Dyspersja w światłowodach

Dodatki: standaryzacja, OTDR

Dyspersja (między)modowa

skokowy: $\Delta t_{MOD} = \frac{z}{2n_1 c}(NA)^2 \qquad NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$

gradientowy: $\Delta t_{MOD} \approx \frac{z}{8n_1 c}(NA)^4$

$D_{MOD} = \Delta t_{MOD} / z$ ~ 50 ns/km skokowy (prehistoria) ~ 0,5 ns/km gradientowy

można też specyfikować pasmo: ~ 5 MHz•km skokowy > 500 MHz•km gradientowy

Współczesne (gradientowe) światłowody wielomodowe klasyfikuje się pod względem dyspersji modowej na kategorie OM (optical multimode); OM1, OM2, OM3, OM4

Np. przy 10Gb/s: OM1 → 33 m, OM4 → 400 m

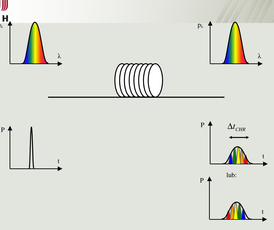
Optical Specifications

Bandwidth	High Performance EMB* (MHz.km)	Legacy Performance EMB** (MHz.km)	
Corning Optical Fiber	850 nm only	850 nm	1300 nm
ClearCurve® OM4 fiber	4700	3500	500
ClearCurve® OM3 fiber	2000	1500	500
ClearCurve® OM2 fiber	950	700	500

*Ensured via mini EMBc, per TIA/EIA 455-220A and IEC 60793-1-49, for high performance laser-based systems (up to 300 Gb/s).
**OFL BW, per TIA/EIA 455-204 and IEC 60793-1-41, for legacy and LED-based systems (typically up to 600 Mb/s).

Uwaga! Światłowód wielomodowy ma też dyspersję chromatyczną!!!

Dyspersja chromatyczna



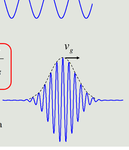
Dyspersja chromatyczna materiałowa – podst. zależności

$E(z) = E_0 \sin(\omega t - \beta z)$ — stała propagacji

$\frac{1}{v_f} = \frac{\beta}{\omega}$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n$ (1), $\lambda = \frac{2\pi}{\omega} c$ (2)

uwzgl. (1) i (2): $v_f = \frac{c}{n}$

$\frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}$; uwzgl. (1) i (2): $v_g = \frac{c}{n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}} = \frac{c}{n_g}$



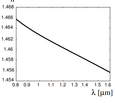
zatem interesuje nas n_g - **grupowy** wsp. załamania

Dyspersja chromatyczna materiałowa

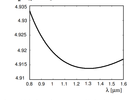
opóźnienie grupowe $t_g = \frac{z}{v_g} = \frac{zn_g}{c}$

dyspersja op. grupowego $\Delta t_g = \frac{dt_g}{d\lambda}\Delta\lambda = z\frac{d\left(\frac{t_g}{z}\right)}{d\lambda}\Delta\lambda$

$$\Delta t_g = zD_{MAT}\Delta\lambda$$

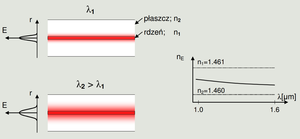


Zależność współczynnika załamania od długości fali dla SiO_2



Zależność jednostkowego opóźnienia grupowego od długości fali dla SiO_2

Dyspersja chromatyczna falowodowa



$$n_g = n_2 + b(\lambda)(n_1 - n_2)$$

Dyspersja falowodowa występuje praktycznie tylko w światłowodach jednomodowych (dlaczego?)

Całkowita dyspersja chromatyczna w światłowodzie

$t_g = \frac{z}{v_g} = \frac{zn_g}{c} \longrightarrow t_g = \frac{z}{v_g} = \frac{zn_{Eg}}{c}$

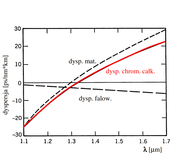
$n_g = n - \lambda\frac{dn}{d\lambda} \longrightarrow n_{Eg} = n_E - \lambda\frac{dn_E}{d\lambda}$

⋮

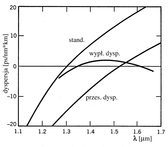
$$D_{CHR} = D_{MAT} + D_{FAL}$$

$$\Delta t_{CHR} = zD_{CHR}\Delta\lambda$$

D_{CHR} wyrażamy w $\left[\frac{ps}{nm \cdot km}\right]$



Zależność wsp. dyspersji chromatycznej od długości fali w standardowym światłowodzie jednomodowym (ITU G.652)



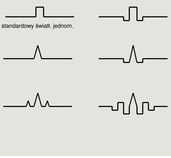
Przykłady światłowodów o modyfikowanej dyspersji

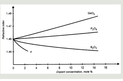
Po co modyfikujemy dyspersję?

Jak modyfikujemy dyspersję?

Jak modyfikujemy dyspersję?

...poprzez „inżynierię" profilu współczynnika załamania





Pytania:

- jak będzie wyglądać „rozmycie" impulsów, gdy źródłem sygnału będzie laser wielomodowy FP?

- czy stosując idealnie monochromatyczny laser spodziewamy się rozmycia przesyłanych impulsów?

$$\Delta t_{CHR} = zD_{CHR}\Delta\lambda$$

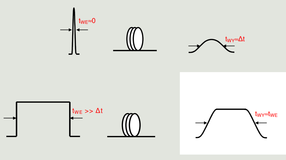
Wpływ dyspersji na transmitowane impulsy

łączny wpływ dyspersji międzymodowej i chromatycznej: $\Delta t \approx \sqrt{\Delta t_{MOD}^2 + \Delta t_{CHR}^2}$

poszerzenie transmitowanych impulsów: $t_{WY} \approx \sqrt{t_{WE}^2 + \Delta t^2}$

pasmo modulacyjne światłowodu: $B_{3dB} \approx \frac{0,44}{\Delta t}$ $\quad B_{1,5dB} \approx \frac{0,31}{\Delta t}$

Wpływ dyspersji na transmitowane impulsy



Co trzeba będzie dopowiedzieć?

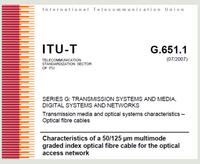
- dyspersja polaryzacyjna (PMD)
- zjawiska nieliniowe w światłowodach
- wzmacniacze światłowodowe
- światłowody „specjalne"

Standaryzacja światłowodów – rekomendacje ITU

- rekomendacje nie są normami, do których producent musi się stosować; chodzi o to, by światłowody zgodne z daną rekomendacją mogły być stosowane zamiennie, a także skutecznie łączone (spawane)

- określają parametry użytkowe w (pozornym) oderwaniu od technologii

- są rozwijane w miarę postępu technologii i aplikacji



Rekomendacje dla standardowego światłowodu jednomodowego G.652

Współistnieją cztery warianty (kategorie); G.652.A ... G.652.D

G.652.A:

Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6÷9.5 μm
	Tolerance	±0.6 μm
Cladding diameter	Nominal	125.0 μm
	Tolerance	±1 μm
Core concentricity error	Maximum	0.6 μm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%

Dlaczego nie ma określenia średnicy rdzenia?!

G.652.A, c.d.:

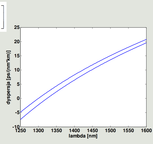
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa

Jak „działa" ten światłowód dla 1200 nm?

G.652.A, c.d.:

Chromatic dispersion coefficient	λ_{0min}	1300 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0max}	0.092 ps/nm^2 × km

$$\frac{\lambda S_{0max}}{4}\left[1-\left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda}\right)^4\right] \le D(\lambda) \le \frac{\lambda S_{0max}}{4}\left[1-\left(\frac{\lambda_{0min}}{\lambda}\right)^4\right]$$



G.652.A, c.d.:

Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum at 1310 nm	0.5 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient (Note 2)	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMD_Q	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Dane producenta (Corning):

Optical Specifications

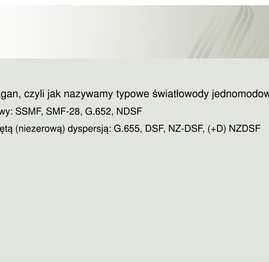
Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

Fragment G.652.D:

Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm ±3 nm (Note 3)	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km



Inne istotne rekomendacje:

- G.655; światłowód jednomodowy z niezerową, przesuniętą dyspersją (NZ-DSF)
- G.657; światłowód jednomodowy „bend insensitive"

Table 1: G.657 Single Mode optical fibre specifications

G.657 A (G.652 compliant) — **A1 fibre** — **10 mm bending radius**; **A2 fibre** — **7.5 mm bending radius**

G.657 B (not G.652 compliant) — **B2 fibre** — **7.5 mm bending radius**; **B3 fibre** — **5 mm bending radius**

	Specified loss in dB for 1 turn at 1550 nm for radius			
Bending Radius	15 mm	10 mm	7.5 mm	5 mm
G.657A1	<0.025	<0.75	-	-
G.657A2 / B2	-	<0.1	<0.5	-
G.657B3	-	<0.03	<0.08	<0.15

Jak można zrobić światłowód *bend insensitive*?

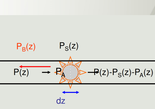
AGH

Wielki bałagan, czyli jak nazywamy typowe światłowody jednomodowe

- standardowy: SSMF, SMF-28, G.652, NDSF
- z przesuniętą (niezerową) dyspersją: G.655, DSF, NZ-DSF, (+D) NZDSF

AGH

Dodatek: Reflektometr optyczny OTDR

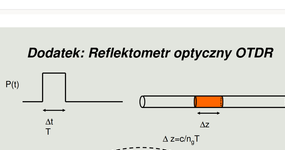


$$P_A \sim P; \quad P_S \sim P$$

$$dP_A(z) = -\alpha_A P(z)dz \qquad \alpha = \alpha_A + \alpha_S$$
$$dP_S(z) = -\alpha_S P(z)dz \qquad dP(z) = -\alpha P(z)dz$$

AGH

Dodatek: Reflektometr optyczny OTDR

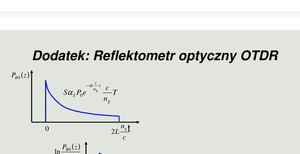


$$dP(z) = -\alpha P(z)dz \;\Rightarrow\; P(z) = P_0 e^{-\alpha z}$$

$$P_B(z) = SP(z)\Delta z = S\alpha_S P(z)\Delta z = S\alpha_S P_0 e^{-\alpha z}\Delta z$$

$$P_{B0}(z) = S\alpha_S P_0 e^{-\alpha z}\Delta z \cdot e^{-\alpha z} = S\alpha_S P_0 e^{-2\alpha z}\Delta z$$

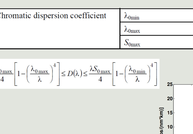
Dodatek: Reflektometr optyczny OTDR

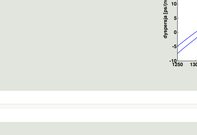


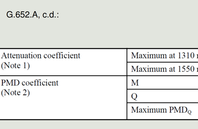
$$P_{B0}(z) = S\alpha_S P_0 e^{-2\alpha z} \xrightarrow{\frac{c}{n_g}} T$$

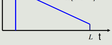
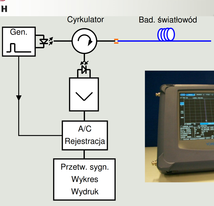
$$t = 2\frac{c}{n_g}z$$

Dodatek: Reflektometr optyczny OTDR









Dodatek: Reflektometr optyczny OTDR