego już obecnie przewidują ten kierunek rozwoju systemów pomiarowych i w prototypowych rozwiązaniach wyposażają sprzęt w

odpowiednie interfejsy a oprogramowanie w cechy wielowątkowości i interakcyjności przy silnym kierunku standaryzacji interfejsu użytkownika. Takimi systemami stają się ewolucyjnie np. Lab Windows i Lab Works.

Warstwy funkcjonalne komputerowego, bazodanowego systemu pomiarowego

W systemach pomiarowych musi zachodzić wzajemne dostosowanie funkcjonalne sfer: *pomiarowej, transmisyjnej, akwizycyjnej i przetworzeniowej i wizualizacyjnej*. Sfera transmisji danych pomiarowych rozwija się bardzo dynamicznie i stwarza coraz większe możliwości. Jej rozwój stymulowany jest przez wiele dziedzin nauki i techniki. W tej sytuacji, należy wykorzystać oferowane usługi transmisyjne i dostosować platformę funkcjonalna bazodanowych otwartych systemów pomiarowych do korzystania z tych usług. Chodzi tutaj oczywiście głównie o sieć Internet. Natomiast istnieje potrzeba dostosowania strukturalnego sfery pomiarowej do wymagań standardów systemów transmisyjnych. Takim uznanym standardem jest protokół tcp/ip czy Ethernet. Obserwowane w ostatnich latach próby połączenia standardowej aparatury pomiarowej z systemami teletransmisyjnymi (np. sieciami komputerowymi, modemami telefonicznymi) stanowią raczej przejściową formę hybrydową realizowaną dla celów komercyjnych lub na rzecz konkretnych potrzeb.

W literaturze przedmiotu [54] można znaleźć coraz więcej przykładów realizacji automatycznych, wielofunkcyjnych systemów pomiarowych opartych o otwarty system komunikacyjny i ekspercką bazę danych pomiarowych i naukowych. Oczywiście systemy te bazują na wysoce specjalistycznym sprzęcie pomiarowym, o coraz częściej standaryzowanych systemach I/O. Na ogół, zrealizowanie nowego modelu komputerowego systemu pomiarowego stanowi na obecnym etapie rozwoju wkład przyczyniający się do szybszego rozwoju tego typu systemów oraz wyznaczy kierunki ich rozwoju. Takie modele posiadają na ogół następujące cechy:

- w jak największym stopniu starają się standaryzować stosowane wspólne elementy systemu pomiarowego,
- otwartość struktury systemu, czyli umożliwia jej rozbudowy o nowe elementy,
- usprawnienie i zalgorytmizowanie metod projektowania, co prowadzi do radykalnego zmniejszenia czasu oraz kosztów projektu, realizacji i uruchamiania zarówno elementów systemu pomiarowego jak i systemu jako całości
- zwiększenie niezawodności poszczególnych elementów systemu pomiarowego,
- automatyczne wbudowywanie warstwy kontrolno-diagnostycznej w elementy systemu

System pomiarowy jako *platforma operacyjna* powinien charakteryzować się wysoką niezawodnością i zdolnością wykrywania błędów dla każdego jej elementu składowego. Trzeba bowiem mieć na uwadze, że:

- *nie można przewidzieć wszelkich potencjalnych problemów* jakie mogą wystąpić, gdyż struktura bardzo złożonych systemów ciągle ewoluuje (np. jest rozbudowywana o nowe elementy),
- *nie można szczegółowo przetestować systemu* z uwagi na jego rozmiary i dynamicznie zmieniające się procesy pomiarowe

Nie można zmienić obiektywnych uwarunkowań związanych zarówno z charakterem komputerowych sieciowych systemów pomiarowych jak i z ich potencjalną podatnością na awarie, należy poszukiwać rozwiązań modelowych o takim ogólnym charakterze aby:

- komputerowy system pomiarowy był przygotowany na wystąpienie nieznanych problemów: umiał je wykryć, zdiagnozować bądź umożliwić ich dalszą analizę,
- blok kontrolno-diagnostyczny stanowił nierozłączną część każdego elementu złożonego systemu pomiarowego i jego zadaniem było jak najszybsze stwierdzenie i umożliwienie rozwiązania problemu,
- pozwalały w sposób strukturalny (blokowy) realizować różnorodne funkcjonalne elementy komputerowego systemu pomiarowego w taki sposób, aby można było włączać do niej standardowe bloki kontrolno-diagnostyczne,

zapewnić nadrzędną warstwę kontrolną systemu pomiarowego przy pomocy automatycznej kontroli komputerowej

Otwarta organizacja platformy sprzętowej komputerowego, bazodanowego systemu pomiarowego

Projekt organizacji platformy sprzętowej sieciowego systemu pomiarowego może być bardzo szczegółowy do zastosowania jedynie w konkretnych warunkach ale generalnie powinien być na tyle ogólny, aby mogły być realizowane różne procesy pomiarowe (tutaj fotoniczne) i możliwa była współpraca różnorodnego sprzętu pomiarowego, np. źródeł, detektorów ale także m.in. czujników optoelektronicznych. Optymalizacja polega w tym wypadku na wyborze struktury systemu otwartego, łatwego do modernizacji i akceptującego rozwój warstwy transmisji, akwizycji, przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych. Przykładową ogólną strukturę sieciowego bazodanowego systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 22.1. Przykład podany na rysunku przedstawia zespół złożony z trzech równorzędnych stacji obsługujących lokalne zadaniowe węzły pomiarowe. Takie podejście zapewnia, między innymi, realizację wcześniej postulowanej metrologii wielooperatorowej (ang. Multi-operator telemetry).



Rys. 22.1. Organizacja platformy sprzętowej sieci telemetrycznej

Platforma sprzętowa szkieletu systemu pomiarowego jest podzielona:

- węzły centralne, które mogą stanowić komputery lub specjalizowane jednostki wyposażone w mikroprocesory. Struktura sieciowa jest oparta na standardowej strukturze sieci komputerowych. Łączność z siecią może mieć charakter bezpośredni (np. karty sieciowe) i pośredni przez modemy (łączność telefoniczna). Wydaje się obecnie, że ta część systemu pomiarowego nie wymaga specjalizowanych prac rozwojowych, a jedynie opracowania optymalnych rozwiązań aplikacyjnych dla istniejących norm transmisyjnych. Wybór w zasadzie jest zdeterminowany dominantami systemowymi, sprzętowymi i programistycznymi. m.in. oferowanych profesjonalnych pakietów programistycznych. Jako podstawowy protokół wybierany jest coraz częściej TCP/IP,
- źródła, które mogą stanowić niezależne czujniki pomiarowe, standardowa, komercyjna aparatura pomiarowa oraz zgrupowana w ramach *sieci lokalnych* aparatura wyposażona w standardowe interfejsy, no. RS-232, GPIB, CAN. W takim wypadku *sieć lokalna* jest rozpatrywana jak oddzielne, złożone i wielofunkcyjne źródło sygnałów pomiarowych. Tutaj kryterium nie jest tak widoczne i nie istnieje tak wyraźna dominacja sprzętowa. Kryternium może stanowić np. użyteczność dla użytkownika w określonych warunkach lub też wybór spośród najpopularniejszych standardowych interfejsów komunikacyjnych. W przypadku realizacji naszego modelu [54] komputerowego systemu pomiarowego dla laboratorium fotoniki jako uniwersalny standard dla obsługi sprzętu pomiarowego w *sieci lokalnej* został wybrany standard CAN. Przyjęto, że pozostałe, brane pod uwagę standardy: (np. RS-232, GPIB), będą podlegać konwersji do standardu CAN. Zrealizowanie powyższego postulatu narzuciło konieczność opracowania algorytmu konwersji i stworzenia specjalizowanego protokołu transmisji dla konwertowanych standardów, oraz realizację dedykowanej jednostki mikroprocesorowej, tzw. konwertera standardów pracującego w czasie rzeczywistym.

Otwarta organizacja platformy programowej komputerowego, bazodanowego systemu pomiarowego

Przykład niniejszy posiada charakter ogólny ale został opracowany do wspomagania pracy laboratorium pomiarowego na terenie Instytutu Systemów Elektronicznych PW. W ramach projektu została opracowana w postaci oprogramowania otwartego na bazie języka C++ i platformy programistycznej *Lab-Windows CVI*, platforma programowa zarządzająca pracą *węzła centralnego*. W ogólnym ujęciu można następująco pogrupować nakładane na oprogramowanie wymagania:

- możliwość współpracy z wieloma typami interfejsów komunikacyjnych w czasie rzeczywistym,
- uwzględnienie sieciowego charakteru *węzła centralnego*, wykorzystanie zasobów sieciowych, zapewnienie łączności między węzłami,
- zapewnienie elastycznego charakteru oprogramowania, które pozwoli użytkownikowi realizować indywidualne procesy pomiarowe, dołączać nowe interfejsy, moduły sterujące, biblioteki wspomagające (np. przetwarzające dane pomiarowe),
- udostępnienie rozbudowanych narzędzi wizualizacji danych, za pomocą których użytkownik sam dokonuje ostatecznej realizacji formy prezentacji,
- realizowanie akwizycji danych,
- realizacji oprogramowania które pozwala użytkownikowi na interaktywne uczestnictwo w sieci telemetrycznej.

Organizacja platformy pomiarowej komputerowego, bazodanowego systemu pomiarowego

Platforma pomiarowa została opracowana w postaci otwartej struktury, na bazie języka C++ i platformy programistycznej *Lab-Windows CVI*. Platforma pomiarowa jest klientem platformy programowej zarządzającej pracą *węzła centralnego*. W ten sposób dokonuje się zadaniowego

ukierunkowania węzła centralnego – staje się on węzłem metrologicznym pracującym w czasie rzeczywistym.

Zadania nałożone na platformę pomiarową można podzielić na trzy wzajemnie powiązane warstwy:

- warstwa procesów pomiarowych, realizująca zadania w czasie rzeczywistym poprzez specjalizowane interfejsy programowe. Warstwa współpracuje zarówno bezpośrednio z aparaturą pomiarową, z niezależnymi czujnikami przyłączonymi do kart pomiarowych, jak i obsługuje standardowe interfejsy oraz *sieci lokalne*,
- warstwa przetwarzania, której zadaniem jest zarówno nadążna analiza strumieni danych pomiarowych (tzw. praca on-line) jak i analiza danych po procesie akwizycji (tzw. praca off-line),
- warstwa wizualizacji o charakterze interaktywnym, za pomocą której użytkownik dokonuje prezentacji wyników procesu pomiarowego.

Konstrukcja platformy pomiarowej wykorzystuje możliwości oferowane przez szkielet systemu, w tym sieć transmisji danych i pozwala realizować wielowątkowe, o rozproszonym charakterze procesy pomiarowe dostępne jednocześnie dla wielu niezależnych użytkowników.



Rys 22.2. Procesy pomiarowe w układzie serwer-klient

Na rys. 22.2 został przedstawiony prosty przykład realizacji procesu pomiarowego w układzie serwer-klient na bazie globalnej sieci Internet:

- serwer stanowi *węzeł centralny* pełniący rolę *węzła metrologicznego* bazującego na aplikacji serwera WWW wykreowanego w środowisku Lab-Windows CVI,
- klient jest *węzłem centralnym* ukierunkowanym na obsługę użytkownika i pełni rolę *węzła operatorskiego*.



Rys 22.3. Struktura organizacyjna bazodanowego sieciowego systemu pomiarowego.



Rys. 22.4. Struktura organizacji szkieletu komunikacyjnego dla dyskutowanego przykładu systemu pomiarowego. (Laboratorium Pomiarowe w ISE PW). Konwerter Standardów: CAN, R-232, RS-422, RS-423, RS-423, RS-485, GPIB (RAAN CGR-01)



Rys. 22.5. Przykład realizacji bloków powiadamiania operatorskiego, lub powiadamiania pomiędzy procesami pomiarowymi w komputerowym systemie pomiarowym. Powiadamianie bazuje na protokole TCP/IP.



Rys.22.6. Przykład rozwiązania graficznego interfejsu operatora (GIO) bazodanowego komputerowego systemu pomiarowego. Układ typu klient-serwer.



Rys.22.7. Przykład rozwiązania graficznego interfejsu operatora bazodanowego komputerowego systemu pomiarowego. Układ typu klient-serwer. GIO systemów z obu rysunków 22.6. i 22.7. powiązane protokołem TCP/IP.

Ze względu na znaczna różnorodność źródeł i standardów sygnału pomiarowego przykładowego rozwiązania komputerowego systemu pomiarowego zaproponowano dla zastosowanie w węzłach sygnałowych sieci układu konwertera standardów [54]. RAAN CGR-01 urzadzeniem umożliwiającym zamiane standardów szeregowych, jest równoległych, synchronicznych lub asynchronicznych na dowolną kombinację w/g protokołów CAN, GPIB, R-232, RS-422, RS-423, RS-485. Urządzenia RAAN mogą pracować w systemie sieciowym (do 31 adresów) opartym na protokole komunikacyjnym CAN. Każde wejście / wyjście jest galwanicznie izolowane od pozostałych elementów systemu (do 1000V dla transoptorów lub kilkanaście kilowoltów dla światłowodów). Szybkość transmisji w sieci jest zależna od odległości (do kilku kilometrów) i wynosi 5-500 kB/s. RAAN CGR-01 jest urządzeniem wolnostojącym, umieszczonym w metalowym pudełku o wymiarach: szer. 120 mm, wys. 45 mm, gł.150 mm. Na płytach czołowej i tylnej sa dostępne gniazda odpowiednich standardów, gniazdo zasilania i diody określające stan pracy. Wewnatrz umieszczony jest przełącznik adresu i funkcji urządzenia. Zespołami stałymi elektroniki RAAN są: mikrokomputer z procesorem 80C52, mikroprocesor protokołu transmisji CAN 82C200 i elementy standardu GPIB (IEC-625) oraz mikroprzełącznik ustawienia adresu i wyboru funkcji. Na płycie znajdują się kontakty umożliwiające dołączenie dwóch wymiennych "nakładek". Pełnią one rolę konwerterów standardów R-232, RS-422, RS-423, RS-485 (wykaz tabela 1.) Urządzenie jest zasilane z zewnętrznego zasilacza +9 V.



Rys. 22.8. a. Obudowa RAAN CGR-01; b. Rozmieszczenie nakładek i mikroprzełącznika

GNIAZDO GPIB JAKLADKA

RS

GNIAZDC RS - 232 Na płycie czołowej znajdują się gniazda standardów (rys.22.8.): GPIB (IEC-625) CANNON 25 (żeński), RS-xxx - CANNON 9 (żeńskie), RS-xxx -CANNON 9 (męskie).

Na płycie czołowej znajdują się diody: wskaźnik transmisji GPIB (sygnał DAV) -żółta, wskaźnik transmisji CAN (sygnał IDDL) - zielona, wskaźnik transmisji RS-xxx (sygnał TxD lub RxD) - czerwona. RS-xxx oznacza standardy: R-232 lub RS-22 lub RS-423 lub RS-485.

Na płycie tylnej znajdują się gniazda:CAN - CANNON 9 (żeńskie), PIN - zasilanie Przełącznik adresu (od 0 do 31) RAAN CGR-01 i funkcji składa się z 8-miu mikroprzełączników. Adres ustawiany jest przełącznikami oznaczonymi numerami od 0 do 4. "0" jest najmniejszą "wagą" kodu bitowego. Mikroprzełączniki 6-8 określają funkcje (od 0 do 7) (tabela 1.).

mikroprzełącznik	Funkcja
8 / 6	
0 0 0	konwersja GPIB - CAN - GPIB
0 0 1	konwersja GPIB - RS-xxx - GPIB
0 1 0	konwersja RS 232 - CAN (protokół KP)
0 1 1	konwersja RS 232 - CAN (protokół RK)
1 0 0	monitorowanie GPIB przez CAN
1 0 1	monitorowanie GPIB przez RS-232
1 1 0	monitorowanie CAN przez RS-232
1 1 1	

Przy wyłączonym napięciu należy podłączyć odpowiednimi kablami lub światłowodami RAAN CGR-01 z komputerem lub innymi urządzeniami i ustawić na odpowiednie pozycje przełącznik adresów i funkcji. Urządzenie w wersji podstawowej zamienia standardy GPIB na CAN i CAN na GPIB. Konwersja R-232, RS-422, RS-423, RS-485 wymaga instalacji odpowiedniej "nakładki" opto-konwertera RS-xxx / RS-xxx.

Sieć CAN (Controller Area Network)

Protokół transmisji danych CAN jest wykorzystywany do budowy sieci w systemach pomiarowych. Dzięki urządzeniom RANN możliwe jest zbudowanie sieci z interfejsami różnych standardów transmisji danych. Przykładowe rozwiązanie jest przedstawione na rys. 22.4. Każdy RAAN CGR-01 ma ustawiony swój indywidualny adres i wyposażony jest w odpowiednie "nakładki" umożliwiające właściwą konwersję standardów. Dzięki urządzeniom RAAN można zwiększyć ilość obsługi urządzeń RS-232 i GPIB z jednego lub wielu sterowników (komputerów) oraz zastosować łącza przewodowe lub światłowodowe.

CAN - Controller Area Network - jest protokołem komunikacyjnym szeregowej transmisji danych typu multimaster, który został stworzony w firmie BOSCH do połączeń modułów sterujących, czujników i elementów wykonawczych w samochodach. Został po raz pierwszy zastosowany w 1990 roku w samochodach Mercedes klasy S. Są dwa główne argumenty przemawiające za zastosowaniem CAN w innych zastosowaniach; z jednej strony podobne wymagania pomiarowe, odnośnie jakości i warunków technicznych; z drugiej strony wyroby masowo produkowane dla przemysłu samochodowego są sprawdzone i z racji masowej produkcji tanie. Sukces CAN - jako magistrali systemowej w układach sterowania i kontroli spowodował zainteresowanie nim pozostałych gałęzi przemysłu. Przesądziło o tym kilka czynników: międzynarodowy standard ISO, wysoka niezawodność w warunkach dużych zakłóceń, możliwość pracy w systemach czasu rzeczywistego, wysoki stopień bezpieczeństwa danych, system otwarty / łatwość rozbudowy, niski koszt, baza elementów. CAN jest magistralą systemową umożliwiającą wzajemną komunikację pomiędzy modułami elektronicznymi. CAN jest szyną typu multimaster, tzn. że każdy moduł może mieć dostęp do szyny i jeżeli wysyła dane o odpowiednio wysokim priorytecie, zajmuje szynę na czas transmisji jednego telegramu. Medium transmisyjnym może być para przewodów, pojedynczy przewód lub światłowód. Modułami mogą być układy wejścia/wyjścia, układy mikroprocesorowe i komputery (np PC, VME). Dzięki temu można zbudować systemy realizujące funkcje inteligencji rozproszonej. Do

najważniejszych elementów informacji typu CAN należy nazwa oraz liczba kontrolna. Nazwa pełni funkcję identyfikatora, za pomocą którego układ CAN rozpoznaje typ lub adresata wiadomości i jej priorytet. Liczba kontrolna mówi ile bajtów danych (max. 8) zawiera telegram.

Ilość modułów	nieograniczona (teoretycznie), zależna od parametrów elektrycznych, nadajników/odbiorników
Rodzaj przesyłanych danych	obiektowo-zorientowane, Multi-Master
Ilość możliwych telegramów	2032 (Standard)
Rodzaj dostępu do szyny	Dostęp do szyny według priorytetów, telegramów, arbitraż bitowy, bezstratny (CSMA/CA)
PrzepustowoϾ szyny	max. 1 Mbit/s brutto, max. 576 kbit/s netto
Praca w czasie rzeczywistym	zdefiniowany czas odpowiedzi, telegramu o najwyższym priorytecie (<134 us, bez błędu)
Bezpieczeństwo	Środki programowe: - Środki do wykrywania, obsługi i ograniczania błędów, - CRC Hamming-odstęp 6 Prawdopodobieństwo błędu 10 e-13, Środki sprzętowe: Możliwość przełączania pracy z dwuprzewodowej na jednoprzewodową przy zerwaniu lub zwarciu jednego z przewodówMożliwość dublowania szyny
Topologia	Linia, Gwiazda
Medium transmisyjne	Przewód miedziany, Światłowód
Długość szyny	Zależna od szybkości przesyłania np. 40 m przy 1 Mbit/s 620 m przy 100 kbit/s, 10 km przy 5 kbit/s

Krótka charakterystyka CAN

Ilość modułów w systemie CAN jest teoretycznie nieograniczona; wynika to z tego, że w CAN nie ma adresacji modułów. Każda informacja która jest wysyłana może być odebrana przez wszystkie moduły (broadcast). Decyzja, czy informacja będzie przydatna dla konkretnego modułu, zależy od ustawionego filtru akceptującego dane, ustawianego programowo. Kryterium do podjęcia tej decyzji jest tzw. identyfikator, z którym każda informacja jest nadawana. Identyfikator ma długość 11 bitów (format standardowy), to umożliwia rozróżniene 2032 różnych typów danych. Istnieje też opcja (w USA) gdzie identyfikator ma 29 bitów. Wyżej opisana metoda nazywa się obiektowo-zorientowaną przesyłania danych i gwarantuje wysoką elastyczność, tzn. rozbudowa istniejącej sieci CAN o 1 lub więcej modułów nie powoduje dużej zmiany w okablowaniu i oprogramowaniu. Jedynym ograniczeniem liczby modułów jest ograniczenie spowodowane przez parametry elektryczne szyny. Format telegramu jest następujący: ABCDEFGHI, gdzie: A - start ramki (1 bit), B - identyfikator (11 bitów), C - bit RTR (1 bit), D - pole sterujące (6 bitów), E - pole danych (0 - 8 bajtów), F - pole CRC + CRC delimiter(16 bitów), G - pole ACK + ACK delimiter (2 bity), H - koniec ramki (7 bitów), I - przerwa między ramkami (min. 3 bity).

Aby obliczyć minimalny czas trwania transmisji, trzeba rozpatrzyć format jednej ramki telegramu CAN. W jednej ramce można posłać od 0 do 8 bajtów danych. Dokładna ilość podawana jest w polu sterującym. Pole identyfikatora zawiera informację o rodzaju danych i o jej priorytecie przy dostępie do szyny. Pole CRC ma 15 bitów długości i służy do badania poprawności transmisji. Pole

acknowledge mówi wszystkim uczestnikom sieci, że dane zostały przyjęte poprawnie. Maksymalna szybkość transmisji zdefiniowana dla CAN tzn. 1Mb/s pozwala na przesłanie 8 bajtów w czasie 111 us. Jeśli takie dane będą ciągle nadawane, to maksymalna użyteczna szybkość przesyłania danych wyniesie 576 Kb/s. System ma zdolności do pracy w czasie rzeczywistym, jeśli czas odpowiedzi w systemie jest zdefiniowany i jest krótki. CAN to system typu multimaster, tzn. każdy moduł może mieć dostęp do szyny, jeśli tylko szyna jest wolna. W przypadku jeśli dwa moduły jednocześnie próbują zająć szynę, następuje konflikt, który jest rozwiązywany za pomocą arbitrażu bitowego (CSMA/CA, collision avoidance).

W wyniku arbitrażu szynę zajmuje moduł, który nadaje dane o wyższym priorytecie (IDENTYFIKATOR). Ta procedura jest taka sama jak w przypadku szyny typu IIC. W najgorszym przypadku moduł, jeśli wysyła dane o odpowiednio wysokim priorytecie zajmuje szynę po zakończeniu bieżącej ramki. Maksymalny czas odpowiedzi wynosi 110 us (przy szybkości transmisji 1Mb/s). Tak więc CAN ma zdefiniowany czas odpowiedzi i jest użyteczny do pracy w sytemach czasu rzeczywistego.

Jako elementy systemu CAN należy rozróżnić całe systemy i pojedyńcze elementy (układy scalone). Systemy to różne moduły zarówno hardwarowe jak i softwarowe np. Philips produkuje następujące układy: 82C200 - układowa implementacja protokołu CAN; 8xC592 oraz 8xCE598 - mikrokontroler (8051), 16kB ROM, 512 B RAM, A/D, zegar, PWM; CAN (82C200); 82C150 - CAN I/O, 16 I/O; 82C250 - CAN-transceiver.

Stosując wymienione powyżej elementy składowe, sprzętowe i programowe oraz omówione w zarysie metody projektowania zrealizowano laboratoryjny model komputerowego sieciowego systemu pomiarowego, przeznaczonego do współpracy z laboratorium pomiarowym światłowodów. Przeprowadzono szereg eksperymentów akwizycji, transmisji, obróbki i wizualizacji sygnałów pomiarowych ze współpracującym fotonicznym systemem pomiarowym. Istnieją obecnie dwa rozwiązania zewnętrznego dostępu do systemu pomiarowego i bazy danych pomiarowych. Po pierwsze sposób ze specjalizowanym układem klient - serwer. W kilku miejscach uczelni (WEiTI, WCH, WIŚ) uruchomiono serwery i klientów systemu CVI i podłączono do nich eksperymentalnie przyrządy pomiarowe. Po drugie system pomiarowy (niektóre jego funkcje) są dostępne z poziomu przeglądarki WWW. Komunikacja wewnątrz laboratorium, np. pomiędzy aktywnie działającym przyrządem pomiarowym, a bazą danych, blokiem akwizycji danych pomiarowych i blokiem przetwarzania może odbywać się także z poziomu przeglądarki www. Ogromną zaletą takiego podejścia jest wprowadzenie od początku uznanego standardu przesyłania danych i ich prezentacji. W czasie licznych eksperymentów eksploatacyjnych systemu pokazano, że komunikacyjne i bazodanowe oraz przetworzeniwo – prezenatcyjne rozszerzenie sieciowego systemu pomiarowego jest gotowe do stosunkowo prostego rozszerzenia poprzez sieć Internet a także przy pomocy modemu poprzez sieć telefoniczna.

W ramach niniejszego projektu systemu pomiarowego została opracowana struktura organizacyjna uniwersalnej sieci telemetrycznej dla WEiTI PW. przedstawiona na rys. 22.3. Zasadniczymi kryteriami opracowania były:

- zaproponowanie rozwiązania łatwego i taniego w realizacji,
- wykorzystującego istniejącą infrastrukturę sieciową WEiTI,
- otwartą, czyli umożliwiającą swobodne włączanie zarówno węzłów metrologicznych jaki i opreratorskich,
- wykorzystującą dostępne narzędzia programistyczne i oprogramowanie w formie zamkniętych aplikacji.

W efekcie zbudowano światłowodową sieć pomiarową bazującą na:

• serwerach metrologicznych bazujących na aplikacjach współpracujących ze standardowymi serwerami WWW. Tego typu serwery można realizować albo na bazie standaryzowanego oprogramowania, albo dedykowanych aplikacji. Uniwersalny charakter sieci WWW, bogata

paleta oferowanych usług sieciowych i pomocniczych narzędzi programistycznych stanowi ogromny, a zarazem darmowy potencjał wspomagający realizację takich serwerów. Także producenci najważniejszych profesjonalnych platform programistycznych obecnie dostarczają serwery WWW jako standardowe wyposażenie oprogramowania,

• *serwerach operatorskich* wykorzystujących standardowe przeglądarki WWW. W tym wypadku nie ponosi się żadnych dodatkowych kosztów, a włącznie się użytkownika do sieci telemetrycznej nie wymaga żadnych dodatkowych przedsięwzięć.

W ten sposób z jednej strony uzyskuje się dostęp do sieci telemetrycznych pracujących w innych ośrodkach (co pozwala na łatwe nawiązanie bezpośredniej współpracy), a z drugiej strony sieć telemetryczna WEiTI staje się "widoczna" na całym świecie.

Przedstawiono tutaj w skrócie elementy składowe systemu pomiarowego. Szerszy opis oraz działającą sieć można znaleźć w domenie ise.pw.edu.pl pod adresami DNS pergx (x=1,2,3,4,5) oraz nms. Rys. 22.9. przedstawia schemat blokowy komputerowego systemu pomiarowego adaptowanego dla pomiarów światłowodów kształtowanych. System składa się z dwóch części: komputerowe środowisko zarządzania i programowania, fotoniczny system pomiarowy. Obie części są ze sobą ściśle zintegrowane. Widok interfejsu systemu pomiarowego w przeglądarce internetowej przedstawiono na rys. 22.10.

Jedną z najważniejszych części fotonicznego systemu pomiarowego, obok sprzęgacza stożkowego, jest precyzyjny sprzęgacz typu rowek V (V-groove). Sprzęgacz jest niezbędny w celu połączenia mechanicznego wielowłóknowego lub wielordzeniowego stożka z analizowanym optycznym włóknem wielordzeniowym. Sprzęgacz V umożliwia nachylenie jednej z części sprzęganych włókna w celu dopasowania do stożka. Dwupłaszczyznowy wgląd w obszar sprzęgania jest możliwy poprzez system mikroskopowy. Podgląd umożliwia na bieżąco ocenę procesu sprzęgania.

Oprogramowanie systemu analizy światłowodów składa się z czterech warstw, co zostało zaprezentowane na rysunku. Kod programu został napisany w LabWindows. Oprócz używania lokalnych, wbudowanych, narzędzi, inne popularne narzędzia analizy matematycznej są dostępne z wewnątrz systemu jak MathCad StatGraph itp. Warstwa prezentacyjna i biblioteczna jest osiągana poprzez przyjazny interfejs graficzny użytkownika. Interfejs posiada zestaw narzędzi komunikacyjnych i managerskich w celu udostępniania części systemu przez sieć WWW. Rysunek prezentuje wygląd panelu systemowego widoczny w przeglądarce. W podstawowej konfiguracji, panel składa się z trzech okien. Parametry tych okien są ustawiane przez uprawnionego użytkownika poprzez przeglądarkę. Lewe okno jest odpowiedzialne za komunikację i interakcję z fotonicznym systemem pomiarowym w warstwie sprzętowej. Okno środkowe jest wirtualną biblioteką narzędzi do obróbki sygnałów własnych i standaryzowanego dostępu do narzędzi zewnętrznych. Prawe okno jest biblioteką narzędzi prezentacyjnych. Przetworzone wyniki pomiarów i analiz są prezentowane w tym oknie na wiele różnych sposobów.


Computer based Optical Fiber Measurement and Analysis System

Rys. 22. 9. Schemat blokowy komputerowego systemu pomiarowego światłowodów, współpracującego z internetowym systemem akwizycji danych pomiarowych, transmisji, przetwarzania i wizualizacji.



Rys. 22.10. Graficzny interfejs użytkownika (GUI) do sieciowego środowiska programistycznego ukierunkowanego na analizę światłowodów klasycznych i kształtowanych. Interfejs został zbudowany w systemie LabWindows i stosuje takie narzędzia jak MathCad, Statgraph i inne. Takie narzędzia są używane wewnątrz systemu analizy włókna. System jest dostępny w sieci Internet poprzez przeglądarkę.

Miernictwo światłowodowe



Rys. 22.11. Centrum operatorskie komputerowego systemu pomiarowego. Wybrane elementy sprzętowe fotonicznego sieciowego systemu pomiarowego. Światłowodowe transceivery komunikacyjne FastEthernet, Konwertery standardów pomiarowych ze światłowodowym portem CAN, Ethernetowa karta komunikacyjno – pomiarowa firmy Telebyte.

23. PRZYKŁADY OBLICZEŃ, ĆWICZENIA, PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Jak przesuwa się powierzchnia płaskiej fali optycznej?

W najprostszym przypadku, propagację takiej fali opisuje funkcja sinusoidalna. Przesunięcie *a* fali płaskiej w kierunku *z* wyraża się wzorem:

$$a = A\sin(\omega t - kz) = A\sin 2\pi (\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda}),$$

gdzie: a – przesunięcie fali płaskiej (tzn. pola elektrycznego lub magnetycznego lub ich kwadratów tj. natężenia fali), A – amplituda w jednostkach przesunięcia, $\omega=2\pi f$ - częstotliwość kątowa w s⁻¹, f – częstotliwość fali w Hz, t – czas, T=1/f = $2\pi/\omega$ – okres drgań w s, k= $2\pi/\lambda$ – liczba falowa w m⁻¹, z – długość (odległość) w kierunku z w m, λ - długość fali w m, v=f λ - prędkość propagacji fali. Amplituda opisuje największe przesunięcie od punktu równowagi. Wyrażenie w nawiasach ϕ =(ω t-kz) jest nazywane kątem fazowym lub w skrócie fazą fali.

Jak szybko rozprzestrzenia się fala płaska w światłowodzie?

Światło o długości fali λ =1µm posiada w powietrzu prędkość c=300000km/s. Częstotliwość fali wynosi f=c/ λ =300THz. W światłowodzie prędkość wynosi v=c/n, co np. dla n=1,5 wynosi v=200000km/s=f λ . Jeśli uznamy, że częstotliwość fali nie uległa zmianie to długość tej fali propagowanej tym razem w światłowodzie będzie λ_f =0,(6)µm. W czasie jednej mikrosekundy w światłowodzie światło pokona v=200m/µs. Fala świetlna potrzebuje 5µs na pokonanie kilometra światłowodu. Na pokonanie 1 metra potrzeba 5ns. Na pokonanie 1µm (a więc przesunięcia się płaskiej fali świetlnej o jeden okres potrzeba 5fs.

Kąt krytyczny wprowadzenia światła do światłowodu

Jeśli światłowód jest wielomodowy, bezpłaszczowy i posiada skokowy profil współczynnika załamania oraz współczynnik załamania rdzenia wynosi n_r=1,5 to sin α_0 =0,67 więc α_0 =42°. Wprowadzenie płaszcza do takiego światłowodu zmniejszy ten kąt wg zależności sin $\alpha = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$.

Zmiany długości światłowodu w funkcji temperatury

Długość światłowodu wynosi L=1km. Zmieniana jest temperatury ΔT pracy włókna z 20°C na 40°C. Szkło kwarcowe jest ośrodkiem izotropowym. Ilościowa zmiana długości związana jest z wartością liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej włókna α : $\Delta L=\alpha\Delta TL=1,1$ cm.

Waga jednostkowej długości światłowodu klasycznego

Długość światłowodu kwarcowego wynosi L=1km. Średnica Φ =125µm. Światłowód jest bez płaszcza. Powierzchnia przekroju poprzecznego światłowodu wynosi A=12,3*10³ µm². Waga wynosi G= σ AL.=27g.

Naprężenie wzdłużne światłowodu

Prawo Hooka wiąże naprężenie wzdłużne $\varepsilon = \Delta L/L$ włókna o długości L z naciągiem (lub kompresją) σ , powodującą przyrost długości ΔL , poprzez współczynnik proporcjonalności, którym jest moduł Younga: $\sigma = \varepsilon E$. Rozciągany światłowód posiada średnicę 125µm. Rozciągnięcie w próbach testowych czasu życia światłowodu (uodporniających) przyjmuje się na $\sigma = 345$ N/mm2=0,345GPa. Wówczas naprężenie wzdłużne włókna światłowodowego wynosi: $\varepsilon = \sigma/E = 0.5\%$. Zakładając naciąg zrywający włókna światłowodowego na ε_{max}^{-1} 6GPa, naprężenie

wzdłużne podczas zerwania włókna wynosi ε_{max} =8%. Siła naciągu F, dla światłowodu o przekroju poprzecznym A=0,0123mm² wynosi F= σ A=4,24N dla naciągu testowego. Dla naciągu zrywającego F_{max} = 34N.

Wartość współczynnika Poissona dla włókna światłowodowego

Współczynnik Poissona podaje zależność naprężenia w przekroju poprzecznym do naprężenia podłużnego: $p=(\Delta d/d)/(\Delta L/L)$. Współczynnik Poissona jest związany z modułem Younga i modułem sprężystości poprzecznej następującą zależnością: p=E/2G - 1. Dla światłowodu ze szkła kwarcowego p=0,21. W czasie testu uodporniającego o naciągu podłużnym $\Delta L/L=0,5\%$ zmniejszenie średnicy włókna światłowodowego wynosi $\Delta d/d=p\Delta L/L=0,1\%$. Analogiczne obliczenia dla warunków bliskich zerwaniu włókna prowadzą do wartości ($\Delta d/d$)_{max}=0,84\%.

Częstotliwość znormalizowana

Światłowód wielomodowy o gradientowym profilu refrakcyjnym dla wykładnika α =2 i średnicy rdzenia 2a=50µm oraz aperturze numerycznej NA=0,2. dla długości fali λ =1µm posiada wartość częstotliwości znormalizowanej A=2 π aNA/ λ =31,5. Liczba modów propagowanych w tym światłowodzie wynosi N=V²/4=247. W analogicznym światłowodzie o skokowym profilu refrakcyjnym dla α = ∞ wynosi N=V²/2=494. Dla światłowodu o skokowym profilu graniczna wartość częstotliwości znormalizowanej dla warunku jednomodowości wynosi V ∞ =2,405. Dla światłowodu o potęgowym profilu refrakcyjnym (typu α) graniczna wartość częstotliwości znormalizowanej Wynosi: V ∞_{α} =V ∞ [(α +2)/ α]^{1/2}. Dla α =2 V ∞_{α} =3,4.

Długość fali odcięcia

Światłowód o skokowym profilu refrakcyjnym, średnicy rdzenia2a=9 μ m i aperturze numerycznej NA=0,11 posiada punkt odcięcia modów wyższego rzędu dla V \propto =2,405. Długość fali odcięcia wynosi λ =2 π aNA/V=1293nm.

Właściwości światłowodu grubordzeniowego

Światłowód grubordzeniowy posiada następującą konstrukcję: średnica rdzenia 2a=100µm, średnica płaszcza D=140µm, współczynnik załamania rdzenia n₁=1,48, współczynnik załamania płaszcza n₂=1,46. Krytyczny kąt całkowitego wewnętrznego odbicia pomiędzy rdzeniem i płaszczem (najmniejszy kąt pomiędzy kierunkiem padania na granicę rozdziału ośrodków i normalną) wynosi sin α_0 =n₂/n₁=80,6°. W światłowodzie są prowadzone wszystkie promienie o kącie mniejszym od krytycznego mierzonego do osi światłowodu tzn. (90°- α_0) = 9,4°. Kiedy promień świetlny wchodzi z otaczającego światłowód promienia, dla którego przyjmujemy n₀=1, to NA= sinΘ=($n_1^2 - n_2^2$)^{1/2}=0,242, Θ=14°. Znormalizowana różnica współczynników załamania dla światłowodu grubordzeniowego wynosi Δ =NA²/n₁²=1.34%. Częstotliwość znormalizowana dla światłowodu grubordzeniowego wynosi V=2 π aNA/ λ =89,4. Liczba modów N=V²/2=4000. Maksymalna różnica czasów pomiędzy przejściem modu najwyższego rzędu i modu podstawowego wynosi w przybliżeniu Δ t= 5µs * Δ = 50ns, gdzie 5µs jest czasem przejścia fali płaskiej przez światłowód o długości 1km.

Właściwości światłowodu jednomodowego

Światłowód jednomodowy posiada następującą konstrukcję: średnica pola modowego $2w_0=10m$, średnica płaszcza D= 125µm, współczynnik załamania rdzenia 1,46, względna różnica współczynników załamania $\Delta=0,3\%$, współczynnik załamania pokrycia zewnętrznego n₃=1,52. Apertura numeryczna wynosi NA=n₁(2Δ)^{1/2}=0,113. Kąt akceptacji wynosi: sin Θ =NA=0,113, $\Theta=6,5^\circ$. Wszystkie te wartości są znacznie mniejsze niż dla światłowodu wielomodowego. Długość fali odcięcia w tym światłowodzie dla profilu skokowego wynosi $\lambda_c=2\pi aNA/V_c=1255nm$. Średnica rdzenia analizowanego światłowodu jednomodowego wynosi dla 1300nm $2a=2V_c\lambda_cw_o/2,6\lambda=8,9\mu m$. Dla $\lambda=1500 nm$ średnica rdzenia tego światłowodu wynosi $2a=7,7\mu m$. Gdy światłowody jednomodowe są wyginane lub spawane istotnym czynnikiem dla charakterystyki strat jest średnica pola modu *w*. Większe pole modu powoduje gorsze prowadzenie światła na zgięciach w światłowodzie ale mniejsze straty na spawach i złączkach.

Właściwości światłowodu gradientowego

Konstrukcja (wielomodowego) światłowodu gradientowego jest następująca: średnica rdzenia 2a=50µm (dla niektórych standardów 62,5µm), średnica płaszcza D=125µm, maksymalna wartość współczynnika załamania w rdzeniu na osi n₁=1,46, względna różnica współczynników załamania światła Δ =0,010. W światłowodzie o parabolicznym profilu refrakcyjnym różnica czasów przejścia modów jest redukowana do Δ t=0,1ns. Apertura numeryczna wynosi NA=sin Θ =n₁(2 Δ)^{1/2}=0,206. Maksymalny kąt akceptacji Θ =11,9°. Pasma transmisyjne optymalizowanych światłowodów gradientowych przekraczają obecnie 10 GHz * km.

Minimalne straty światłowodu

Gdy są całkowicie wyeliminowane straty zewnętrzne, wynikające z nieidealności światłowodu, to całkowite straty są opisane zależnością:

$$\mathbf{A}_{\mathrm{T}} = \mathbf{A}_{\mathrm{UV}} + \mathbf{A}_{\mathrm{RS}} + \mathbf{A}_{\mathrm{MP}} ,$$

Gdzie:

 $A_{RS} = (0.51\Delta + 0.76)/\lambda^4$ [dB/km] - rozpraszanie Rayleigha, pomiarowa zależność doświadczalna dla jednomodowego światłowodu klasycznego domieszkowanego GeO₂;

 $A_{MP} = 7,81 * 10^{11} \exp(-48,48/\lambda)$ [dB/km] – absorpcja wielofononowa w czystym szkle kwarcowym;

 $A_{UV} = 1,474 * 10^{-11} \exp(E_p/0,268 \text{ [dB/km/ppbw]}, \text{gdzie } E_p - \text{energia fotonu}$

 $A_{\rm UV} = 1542\Delta/(446\Delta + 6000) * 10^{-12} \exp 94,63/\lambda)$ [dB/km] – absorpcja w ultrafiolecie dla szkła kwarcowego słabo domieszkowanego;

Straty całkowite światłowodu wynoszą:

 $A_T = 1542\Delta/(446\Delta + 6000)10^{-12} \exp(4,63/\lambda) + 1,27\lambda^{-4} + 7081 \ 10^{-11} \exp(-48.48/\lambda) \ [dB/km].$ Warunek minimum strat $\delta A_T/\delta \lambda = 0$ daje nieco poniżej 0,15dB/km dla 1,57µm.



OKREŚLANIE LICZBY MODÓW

Częstotliwość znormalizowana

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

Dla każdego rodzaju światłowodu wielomodowego przybliżona liczba modów N wynosi:

PROFIL SKOKOWY: $N = V^2/2$



profil gradientowy: $N = V^2/4$



WPŁYW ZGIĘCIA NA ŚWIATŁOWÓD JEDNOMODOWY

$$\Delta n = k(r/R)^2$$

gdzie: k = 0.133 (constant);

R = promień krzywizny światłowodu;

2r =średnica płaszcza

LINIOWE OPÓŹNIENIE NA JEDNOSTKĘ DŁUGOŚCI $\Delta\beta = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}$ KRZYWE STAŁYCH STRAT DLA KĄTOWEGO I POPRZECZNEGO NIEDOPASOWANIA POŁĄCZENIA ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH





STRATY ZWIĄZANE Z NIEDOPASOWANIEM POPRZECZNYM

Wielomodowy, gradientowy, stacjonarny rozkład modów, skokowy profil refrakcyjny:

$$\mathbf{L}_{\text{lat}} = -10 \log \left[1 - \frac{8x}{3\pi a} \right]$$

Jenomodowy:

$$L_{lat}$$
= -10 log $\left[e^{-U^2}\right]$

$$U = \frac{X}{W_0}$$

gdzie:

STRATY ZWIĄZANE Z NIEDOPASOWANIEM KĄTOWYM



Wielomodowy, gradientowy, stacjonarny rozkład modów:

$$L_{ang} = -10 \log \left[\frac{8}{3\pi} \frac{n \sin \theta}{NA} \right]$$

Jednomodowy:

$$L_{ang} = -10 \log \left[e^{-T^2} \right]$$

gdzie:
$$T = \frac{n_0 \pi w_0 \sin \theta}{\lambda}$$

OPTYCZNE JEDNOSTKI dB

Związek pomiędzy decybelami a mocą optyczną:

$$dB = -10 \log \left(\frac{Pout}{Pin} \right)$$



TRANSMSJA

$$T=10^{\left(\frac{Loss}{-10}\right)}$$

Gdzie straty są w dB.



STRATY SPRZĘŻENIA SPOWODOWANE POŁĄCZONYMI PRZYCZYNAMI

$A = \frac{(kw_1)^2}{2}$ $B = G^2 + (D + 1)^2$

 $C = (D+1)F^2 + 2DFGsin\Theta + D(G^2 + D+1)sin^2\Theta$

Podłużne niedopasowanie z; Poprzeczne niedopasowanie x; Kątowe niedopasowanie q; Modowe niedopasowanie pomiędzy polami o średnicach w1 i w2

Całkowite straty sprzężenia dwóch światłowodów jednomodowych:

$$\Phi_{\rm tot} = -\ 10 log \, \eta_{\rm tot}$$

Gdzie:

$$\eta_{tot} = \left(\frac{4D}{B}\right) e^{-AC/B}$$

$$D = \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2$$
$$F = \frac{2x}{kw_1^2}$$
$$G = \frac{2z}{w_1^2}$$

NIEDOPASOWANIE

ŚWIATŁOWODÓW

JEDNOMODOWYCH

$$kw_1^2$$

$$k = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$$

24. PODSUMOWANIE

Tabela 24.1. Tabelaryczne ujęcie obecnie otrzymywanych dokładności pomiarowych podstawowych parametrów światłowodowych w laboratoriach komercyjnych [5]:

Parametr	rodzaj	zakres pomiaru	niepewność	Metoda
	światłowodu	np.		pomiarowa
		długość fali [nm],		
		czas [fs, ps], ∆n		
Dyspersja	Jednomodowy 2-	1200-1600	±2%	Technika
	20 km			przesunięcia fazy
Długość fali zerowej dyspersij	jednomodowy	1200-1600	±0,1nm	Jak dla dyspersji
Nachvlenie ch-ki	iednomodowy	1200-1600	+2%	Jak dla dyspersii
w zerze dyspersji	<u>j</u>			······································
Dyspersja	wielomodowy	Okna transmisyjne 850nm oraz 1300nm	±(7+0,5ps/nm km)	Czas przelotu impulsu
Modowa	Jednomodowy,	5fs - 10ps	Dokładność 2%	Matryca Jonesa
dyspersja	typu HB		MDP>300 fs dla	
polaryzacyjna			włókna HB	
Średnica pola	Jednomodowy,	1150nm, 1310nm,	±0,06mm	Skanowanie pola
modowego	10m,			dalekiego 1-2 cm od włókna
Apertura	Wielomodowy	850nm	Kilka %, wartość	Skanowanie pola
numeryczna	50/125µm,		zależy od	odległego,
	62,5/125µm		przyjętej definicji:	wypełnienie całej
			asymptota, 10%	apertury
			mocy,	wejściowej
Tłumienie	Jednomodowy	1100 - 1600 nm	$\pm 0,03$ dB do 20dB	Odcięcia końca
		co 5nm	maksymalnego	
	xx x* 1 1	000 1400	tłumienia odcinka	01: 11/
Tłumienie	Wielomodowy	800 – 1400 nm	±0,06 dB	Odcięcia końca
Jednorodność	Jednomodowy 4 –		±0,006dB/km	Polarymetryczna
tłumienia	13 km			Reflektometria
				optyczna w
Dhugoáá f-1:	Indunandarray	<u> 200 1600 mm</u>	1. 7	Deiedymara mette
Diugosc Iali	kilko motrów	800 – 1000 nm	±onm, dla spadku	rojedyncza pętla
ouciçua	KIIKA IIIUUUW		mocy do poziomu	średnicy 6cm
	Kabal	900 1600 nm	1070 +10mm	steamey bem,
	światłowodowy	700 – 1000 IIII		
	Swianowouow y			

Profil refrakcyjny	Jednomodowy i	$\Delta n = od + 0.02$	Od ±0,00015	Osiowa
	wielomodowy,	do -0,01	do ±0,00005	mikroskopia
		,	w zależności od	interferencyina i
			wartości An	porównanie z
				wielowarstwowym
				áwiatkowodom
				swiatiowodeni
	XXX .1 *		1 50/ 1 1 0 0001	odniesienia
	Wszystkie	Δn względem	1,5% lub 0,0001,	Bliskie pole
	rodzaje,	SiO_2 od $-0,01$ do	wartość większa z	załamane
	wymagany	=0,03	dwóch	
	standardowy		powyższych	
	wymiar 125um.			
	minimalna			
	dhugość 2m			
Gradniaa plaazaza	Wagyathia radzaja		10.1	Milmarkan wideo z
Steutica piaszcza			±0,1µm	
	Najczęściej			kamerą CCD o
	standardowe			dužej
	wymiary			rozdzielczości
Niekołowość	Wszystkie		±0,05% stopień	Mikroskop wideo,
płaszcza	rodzaje,		eliptyczności	Kalibrowanie
•			1 5	wymiarów
Przeciętna	Wszystkie		±0,5µm	Mikroskopia z
średnica	rodzaje,			systemem
pierwotnego				komputerowym
pokrvcia				1 5
Niekołowość	Szczególnie kable		+0.5um	System video
pokrycia	nłaskie taśmowe		±0,5µm	mikroskonowy
nierwotnego	długość próbki			ппктозкороwу
pierwonego	2m			
Nanrażania	Nanrażania	Profil naprożeń	+100/	Mikroskonia
Napięzenia wawnatrzna profil	taabnalagiagna	rioni napięzen	±10%	
wewnęuzne, prom	technologiczne,	osiowo		poprzeczna i
napręzen	napręzenia	symetryczny,		pomiary
	indukowane	profile		opóźnienia
		trójwymiarowe		
Analiza	Wszystkie rodzaje	Profile jonów		Spektroskopia
spektroskopowa,	światłowodów	domieszek, profile		Ramanowska,
skład chemiczny		zanieczyszczeń,		spektroskopia
5		napreżenia		fluorescencyina
		wewnetrzne		inder es e ente j jind
		odporność		
		radiacyina		
Dhugoćá fali	Źródła	Efektuwne	10.2mm	
Diugust Iall	Livuia ávriatkovia davia	dradkowa dhaceéé	±0,5IIIII	
	swianowouowe	stoukowa uługosc	rozazielczosc,	
		fall zrodła,	±0,02 nm	
			dokładność	
		spektralna	±0,05nm	
		szerokość		
	,	połówkowa		
Moc optyczna	Żródła dla	Kalibracja	±0,004dB	
	techniki	mierników mocy		
	światłowodowej			

OTDR	Wszystkie rodzaje	Kalibracja	0,01dB/dB,	Kalibrowany
		mierników OTDR	0,003dB/km	światłowód
Poziom	jednomodowy			Kalibrowany
rozproszenia				światłowód z
wstecznego				artefaktami
Droga optyczna	jednomodowy	L _o >1km	± 2 części na 10^4	Kalibrowana pętla
				światłowodowa
Grupowy	jednomodowy		0,001	Kalibrowany
współczynnik				światłowód
załamania				
Nieliniowy	Jednomodowy,		5%	
współczynnik	dla fali w okolicy			
załamania	1550nm			

Tabela 24.2. Podstawowe parametry szkła kwarcowego i klasycznego światłowodu jednomodowego ze szkła kwarcowego

Oznaczenie, jednostka	wartość	Opis parametru
$\delta n/\delta T [^{\circ}C^{-1}]$	1,1*10 ⁻⁵	Termiczna dyspersja współczynnika
		załamania
δτ/δT [ps*km/°C]	40	Termiczna dyspersja opóźnienia
Minimum n _g	1,4616	λ=1300nm
T _s	1730 (logη=7,6)	Punkt mięknięcia
Ta	1180 (logη=13)	Punkt odprężania
T _n	1075 (logη=14,5)	Punkt zaniku naprężeń
$\alpha [10^{-7} * K^{-1}]$	5,5	Liniowy współczynnik.
		rozszerzalności termicznej.
$\sigma [g/cm^3]$	2,20	Gęstość
E [GPa]	72,5	Moduł Younga
G [GPa]	30,0	Moduł sprężystości poprzecznej
Р	0,21-0,22	Współczynnik Poissona
С	0,7	Współczynnik rozpraszania Rayleigha
		dla ultraczystego szkła kwarcowego
С	0,7 - 0,9	α_R dla szkieł słabo domieszkowanych
$\alpha_R = C/\lambda^4 [dB/km \ \mu m^4]$	0,10 – 15 dB/km	Dla λ=1,5μm, szkła
		niedomieszkowanego i szkieł
		domieszkowanych
λ1=0,0684043μm,	B1=0,6961663,	Współczynniki Sellmeiera dla
λ2=0,1162414μm,	B2=0,4079426,	czystego szkła kwarcowego
λ3=9,896161µm	B3=0,8974794,	
$\alpha [cm^{-1}]$	$4 * 10^{-7}$	Minimalna stała tłumienia dla szkła
		kwarcowego dla λ=1,55μm
n ₂	$n_2 = 2,3*10^{-22} m^2 / V^2,$	Nieliniowy współczynnik załamania
	$n_2 = 1,1*10^{-13} esu$	
	$n_2 = 3.2* 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W},$	

BIBLIOGRAFIA

Rysunki i niektóre opisy podstaw teoretycznych, metod i procedur pomiarowych zawarte w niniejszej pracy zaczerpnięto z materiałów źródłowych cytowanych poniżej. W szczególności rozdział dotyczący pomiarów technologicznych opracowano na podstawie pracy [12]. Rozdział dotyczący pomiarów nieliniowych właściwości światłowodów opracowano na podstawie danych pomiarowych dostępnych w sieci Internet i publikowanych przez czołowe laboratoria fotoniki oraz prac [10, 11,13.14]. Rozdział dotyczący pomiarów kabli światłowodowych opracowano na podstawie [2]. Rozdział o światłowodach aktywnych opracowano na podstawie pracy [21]. Opisy praktycznych realizacji niektórych zestawów pomiarowych zaczerpnięto ze skryptu [20] stanowiącego dokumentację pomiarowego laboratorium optoelektroniki w Instytucie Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej. Analogiczne laboratorium pomiarowe może być wdrożone u potencjalnych kontrahentów. Rozdział o pomiarach rozpraszania stymulowanego w światłowodach oparto na książce G.P.Agrawala i częściowo adaptowano z pracy [45]. Pozostałe materiały zaczerpnięto bądź z sieci Internet bądź z prac własnych. W szczególności prace własne dotyczą światłowodów wielordzeniowych, kształtowanych, badania radiacyjnego światłowodów, oprogramowania komputerowego internetowego bazodanowego systemu pomiarowego. Praca posiada głównie charakter opracowania literaturowego i powstała na zamówienie Komitetu Naukowego XIV Szkoły Optoelektroniki Polskiej Akademii Nauk.

- [1] Standardy międzynarodowe dotyczące światłowodów ISO, DIN, ANSI, IEC, np.: IEC 793-1-C1, C3, C4, C5, C7, C9. ITU;
- [2] G.Mahlke, P.Gossing, Fiber Optic Cables, Wiley, New York, 1996.
- [3] E.G.Neumann, Single-Mode Fibers, Springer, New York, 1992.
- [4] R.Romaniuk, Tensile strength of tailored optical fibers, Opto-Electronics Review, No 2, 2000, Special Issue on State-of –the-Art of Optical Waveguide Technology in Poland, pp. 103-118.
- [5] Publiczna i komercyjna oferta organizacji fotonicznych, laboratoriów pomiarowych i firm: <u>www.npl.co.uk</u>; <u>www.optics.org</u>; <u>www.photonics.com</u>; <u>www.cnet.org</u>; <u>www.osa.org</u>; <u>www.spie.org</u>; <u>www.lia.org</u>;
- [6] Y.Nahimira, Wavelength dependence of correction factor on effective area and mode field diameter for various singlemode optical fibres, Electronics Letters, vol.33, pp.1483-1485, (1997)
- [7] M.Artiglia., et al., Mode field diameter measurements in single-mode optical fibres, IEEE Journ. of. LT, vol. 7, pp.1139-1152, (1989).
- [8] R.Romaniuk, K.Poźniak, Fotoniczna Sieć Telemetryczna, Raport Techniczny, Program Priorytetowy Badań Własnych Politechniki Warszawskiej "Inżynieria Fotoniczna", Warszawa 1997-2000;
- [9] R.Romaniuk, P.Pańta, Badania radiacyjne światłowodów włóknistych, Raport Techniczny dla Wojskowego Instytutu Łączności, Warszawa 1983;
- [10] G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, Boston, 1995;
- [11] S.V.Chernikov, J.R.Taylor, Measurement of normalization factor of n₂ for random polarization in optical fiber, Optics Letters, vol. 21, pp.1559-1561, (1996);

- [12] T.Izawa, S.Sudo, Optical firers materials and fabrication, KTK Scientific Publ., Tokyo, 1992
- [13] N. Pandit, D. U. Noske, S. M. J. Kelly and J. R. Taylor: 'Characteristic instability of fiber loop soliton lasers', Electronics Letters, 28, pp.455-457 (1992)
- [14] D. U. Noske, N. Pandit and J. R. Taylor: 'Source of spectral and temporal instability in soliton fiber lasers', Optics Letters, 17, pp.1515-1517 (1992)
- [15] S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor, N. S. Platanov, I. E. Samartsev and V. P. Gapontsev: '1.08-2.2 micron supercontinuum generation from Yb-doped fibre laser', Technical digest of CLEO '96, p. 210 (1996)
- [16] Encyklopedia Fizyki PWN, Warszawa 1973
- [17] Sz.Szczeniowski, Fizyka Doświadczalna, Optyka, PWN, Warszawa 1965
- [18] D. Marcuse, Principles of optical fiber measurements, Academic Press, New York, 1981
- [19] G.Cancellieri, U.Ravaioli, Measurements of optical fibers and devices: theory and experiments, Artech House 1984

[20] J.Helsztyński, L.Lewandowski, K.Jędrzejewski, K.Poźniak, Z.Wawrzyniak, R.Romaniuk, Laboratorium Podstaw Optoelektroniki i Miernictwa Optoelektronicznego, Politechnika Warszawska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997

[21] F.A.Flood, G.Wildeman, New fiber amplifiers – expansion into the L-band, Photonics Spectra, February 2000, pp.114-116

[22] Extreme Photonics, Photonics Spectra, February 2000

[23] R.Romaniuk, J.Dorosz, Przegląd materiałów dla techniki światłowodowej w średniej podczerwieni, Szkło i Ceramika, vol. XXXIV, str. 49 – 55, (1983)

[24] H.R.Stolen, et al., Raman oscillations in glass optical waveguide, Applied Physics Letters, vol. 20, pp. 62-64 (1972);

[25] S.V. Chernikov, et al., High-gain, monolithic, cascaded fibre Raman amplifier operating at 1,3um, Electronics Letters, vol 31, pp. 472-473, (1995);

[26] Y.Nobuyuki, T.Imai, Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling, Journal of Lightwave Technology, vol.LT-11, pp.1519-1522, (1993);

[27] L. Thevenaz, et al., High-accuracy Brillouin gain spectrum measurements of single mode fibers, Proc. Symposium Optical Fiber Measurements, NIST, Boulder Co., pp.211-214, (1994);

[28] R.W Tkach, et al., Spontaneous Brillouin scattering for single mode optical fiber characterisation, Electronics Letters, vol.22, pp.1011-1013, (1986);

[29] R.G.Smith, Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined bystimulated Ramana and Brillouin scattering, Applied Optics, vol.11, pp.2489-2494, (1972);

[30] X. Bao et al., Characterization of the Brillouin loss spectrum of single mode fibers by use of very short pulses, Optics Letters, vol. 24, pp.510-512, (1999);

[31] Y. Aoki, et al., Input power limits of single mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 6, pp.710-719, (1988);

[32] D. Cotter, Suppression of stimulated Brillouin scattering during transmission of high power narrowband laser light in monomode fibre, Electronics Letters, vol. 18, pp. 638-640, (1982);

[33] Y. Aoki, et al., Observation of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibres with single frequency laser diode pumping, Optical and Quantum Electronics, vol. 19, pp. 141-143, (1987);

[34] H.R.Stolen, Nonlinearity in fibre transmission, Proc. Of IEEE, vol. 68, pp.1232-1236, (1980);

[35] L.D.Butler et al., The pulse scan technique for measurement of Ramana gain coefficient in fibres, Proc. of 4-th European Conf. On Optical Fibre Measurements, pp.54-57, Teddington UK, (1997);

[36] T. Nakashima, et al., Configuration of the optical transmission line using stimulated Raman scattering for signal light amplification, Journal of Lightwave Technology, vol. LT-4, pp.569-573, (1986);

[37] P.Bayvel, P.M.Radmore, Solutions of the SBS equations in single mode optical fibers and implications for fibre transmission systems, Electronics Letters, vol. 26, pp.434-436, (1990);

[38] M.O. vanDeventer, J.A. Boot, Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single mode fibers, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. LT-12, pp. 585-590, (1994);

[39] R.D.Esman, et al., Brillouin scattering: beyond threshold, Proc. Optical Fibre Communications Conference, pp.227-228, (1996);

[40] K. Shiraki et al., SBS thresholdof a fiber with a Brillouin frequency shift distribution, Journal of Lightwave Technology, vol. LT-14, pp.50-57, (1996);

[41] T.W. Anderson, Consistency of measurement methods for the mode field radius in a single mode fiber, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. LT-2, pp.191-197, (1984);

[42] G.A.Hallam, Re formulation of the expression for mode field diameter in the variable aperture domain, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 6, pp.255-257, (1994);

[43] ITU-T COM 15-R 68-E, G.650 recommendation, definition and test methods for parameters of single mode fibers, Appendix on Nonlinearities, (1996);

[44] C.R.Wittman, M.Youg, Are the formulas for mode field correct? Technical Digest, Symp., Optical Fiber Measurements, Boulder Co., pp.141-144, (1998);

[45] R. Billington, Measurement methods for stimulated Raman and Brillouin scattering in optical fibres, NPL Report Coem 31, June 1999;

[46] T.C.E. Jones, The validity of single mode optical fibre transfer standard for the calibration of fibres for high power users, NPL Report COEM 10 (1988);

[47] T.Okoshi et al., Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum, Electronics Letters, vol.16, pp.630-631, (1980);

[48] D. Mahgerefteh et al., Technique for measurement of the Raman gain coefficient in optical fibers, Optics Letters, vol.21, pp.2026-2028, (1996);

[49] F.L. Gallener, et al., The realtive Raman cross sections of vitreous SiO₂, GeO₂, B₂O₃ and P₂O₅, Applied Physics Letters, vol. 32, no.1, pp. 34-36, (1978);

[50] A.Geta, R.W.Boyd, Stochastic dynamics of stimulated scattering in an optical fber, Physical Review, vol. A, 44, pp.3205-3209, (1991);

[51] M.J.Benson et al., Relative dopant concentration profiling of germania, phosphorus and erbium doped silica based optical fibres, Proc. Symposium on Optical Fibre Measurements, Boulder Co., pp. 85-88 (1992);

[52] Y. Namihira et al., Efdective arwa of optical fibers, Electronics Letters, vol. 30, No 14, pp.257-259, (1994);

[53] J.Dorosz, Światłowody wielordzeniowe, Politechnika Białostocka, 1995;

[54] R.Romaniuk, K.Poźniak, R.Kupczak, Światłowodowe sieciowe systemy telemetryczne, Program Priorytetowy Badań Własnych Politechniki Warszawskiej ""Inżynieria Fotoniczna", Raport Techniczny, Politechnika Warszawska, 1999;

[55] R.Romaniuk, K,Jędrzejewski, Badania radiacyjne światłowodów, I Sympozjum Techniki Pomiarowej Światłowodów, UMCS, Lublin 4-5 VI, str. 159-172, (1981);

SKOROWIDZ

A ----- A ----Abbego, Liczba, 34, 35, Refraktometr, 25, 26,
Absorpcja, 36, 40, 57, 62,
Al₂O₃, 66,
Amiciego pryzmat, 25, 26,
Analizator widma, 30, 32, 191, 195, 199,
Apertura numeryczna (NA), 52, 60, 61, 95,
97, 101, 221, 227, 229,
Aperturowa funkcja mocy, 107,
AS (antysymetryczny-symetryczny), 172,
173, 175,
Autokorelacja, 23,
α, 44, 60,

----- B -----B₂O₃, 39, 40, 43, 46, 47, 49, 50, 51, 55, 153, BBO, 23, BER, 86, 87, 125, Bessela funkcja, 171, Biota polarymetr, 32, Bolometr, 28, Bragga komórka, 195, Brewster, 26, 27, Brullouina rozpraszanie, 138, Spontaniczne, 138, Stymulowane, 139, 145, 148, Brilloina wzmocnienie, 141, 144, Bufor kablowy, 183, 185,

----- C -----CAN, 213, 215, CCD, 20, 99, 116, Charakterystyka, Dwójłomności modowej, 179, Fotodiody, 193, Spektralna tłumienia, 35, 41, 42, 127, 180, 223, Termiczna, 185, 187, CVD (MCVD), 55, 56, 57, 65, 67, 114, 161, Czas przejścia modów, 221,

Częstotliwość, Optyczna, 33, Znormalizowana, 221, 224, ----- D ----dB (optyczne), 226, Demodulator, 33, Destylacja, 41, DEL (Dioda elektroluminescencyjna), 28, 71, 91, 190, Długość fali, 18, 37, 39, 62, 230, Minimalnych strat, 44, 45, Odcięcia modowego, 46, 89, 229, Zerowej dyspersji, 49, 50, Długość koherencji, 71, Dokładność pomiaru, 24, 25, 26, 229-231, Domieszki, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 54, 161, Droga optyczna, 26, 231, Droga dudnienia, 172, 177, 180, 181, DWDM, 18, 20, 199, Dwójłomność Indukowana, 181, Międzyrdzeniowa, 173, Dylatacja, 220, Dyspersja, 34, 46, 77, 80, 82, 83, 84, 161, Chromatyczna, 75, 229, Materiałowa, 49, 50, 53, 54, 78, 176, Międzyrdzeniowa, 175, 176, Profilu refrakcyjnego, 51, Termiczna, 52, 53, 231, Δn, 44, 45, 46, 66, 74, 79, 83, 221, 222, 227,

----- E -----EDFA, światłowodoy wzmacniacz erbowy, 134, 145, 153, 156, EN, 15 Energia impulsu, 24, Erbowy wzmacniacz, 21, Etalon, 142, Excyton, 39,

----- F -----Fala, Nadzwyczajna, 194, Pobudzająca, 33, 59, Płaska, 220, Powierzchnia, 220, Fabry-Perot, 19, 20, 31, 142, Femtosekunda, 22, 23, 24, 161, Filtr, 20, Interferancy inv, 91, Modów płaszcza, 60, 103, 105, Modów wyższego rzędu, 61, Fizeau, 19, Fluktuacja, Koncentracji, 43, Współczynnika załamania, 51, 85, 110, 114, Wymiarów światłowodu, 58, Fonon (drgania, wibracje sieci), 36, 41, 62, Fotodetektor (fotodioda), 30, 68, 69, 77, 82, 96, 97, 101, 103, 144, 190, 191, 192, 193, Fotometria, 27, 29, Fourier, 21, 71, 77, Front falowy, 106, Frsnel, 29, 30, ----- G -----Gaussa krzywa, 75, 77, 96, 100, 101, 136, 137, GeO₂, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 65, 66, 81, 153, Gęstość, Falowa, 27, Katowa, 27, 28, Optyczna, 56, GHz (Gbit), 21, 24, 71, 87, 138, 139, 141, 142, 153, 158, 163, 222, GPIB (IEC-625), 202, 212, Goniometr, 24, 190, Graficzny interfejs użytkownika, 18, 199, 210-211, 218, Griffitha równanie, 117,

----- H -----Halogenki, 41, Hankela transformata, 93, 10, He-Ne, 20, 21, 91, 126, Hooka prawo, 117,

----- I -----

IEC, 15, 212, Indykatrysa, 194, Immersja, 26, 97, 98, Interferencja, 19, 20, 27, Intergerencyjne pole prążkowe, 109, Interferometr Michelsona, 19, 21, 31, 69, 71, Interferometria, 31, 51, 91, 894, 108, 109, 110, 112, 114, 126, 162, IR (podczerwień), 35, 36, 42, ITU, 21, 150. Izolator optyczny, 134, 144, 189, ----- J -----Jamina interferometr, 26, 12, 31, Justacja, 200, ----- K -----K – funkcja,(także funkcje I, J) 171, 172, Kable światłowodowe, 52, 182-188, Kat, 183, Akceptacji, 60, 227, Aperturowy, 29, 107, Graniczny, 25, 220, Kerra efekt, 22, 194, Kevlar, 184, Kierunkowość sprzegacza, 189, Klient-serwer, 210-211, Kolimator, 24, Kompresja impulsu, 161, Konfokalny, 97, Komora klimatyczna, 52, 187, Kompensator, 26, Kompresja impulsu, 23. Komputerowe systemy pomiarowe, 202-209, 217, 218, 219, Kondensor, 26, Kontrast międzyrdzeniowy, 175,

Kwarc, 32, 38,

----- L -----Laboratorium Miernictwa Światłowodowego HS Biaglass, 200, 201, Laboratorium Miernictwa Światłowodowego ISE, 17, 64, 99, 100, 180, 189, 190, 191, 194, 195, 196, 197, 198, 215, Lab Windows, 206, Laser, 19, 20, 21, Excimerowy, 18, Nd:YAG, 80, 81, 82, 142, 143, 148, 159, Półprzewodnikowy, 24, 96, 10, 146, 154, 155, Ti:szafir, 22, Xenonowy, 152, Laurenta polarymetr, 31, 32, Liczba falowa, 35, Liczba modów, 221, 224, Lippicha polarymetr, 31, 32, Lorentza funkcja, 140, 141, 152, LP, 33, 89, 90, Luksomierz, 29, Luminancja, 28,

Lummera_Gehrkego interferometr, 31, Lunetka, 24, 25, 26, 32,

----- M -----MDP, 88, Mieszanie czterofalowe, 159, Mieszanie modów, 62, Miernictwo światłowodowe, 16, Migawka, 20, Moc optyczna, 24, 27, 32, 62, 68, 90, 97, 147, 171, 172, Modulator, 22, 33, 69, 153, 194, Akustooptyczny, 195, 196, 197, Elektrooptyczny, 87, 144, 194, 197, Magnetooptyczny, 194, Mechaniczny, 63, 196, Mod Płaszczowy, 95, Podstawowy, 59, 223, Rozkład pola, 79, Stacjonarny rozkład, 61, 76, Światłowodowe, 59, Transfer energii, 172,

Monochromator, 29, 64, 10, 107, 189,

----- N -----Nahimiry współczynnik korekcyjny, 137, naprężenia wewnętrzne, 54, 220, niepewność pomiaru, 150, Nikol, 30, 32, Napromieniowanie, 28, 29, Natężenie promieniowania, 28, NIST, 21, Noniusz, 26,

----- 0 -----Odbiornik optoelektroniczny, 30, 32, 63, 68, 69, 70, 101, Odporność radiacyjna światłowodu, 125, 127-132, OSDR, 71, OFDR, 69, OH, 36, 40, 56, 65, 66, 67, Okno, Pracy kabla światłowodowego, 185, 188. Transmisyjne, 133, Okular, 25, Opóźnienie grupowe, 81, 224, OTDR, 17, 71, 189, OVD, 54, 65, 114,

----- P -----P₂O₅, 37, 39, 40, 43, 46, 48, 50, 51, 52, 55, 67, 153, Pasmo Absorpcji, 36, 39, 41, 42, 43, C, 164, 165, 166, Długofalowe, 36, 164, 165, 166, 167, Transmisyjne, 39, 85, 86, Petermana definicia, 137, Piezoelektryk, 194, **PKN. 15** Płytki płasko-równoległe, 26, 31, PMMA, 35, Pockelsa efekt, 194, Poissona współczynnik, 221, 231, Polarymetr, 31, Polaryzacja modowa, 178-180, Polaryzator, 31, 134, Pole, Bliskie, 94, 95, 96, 97, 99, 101, 104, 137, Dalekie, 94, 101, 102, 103, 106, 137, Pole modowe, Rozkład, 33, 79, 92, 103, Średnica (promień), 51, 90, 93, 137, 223, 225, 227, 228, Pomiary Długości fali, 19, 21, Czasu, 22, Pompa optyczna, 139, 143, 149, 152, 154, 166. Powierzchnia fotoczuła, 192, Powierzchnia efektywna, 99, 135, 136, 149, 155. Poyntinga wektor, 28, Preforma, 33, 51, 54, 55, 56, 57, 73, 109, 168, Predkość fazowa, 172, Profil refrakcyjny, 28, 32, 46, 51, 83, 95, 98, 108, 109, 112, 114, 170, 224, Optymalny, 52, Potegowy (typu α), 51, 61, Typu W, 72, 84, Pryzmat, 24, 26, 30, Przerwa energetyczna (zabroniona), 34, 35, 39. Przysłona (przesłona), 30, 98, 105, PSK, 157, Pulfrich, 25, 26,

----- R -----Radiancja, 28, Ramana rozpraszanie, 82, 133, 138, 151, 157, Ramana wzmocnienie, 139, 152, 154, 155, Rayleigha rozpraszanie, 35, 36, 40, 43, 45, 62, 65, 66, 231, Rdzeń światłowodu, 38, 151, 171, Reflektancja, 40, Reflektometr, 70, Refraktometr, 25, 26, 68, Relaksacja światłowodu, 126, Rozkład napreżeń, 181, Rozkład pola, 62, Rozpraszanie, 137, Wsteczne, 68, 70, 231, RS-232, RS-485, 202, 206, 209,

----- S ----samo-modulacja fazowa (SMF), 134, Sb₂O₃, 66, Sellmeiera równanie, 46, 53, Separacja międzyrdzeniowa, 177, Siatka Bragga, 17, 134, 139, Dyfrakcyjna, 29, Skrośna modulacja fazy, 134, Słabej propagacji warunek, 175, Snell, 24, SnO₂, 56, SNR, 125, 156, Soczewka, 30, 32, 69, 223, Soleila polarymetr, 31, 32, Soliton, 161, Spawanie światłowodów, 200, Spektrofotometr, 30, 153, Spektrograf absorpcyjny, 29, 30, Spektroskop, 18, Spektrum (szerokość spektralna), 18, 42, 81, Sprawność transferu mocy, 174, 177, Sprzęgacz dichroiczny, 153, Sprzęgacz światłowodowy, 69, 146, 189, Sprzężenie, Międzyrdzeniowe, 171, Modów, 59, Źródła ze światłowodem, 59, 60, Stała propagacji, 175, Stokesa pasma emisyjne, 82, 138, 139, 149, 152, 158, Stopa błędów transmisji, 32, 86, Straty, Całkowite, 44, 45, Minimalne, 222,

Optyczne, 36, 41, Przyrostowe, 41, Rozproszeniowe, 43, 44, 57, Transmisyjne, 36, 37, 38, 39, 57, 66, 67, Wewnetrzne sprzegacza, 189, Wtracenia, 63, 189, Zgięciowe (mikrozgoięciowe), 71, 72, 73, 74, Złączy, 224-226, 228, Strumień promieniowania, 27, Szafir, 22, 23, Szczelina, 30, Szkło Kwarcowe (krzemionka, SiO₂), 23, 33, 36, 38, 40, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 50, 53, 55, 57, Zanieczyszczenia, 41, 42, 56, ----- Ś -----Światłowód, 28, 46, 72, Aktywny, 161, Anizotropowy, 181, Bliźniaczo-rdzeniowy, 169, 175, 176, 177, Bow-Tie, 179, Dwójłomny (typu HB), 178, 229, Dwurdzeniowy, 171, Eliptyczny, 116, 181, 179, Gradientowy, 51, 222, 224, 226, Jednomodowy, 51, 57, 92, 96, 115, 221, 229, 231, Nieliniowy, 161, Niskostratny, 57, 229, Nisko-wymiarowy, 178, Panda, 179, Specjalny, 54, Stożkowy, 168, Wielomodowy, 29, 59, 61, 76, 111, 115, 224, 226, 229, Wielordzeniowy, 168, Ze skompensowana dyspersja, 136, Z przesunięta dyspersją, 136, ----- T -----

TCP/IP, 202, 209, Telekomunikacja światłowodowa, 15, 16, 18, 35, 61, 125, 159, 198, Test zmęczeniowy, 118, Dynamiczny, 121, 122, Statyczny, 119, 123, Uodporniający, 118, 120, THz, 22, 138, 151, 154, 158, TiO₂₊, 55, Tłumienie sygnału optycznego, 64, 65, 67, 68, 149, 223, Transmisja światłowodowa, 63, 99, 198, Transmitancja, 75, 78,

----- U -----UV (ultrafiolet), 18, 24, 35, 36, 40, 44, 45, 46,

----- V -----V (częstotliwość znormalizowana), 74, 83, 90, 92, 175, 221, 224, VAD, 51, 114,

----- W -----WDM, 21, 139, 151, 159, 160, 163, 166, 169, 174, Weibulla rozkład, 117, 120, 123, Wiązka światła, 28, 30, Skolimowana, 59, Włókno optyczne, 58, Wollastona pryzmat, 30, Współczynnik Ekstynkcji, 189, Odbicia, 29, Przepuszczalności, 29, Rozszerzalności termicznej, 54, 55, 231,

Sellmeiera, 231, Sprzeżenia, 189, Sprzężenia międzyrdzeniowego, 172, 174. Załamania, 21, 24, 25, 26, 33, 46, 47, 48, 53, Załamanie efektywny, 79, Załamania grupowy, 33, 78, 89, 231, Załamania nieliniowy, 34, 134, 135, 136, 231, WWW, 202, 216, 218, Wymiary geometryczne światłowodu, 116, Wytrzymałość mechaniczna Kabla światłowodowego, 186, 187, Światłowodu, 58, 120, 122, 123, 124, Wzmacniacz homodynowy, 96, 103, 190, 191,

----- Y -----Younga moduł, 117, 231,

----- Z,Ź -----

Zegar, 24, Złącze światłowodowe, 199, 224, 225, ZrO₂, 66, Zwierciadło, 91, Źródło, 30, Lamberta, 28, 29, 59, 62, promieniowania, 27, 59, 190, punktowe, 28, sprzężenie, 59, 192, wzorcowe, 29,

Miernictwo Światłowodowe