

Disperzija v vlaknu

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1}$$

$$\tau_g = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$$

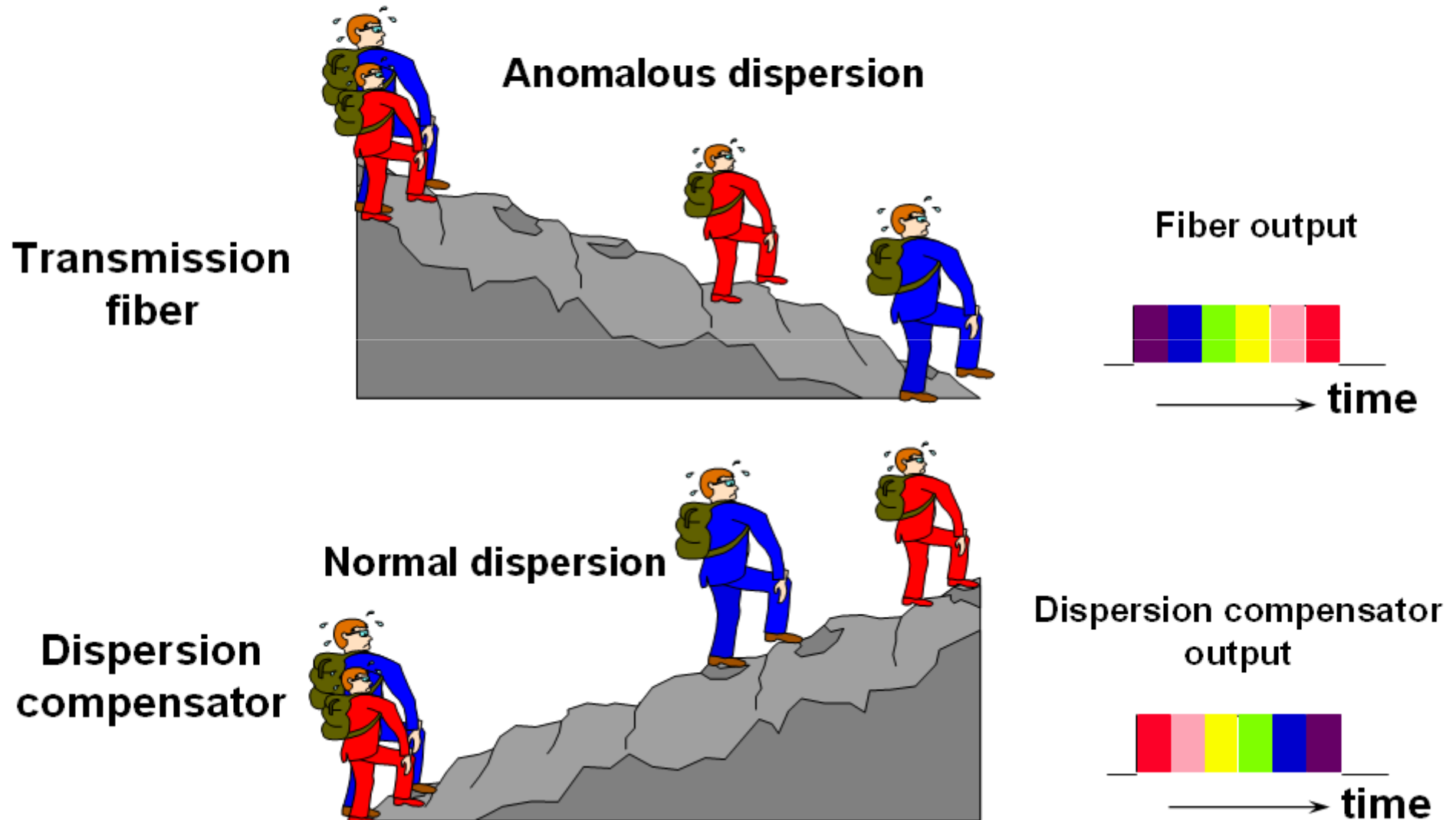
$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

Mobitel d.d.,
izobraževanje

2. 4. 2010,
predavanje 5

Prof. dr. Jožko
Budin

Dispersion Compensation I



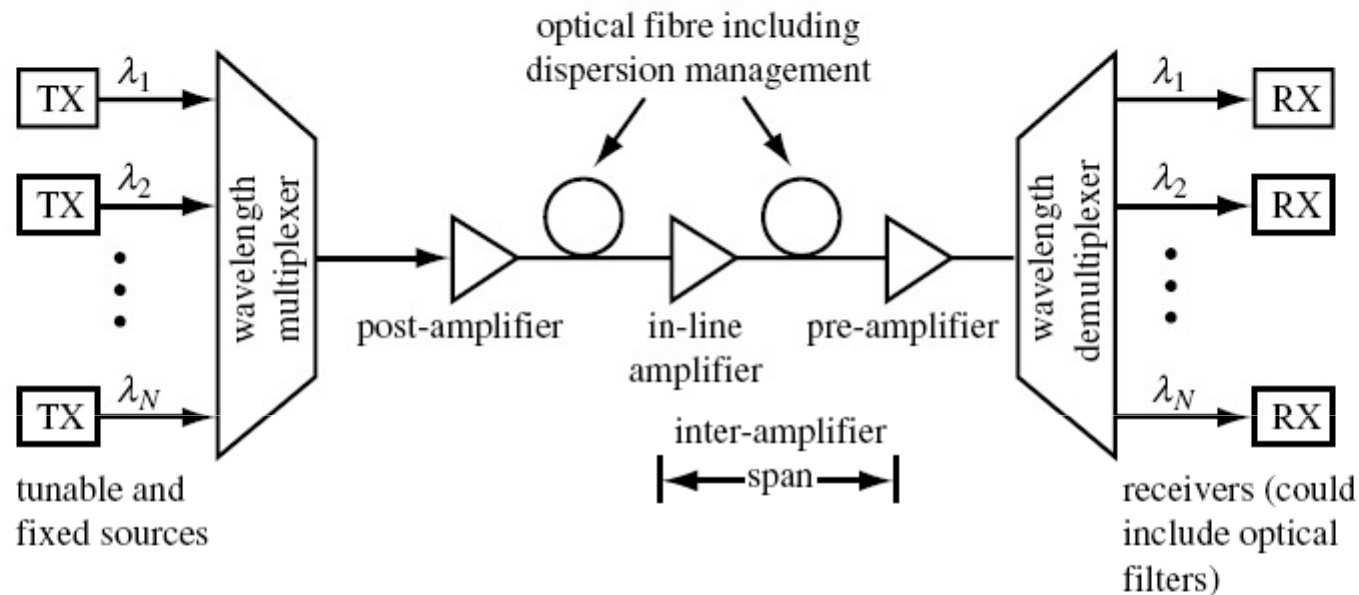
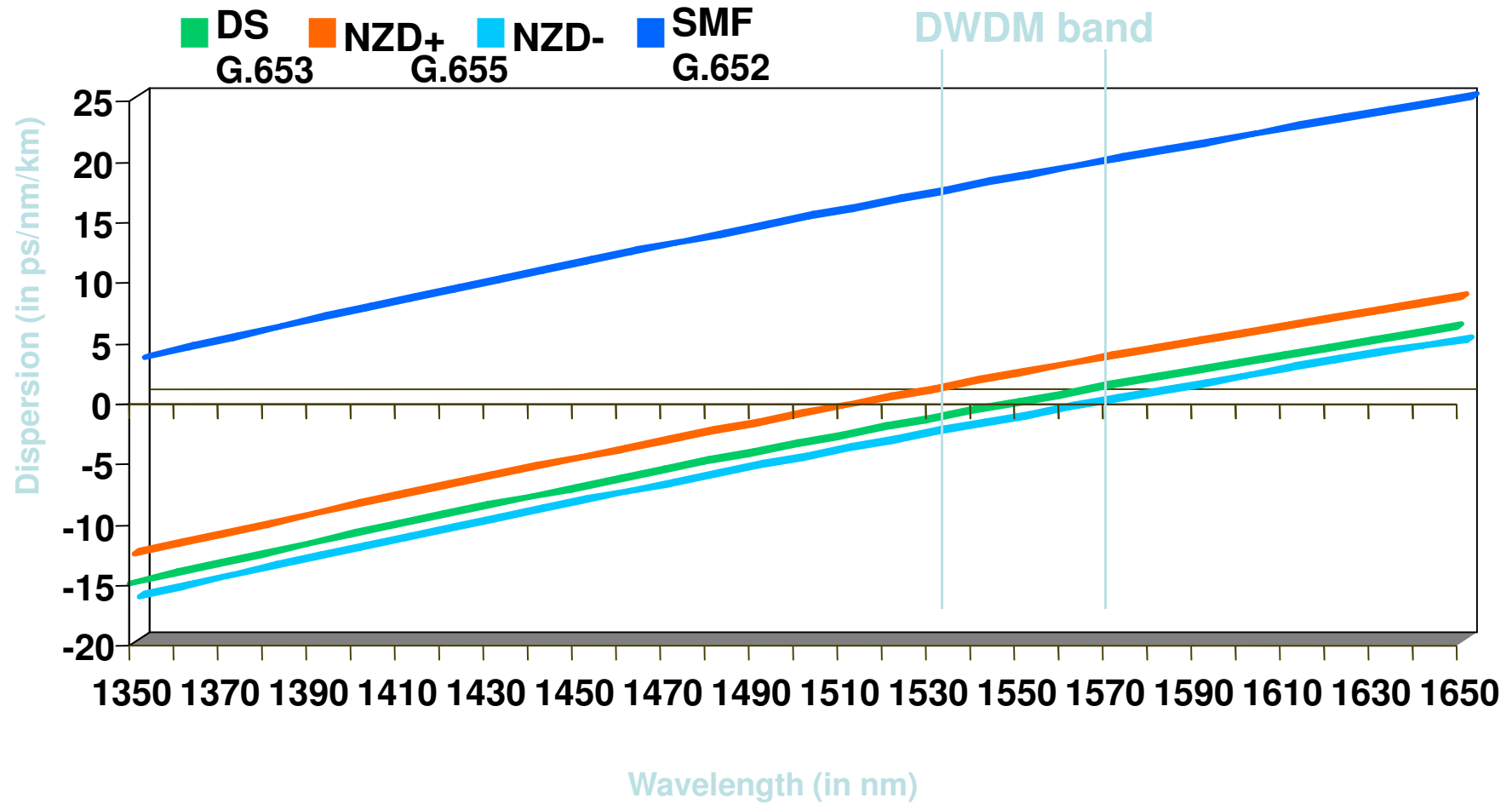


Figure 4. Key building blocks of a WDM transmission system using all-optical amplifiers, and N different wavelength channels (TX denotes transmitter; RX denotes receiver).

3. Evolution of WDM ideas: from concept to reality

As mentioned before, the concepts of WDM were first proposed by analogy with an 'optical ether', or frequency division multiplexing, over 15 years ago (Hill 1988), the ideas explored by this approach languished for many years, until the early 1990s. The enormous growth in demand for high-capacity links over substantial distances of several thousand kilometres resulted in a rapid exhaustion of the installed optical-fibre networks. Since optical-fibre cable installation is so time consuming and expen-

Dispersion Slopes



Ponovitev:

Predavanje 4

Slabljenje v optičnem
vlaknu

ITU-T standardizacija optičnega vlakna

- G.651 Mnogorodovno optično vlakno (MMF)
- G.652 Standardno enorodovno optično vlakno (SSMF)
- G.653 Enorodovno vlakno nične disperzije na 1550nm
- G.654 Enorodovno vlakno s premaknjeno mejno λ_c
- G.655 Enorodovno vlakno nenične disperzije na 1550 nm
- G.656 Enorodovno vlakno nenične disperzije na 1550 nm za širokopasovne transportne sisteme
- G.657 Enorodovno optično vlakno neobčutljivo na krivine za notranje instalacije.

Slabljenje v kremenovem vlaknu

7

1. Trije osnovni pojavi slabljenja v steklu SiO_2 s primesmi:

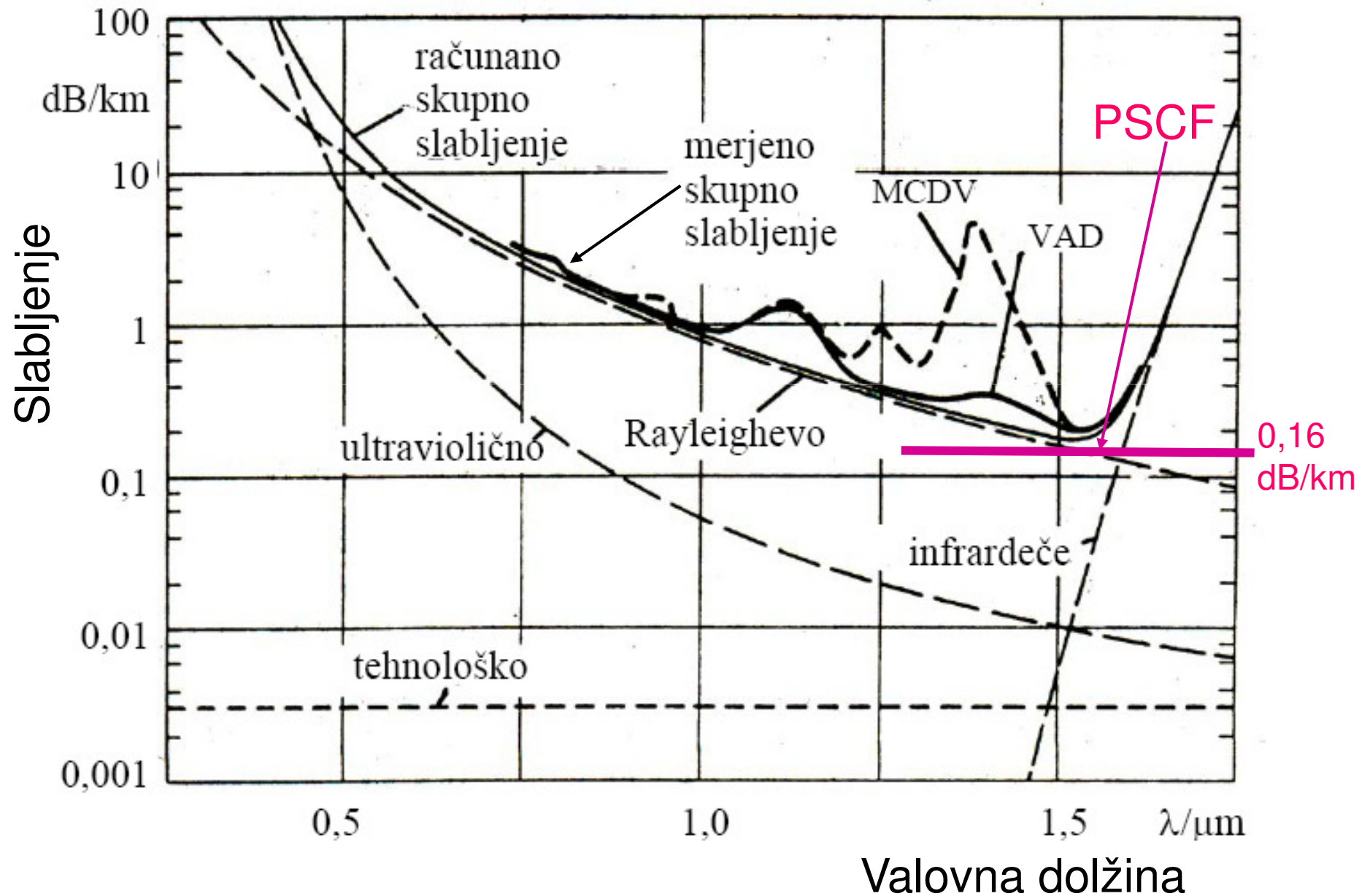
- **Rayleighovo razpršilno slabljenje** (linearna razpršitev svetlobe na drobnih nehomogenostih stekla) je prevladujoče slabljenje v področju valovnih dolžin $0,5 - 1,7 \mu\text{m}$. Rayleighovo slabljenje je izrazito odvisno od (četrte potence) λ . Minimalna vrednost slabljenja pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$ v steklu SiO_2 brez primesi je $0,13 \text{ dB/km}$. Primesi v vlaknu dvigujejo vrednost razpršilnega slabljenja.
- **Infrardeče slabljenje** (absorpcija svetlobe zaradi interakcije foton - fonon) je prevladujoče slabljenje pri valovnih dolžinah nad $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$. Omejuje spekter optičnih komunikacij pri daljših valovnih dolžinah.
- **Ultravijolično slabljenje** (absorpcija svetlobe zaradi interakcije foton - elektron) je prevladujoče slabljenje pri valovnih dolžinah pod $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. V infrardečem delu spektra ni pomembno.

2. Drugi pojavi slabljenja vlakna:

- slabljenje ionov OH pri $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$
- slabljenje na krivinah vlakna in
- slabljenje na mikrokrivinah vlakna

so posledica tehnoloških pomanjkljivosti in je nanje mogoče vplivati.

Spekter sestavin slabljenja



Karakteristike prenosnega vlakna

- **Efektivna dolžina (effective length):**

$$L_{ef} \text{ (km)} = \int_0^L e^{-\alpha l} dl = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} = \frac{4,343}{\alpha \text{ (dB/km)}}$$

$$L_{ef} \doteq 20 \text{ km}$$

kjer je α koeficient slabljenja vlakna.

- **Efektivna površina (effective area):**

$$A_{ef} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = 2\pi \frac{\left(\int_A |E|^2 r dr \right)^2}{\int_A |E|^4 r dr}$$

$$A_{ef} = 60 - 80 \mu\text{m}^2$$

kjer je $E(r)$ porazdelitev polja po prečnem prerezu vlakna.

- **Nelinearni koeficient (non - linear coefficient):**

$$\gamma \text{ (W}^{-1}\text{km}^{-1}\text{)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{ef}}$$

$$\gamma \doteq 2,7 \text{ (Wkm)}^{-1}$$

kjer je n_2 Kerrov koeficient nelinearne refrakcije.

- **Ojačevalni koeficient stimuliranega sipanja** - gain coefficient of stimulated (Raman, Brillouin) scattering:

$$g \text{ (mW}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ef}}{P_s P_c} \frac{dP_s}{dz}$$

$$g_R \doteq 10^{-13} \text{ m/W}$$

$$g_R \doteq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$$

kjer je P_s moč signala in P_c moč črpalke.

ENORODOVNO VLAKNO - pasovi in standardizacija ¹⁰

- Valovni pasovi in spekter slabljenja:

O (1260 - 1360 nm)

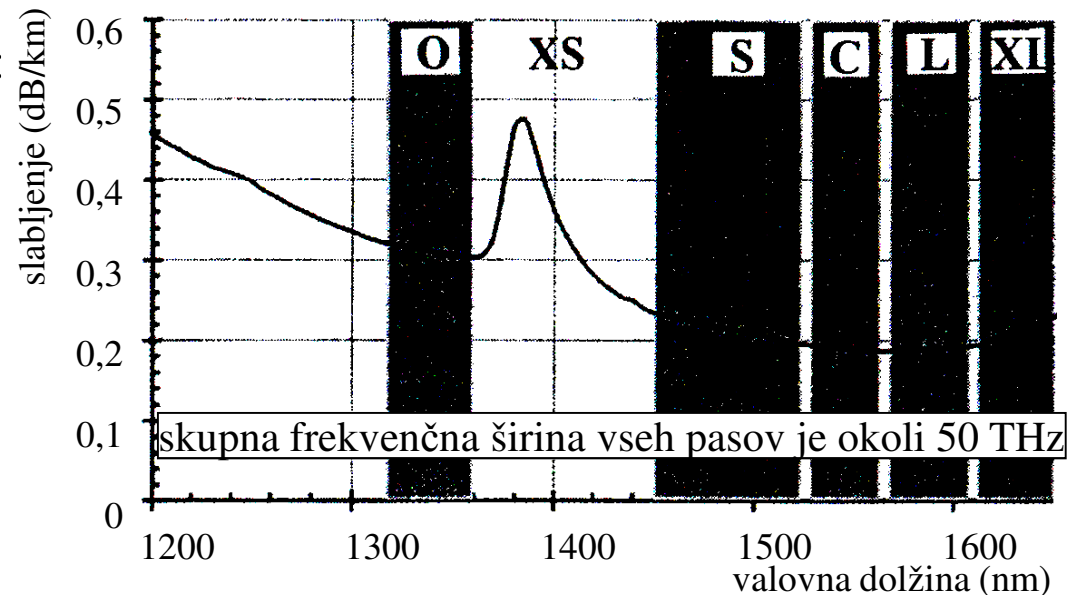
XS (1360 - 1460 nm)

S (1460 - 1530 nm)

C (1530 - 1565 nm)

L (1565 - 1625 nm)

XL (1625 - 1675 nm)



- Standardizacija:

- **G.652 - Standardno enorodovno vlakno (SSMF).** Podatki pri $\lambda = 1550$ nm:

- SSMF (D = 17 S = 0,057 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 80$)

- **G.655 - Disperzijsko premaknjeno enorodovno vlakno nenične (pozitivne ali negativne) disperzije (NZDSF).** Podatki pri $\lambda = 1550$ nm:

- Tera Light (D = 8 S = 0,058 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 65$)

- True Wave - RS (D = 4,2 S = 0,045 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 55$)

- Pure Guide (D = 8 S = 0,06 $\alpha = 0,15$ $A_{ef} = 65$)

- LEAF (D = 4,2 S = 0,085 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 72$)

- All Wave (vlakno očiščeno OH ionov)

Enote: D(ps/nm/km), S(ps/nm²/km), α (dB/km), A_{ef} (μm^2) pri $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Vrste slabljenja v optičnem vlaknu ¹¹

1. Razpršilno slabljenje

- Interakcija svetlobe s snovno podvalovno nehomogenostjo (Rayleigh)

2. Absorpcijsko slabljenje

- infrardeče (IR) – interakcija s fononi
- ultravijolično (UV) – interakcija z elektroni

3. Slabljenje na krivinah

- slabljenje na makrokrivinah (upognitev)
- slabljenje na mikrokrivinah

4. Slabljenje na ionih OH (je odpravljivo)

5. Slabljenje na primeseh in nečistočah

6. Slabljenje zaradi strukturnih nepravilnosti

Slabljenje vlakna - primerjava

enorodovno **mnogorodovno**

Valovna dolžina	SMF28	62.5/125
850 nm	1.8 dB/km	2.72 dB/km
1300 nm	0.35 dB/km	0.52 dB/km
1380 nm	0.50 dB/km	0.92 dB/km
1550 nm	0.19 dB/km	0.29 dB/km

Praktične vrednosti slabljenja konektorjev, spojev in vlaken

	Tipična vrednost slabljenja	Največja vrednost slabljenja
Konektor, minimalno	0.1 – 0.2 dB	0.75 dB
Konektor, maksimalno	0.3 – 1.0 dB	1.0+ dB
Varjeni spoj	0.05 dB	0.3 dB
Mehanski spoj	0.1 dB	
G.652 @ 1310nm	0,35 dB/km	
G.652 @ 1550nm	0,2 dB/km	
G.655 @ 1310nm	0,35 dB/km	
G.655 @ 1550nm	0.2 dB/km	

Disperzija v vlaknu

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1}$$

$$\tau_g = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$$

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

Mobitel d.d.,
izobraževanje

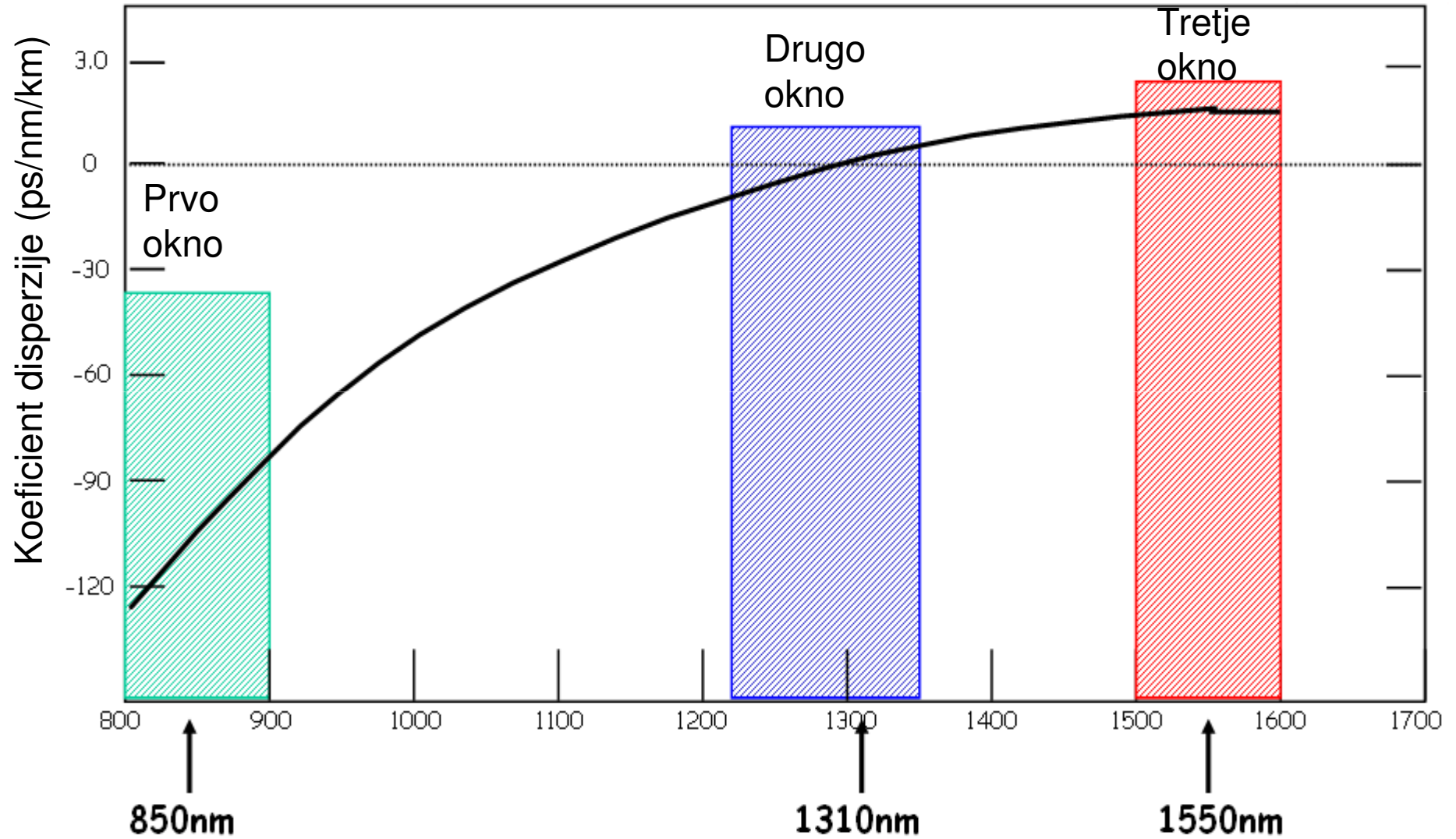
2. 4. 2010,
predavanje 5

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Fazna in skupinska hitrost valovanja
2. Skupinska zakasnitev in skupinska razpršitev
3. Inter- in intra-rodovna disperzija
4. Disperzija v enorodovnem vlaknu
5. Glavni disperzijski pojavi:
 - 5.1 Kromatska disperzija:
 - snovna disperzija
 - valovodna disperzija
 - 5.2 Nekromatska disperzija:
 - polarizacijska (rodovna) disperzija
6. Vlakna nenične disperzije in znižane disperzijske strmine
7. Vlakna za posebne disperzijske karakteristike

Prenosna okna



Definicije

Temeljne definicije pri širjenju valov v disperznem mediju:

- Skupinska (grupna) hitrost širjenja (m/s):
- Skupinski zakasnilni čas na dolžini poti 1 m (s):
- Koeficient disperzije (ps/nm/km):

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1}$$

$$\tau_g = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$$

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

Definicija disperzije

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda}$$

D koeficient disperzije
(ps/nm/km)

τ_g skupinski zakasnilni čas
(ps)

λ valovna dolžina (nm)

Disperzija je razpršitev skupinskega zakasnilnega časa:

1. Mnogorodovna disperzija:

Različni rodovi valovanja se širijo z različno skupinsko hitrostjo

2. Enorodovna (barvna) disperzija:

- Snovna disperzija. Skupinska hitrost je odvisna od snovi.
- Valovodna disperzija. Sk. hitrost je odvisna od načina širjenja.

3. Polarizacijska (ali polarizacijska rodovna) disperzija.

Hitrost je odvisna od polarizacije (dvolomnost).

Fazna in skupinska hitrost

1. Fazna hitrost v_f :

- Hitrost širjenja faze
- Hitrost širjenja nosilnika

2. Skupinska hitrost v_s oz. v_g :

- Hitrost širjenja modulacijske ovojnice (impulza)
- Hitrost širjenja informacije
- Hitrost širjenja energije

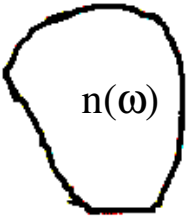
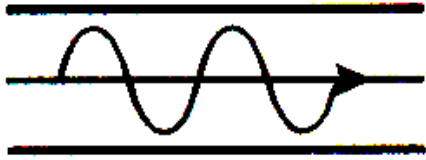
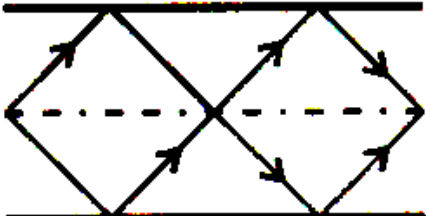
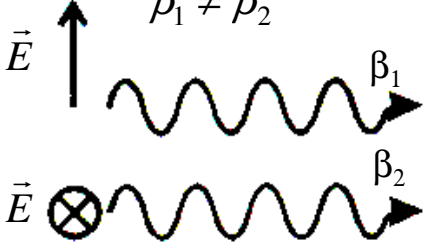
3. Smer širjenja:

- Fazna in skupinska hitrost v enaki smeri
- Fazna in skupinska hitrost v nasprotni smeri (povratni val), periodične strukture, metamateriali.

Disperzija (razpršitev) skupinske hitrosti svetlobe

Disperzija je razpršitev skupinske hitrosti kot posledica odvisnosti skupinske hitrosti od valovne dolžine oz. frekvence, načina širjenja ter polarizacije svetlobe. Nastaja:

- **v neomejeni disperzni snovi**, lomni količnik katere je odvisen od valovne dolžine (snovna disperzija)
- **v omejenem prostoru**, ki je omejen s totalnim odbojem na plastni ali periodični nehomogenosti snovi (valovodna disperzija). Razlikujemo enorodovni in mnogorodovni način razširjanja (valovodna rodovna in mnogorodovna disperzija)
- **v dvolomni snovi** z različnimi polarizacijskimi parametri se ortogonalna valova širita z različno skupinsko hitrostjo (polarizacijska rodovna disperzija).

kromatska se povečuje z večanjem širine spektra		nekromatska ni odvisna od širine spektra	
<p>Snovna</p>  <p>$n(\omega)$</p> <p>n je odvisen od frekvence</p>	<p>Valovodna (rodovna)</p> $\beta(\omega) = \frac{\omega n_e}{c} \neq k = \frac{\omega n}{c}$  <p>β je nelinearno odvisen od frekvence</p>	<p>Večžarkovna (mnogorodovna)</p> $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots$  <p>β je različen za različne žarke (rodove)</p>	<p>Polarizacijska rodovna (dvolomnost)</p> $\beta_1 \neq \beta_2$  <p>β je odvisen od polarizacije</p>

Signali in spektri



$$f(t) = \int_{\omega_c - \Delta\omega}^{\omega_c + \Delta\omega} \tilde{f}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad g(t) = \int_{\omega_c - \Delta\omega}^{\omega_c + \Delta\omega} \tilde{f}(\omega) e^{j\omega t - j\beta(\omega)l} d\omega$$

If $\Delta\omega \ll \omega_c$

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_c) + \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_c} (\omega - \omega_c) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_c} (\omega - \omega_c)^2 + \dots$$

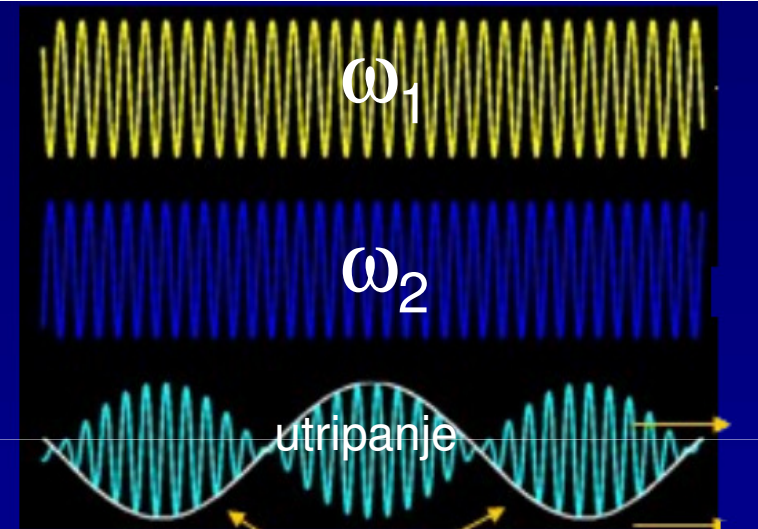
Fazna in skupinska hitrost – primer dvofrekvenčnega signala

$$E = E_0 [\cos(k_1 z - \omega_1 t) + \cos(k_2 z - \omega_2 t)]$$

$$= \underbrace{\{2E_0 \cos(\Delta k z - \Delta \omega t)\}}_{\text{Amplitudna ovojnica}} \cos(k z - \omega t)$$

Amplitudna ovojnica

faza



Skupinska hitrost:

$$v_g = \frac{\Delta \omega}{\Delta k}$$

$$\Delta \omega = (\omega_1 - \omega_2)/2, \Delta k = (k_1 - k_2)/2$$

$$v_g = \frac{c}{n}$$

Fazna hitrost:

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$$

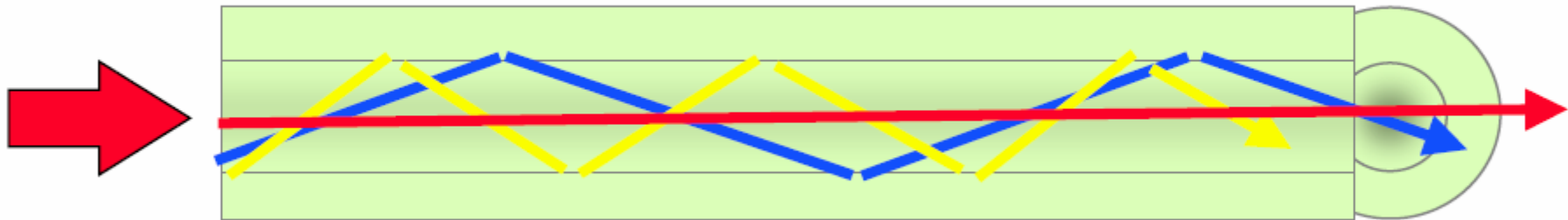
$$\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2,$$

$$k = (k_1 + k_2)/2, k_i = \frac{n \omega_i}{c}, i = 1, 2$$

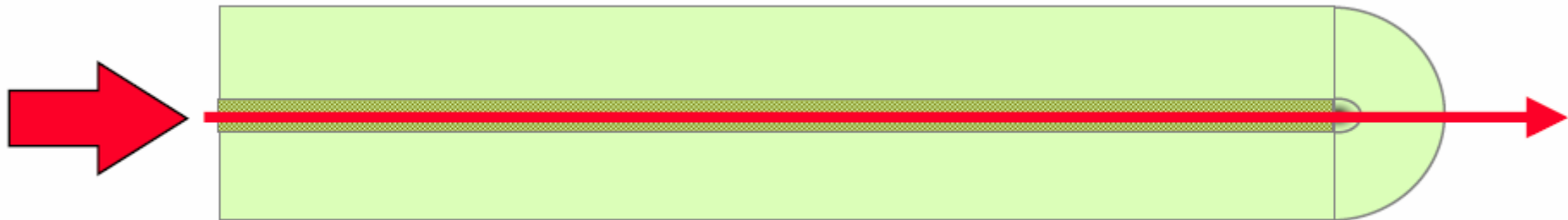
paket

Mnogorodovna in enorodovna disperzija

Mnogorodovno vlakno:



Enorodovno vlakno:

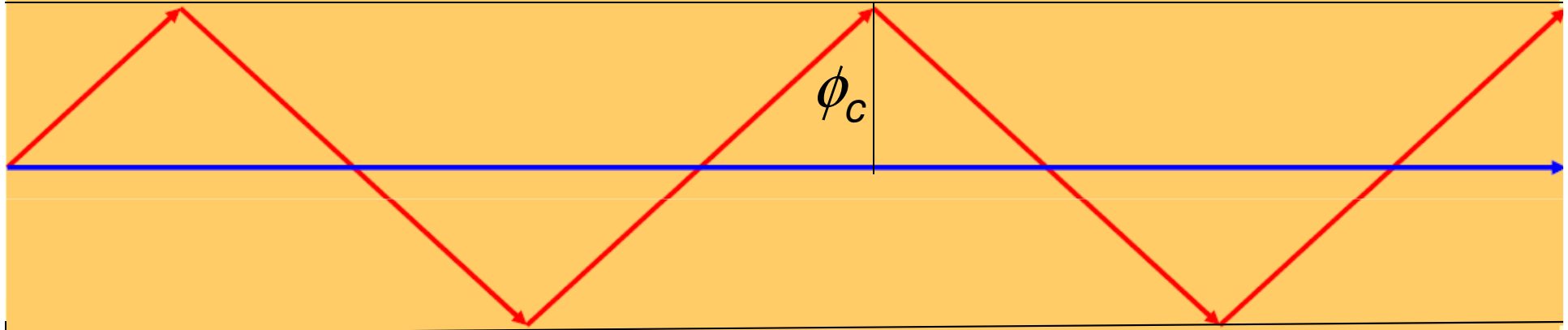


- Žarki, ki izpolnjujejo pogoj totalnega odboja, so v vlaknu ujeti in se širijo po cik-cak trajektoriji. Velja za mnogorodovno in enorodovno vlakno.
- V enorodovnem vlaknu so žarki toliko položni, da jih lahko v približku rišemo kot osni žarek.

Medrodovna (intermode) zakasnitev

- najkrajša pot $L_{\min} = L$ vzdolž osi vlakna dolžine L
- najdaljša pot L_{\max} žarka pod kritičnim kotom totalnega odboja

$$L_{\max} = L / \sin \phi_c = L (n_2 / n_1)$$



- Razširitev impulza:

$$\Delta T = (L_{\max} - L_{\min})(n_1/c)$$

- Medrodovna zakasnitev:

$$\Delta T / L = n_1^2 \Delta / (n_2 c)$$

- Omejitev z bitno hitrostjo:

$$\Delta T < T_B = 1/B; \quad B \Delta T < 1; \quad BL < \frac{n_2 c}{n_1^2 \Delta}$$

Primerjava kromatske in nekromatske disperzije

kromatska (barvna) disperzija

Kromatska (barvna) disperzija:

- snovna disperzija
- valovodna disperzija
- disperzija lomnega lika

odvisna od spektralne širine vira

nekromatska disperzija

Nekromatska disperzija:

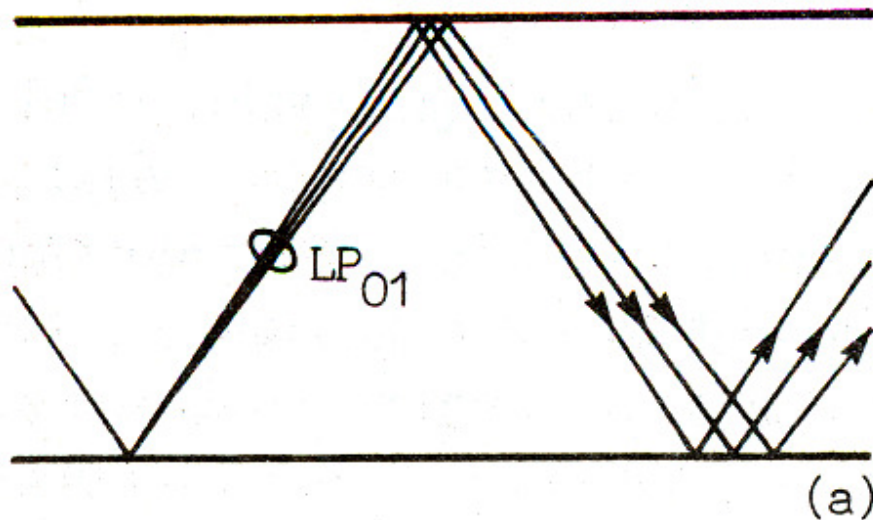
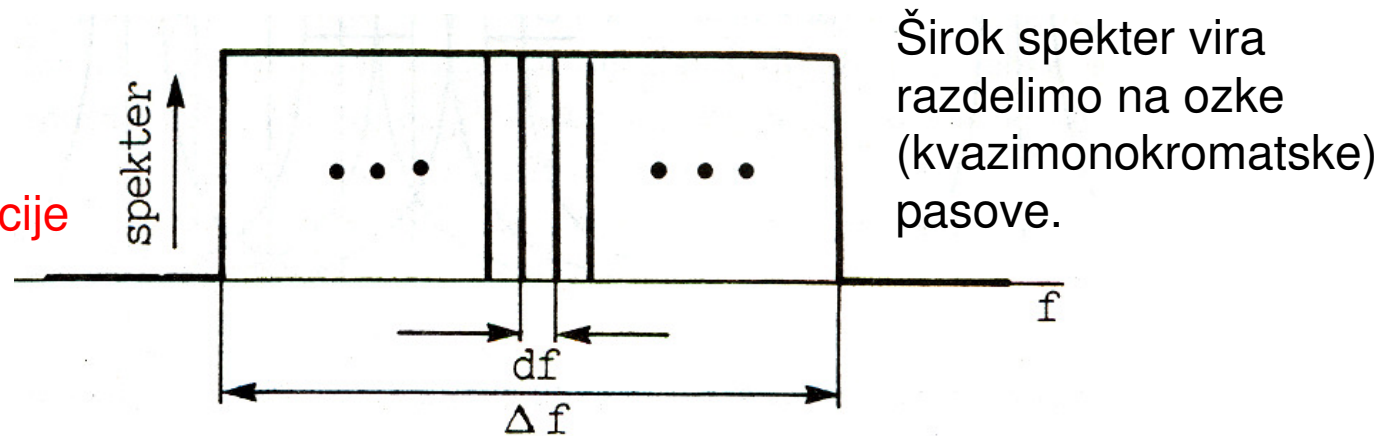
- mnogorodovna disperzija
- polarizacijska disperzija

neodvisna od spektralne širine vira

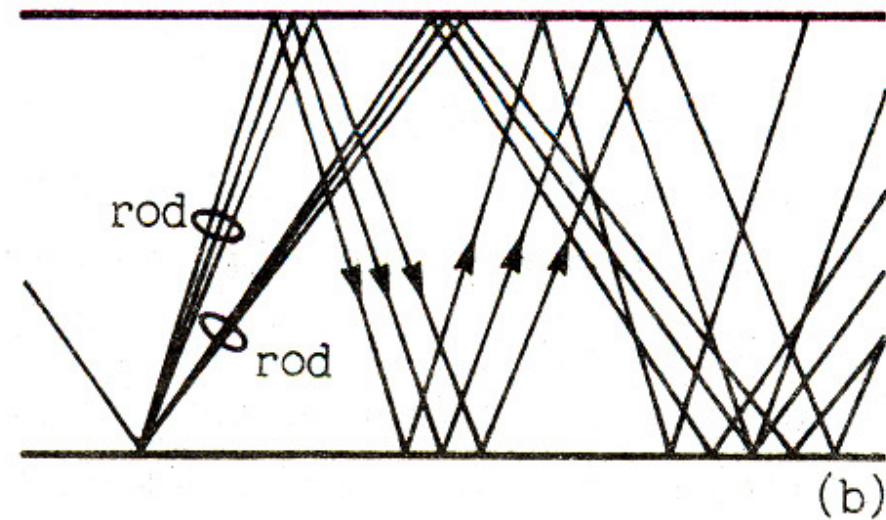
(Inter- in intra-) rodovna disperzija

Spekter:

- spekter vira
- spekter modulacije

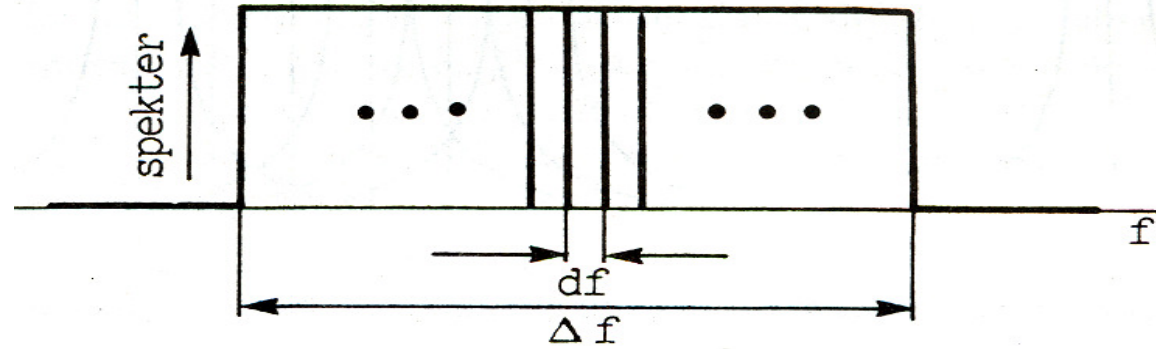


Intrarodovna disperzija

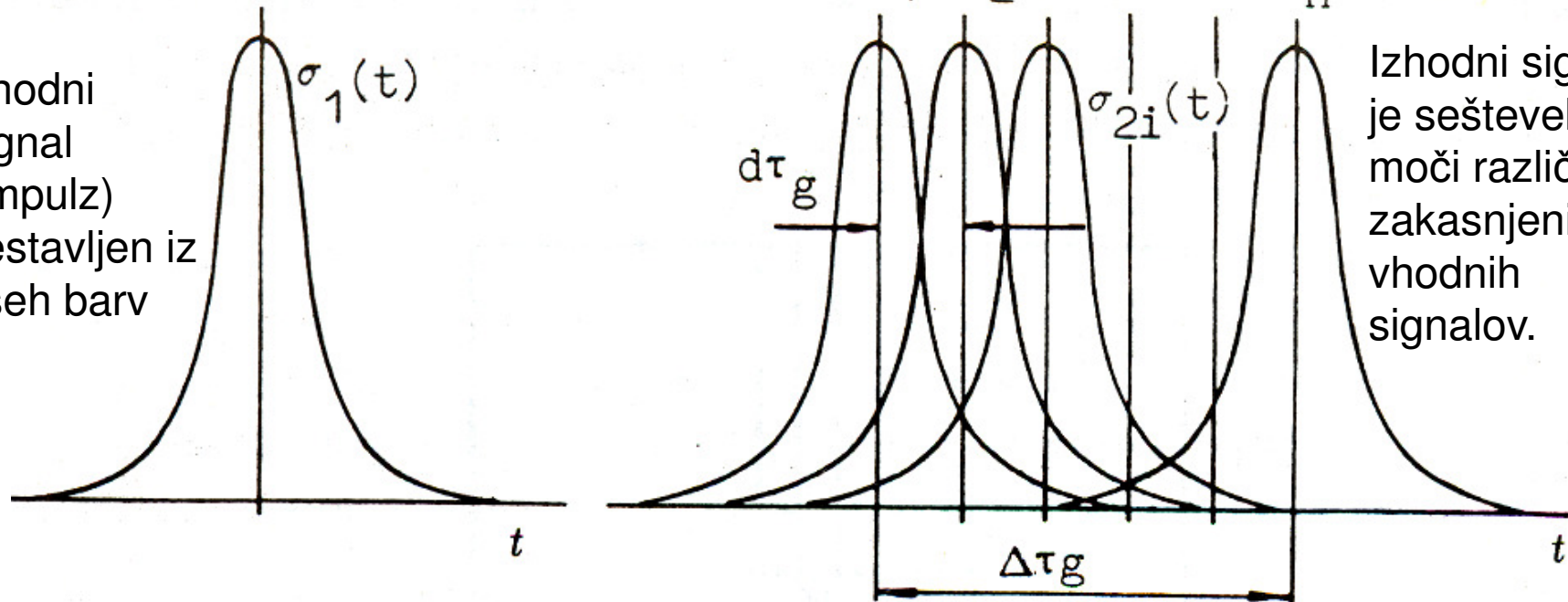


Inter- in intrarodovna disperzija

Spekter in signal



Vhodni signal (impulz) sestavljen iz vseh barv



Izhodni signal je seštevek moči različno zakasnenih vhodnih signalov.

Zakasnitev in razpršitev zakasnitve

Skupinska zakasnitev:

$$\frac{\tau_g}{L} = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda}$$

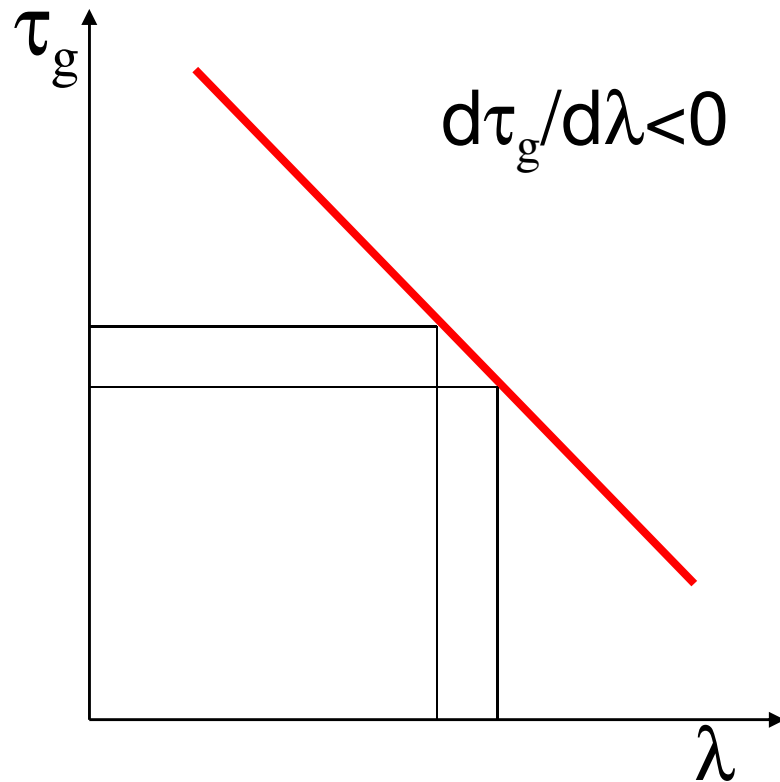
Razpršitev skupinske zakasnitve:

$$\begin{aligned} \delta\tau &= \left| \frac{d\tau_g}{d\lambda} \right| \delta\lambda = -\frac{L}{2\pi c} \left(2\lambda \frac{d\beta}{d\lambda} + \lambda^2 \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} \right) \delta\lambda \\ &= \left| \frac{d\tau}{d\omega} \right| \delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{V_g} \right) \delta\omega = L \left(\frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right) \delta\omega \quad \text{Drugi odvod} \end{aligned}$$

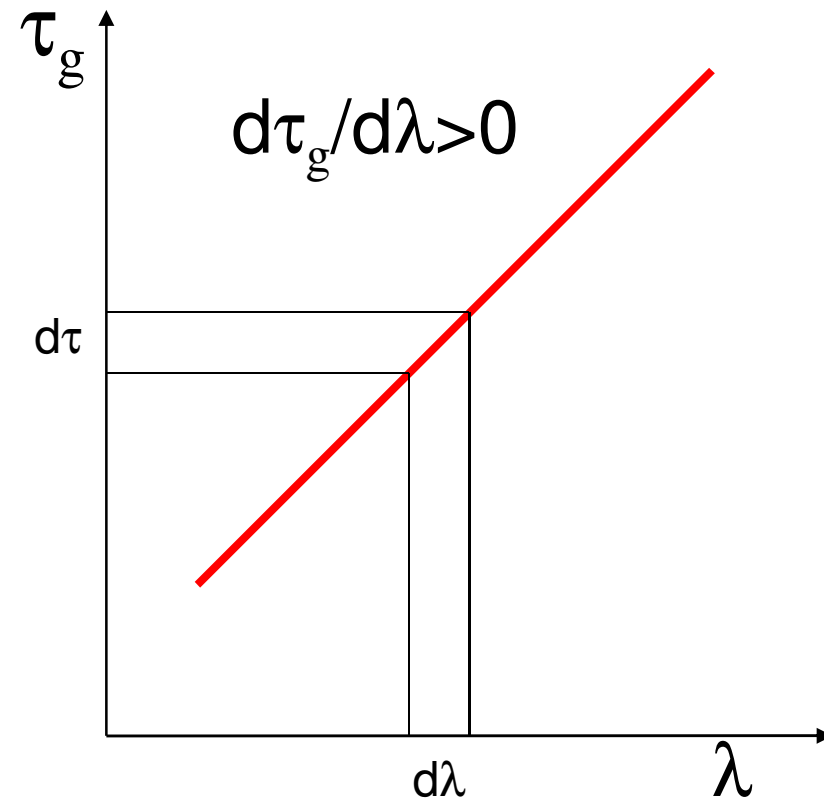
Normalna in anomalna disperzija

Normalna disperzija $D < 0$

Anomalna disperzija $D > 0$

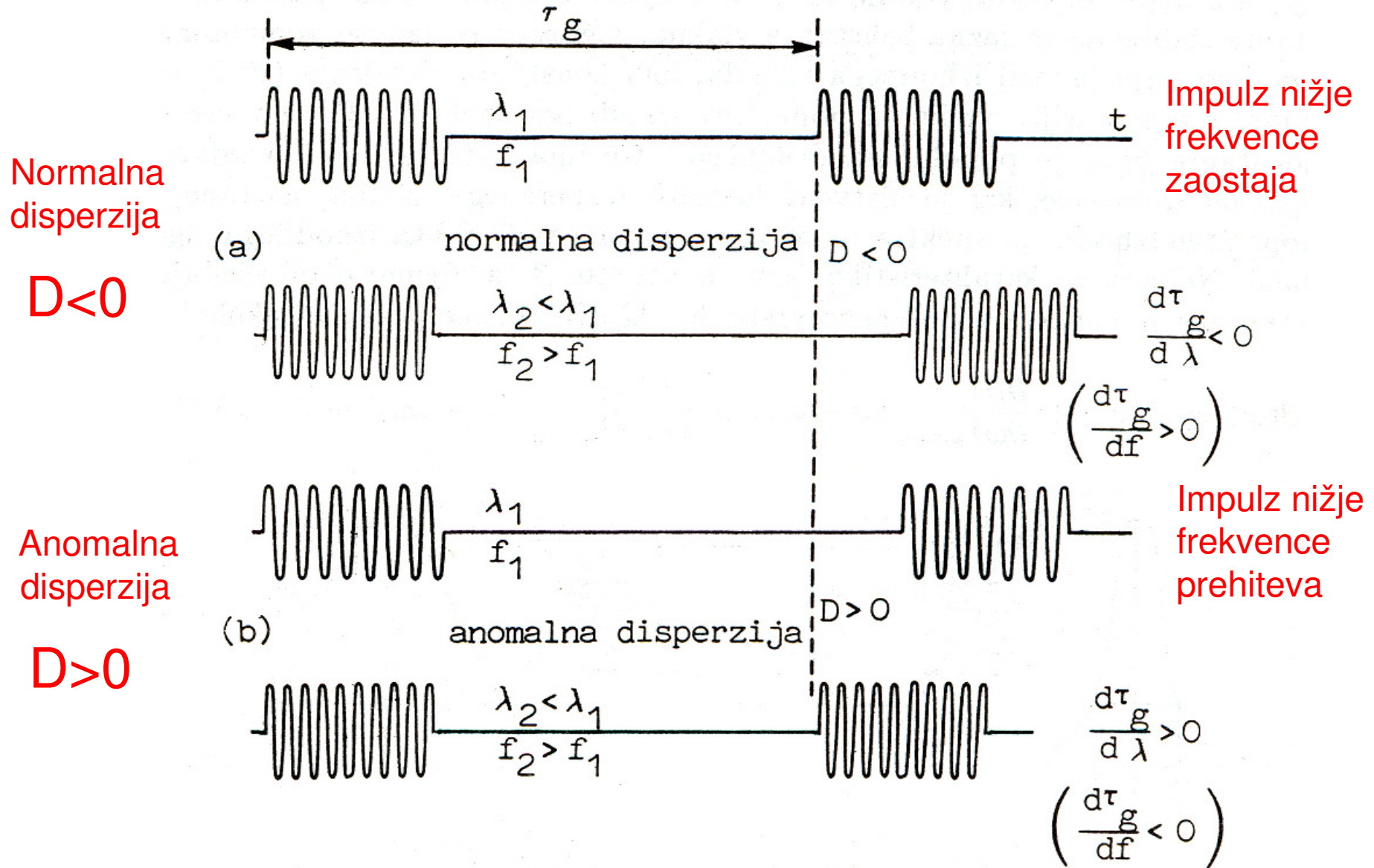


Pri krajših valovnih dolžinah je zakasnitev manjša.

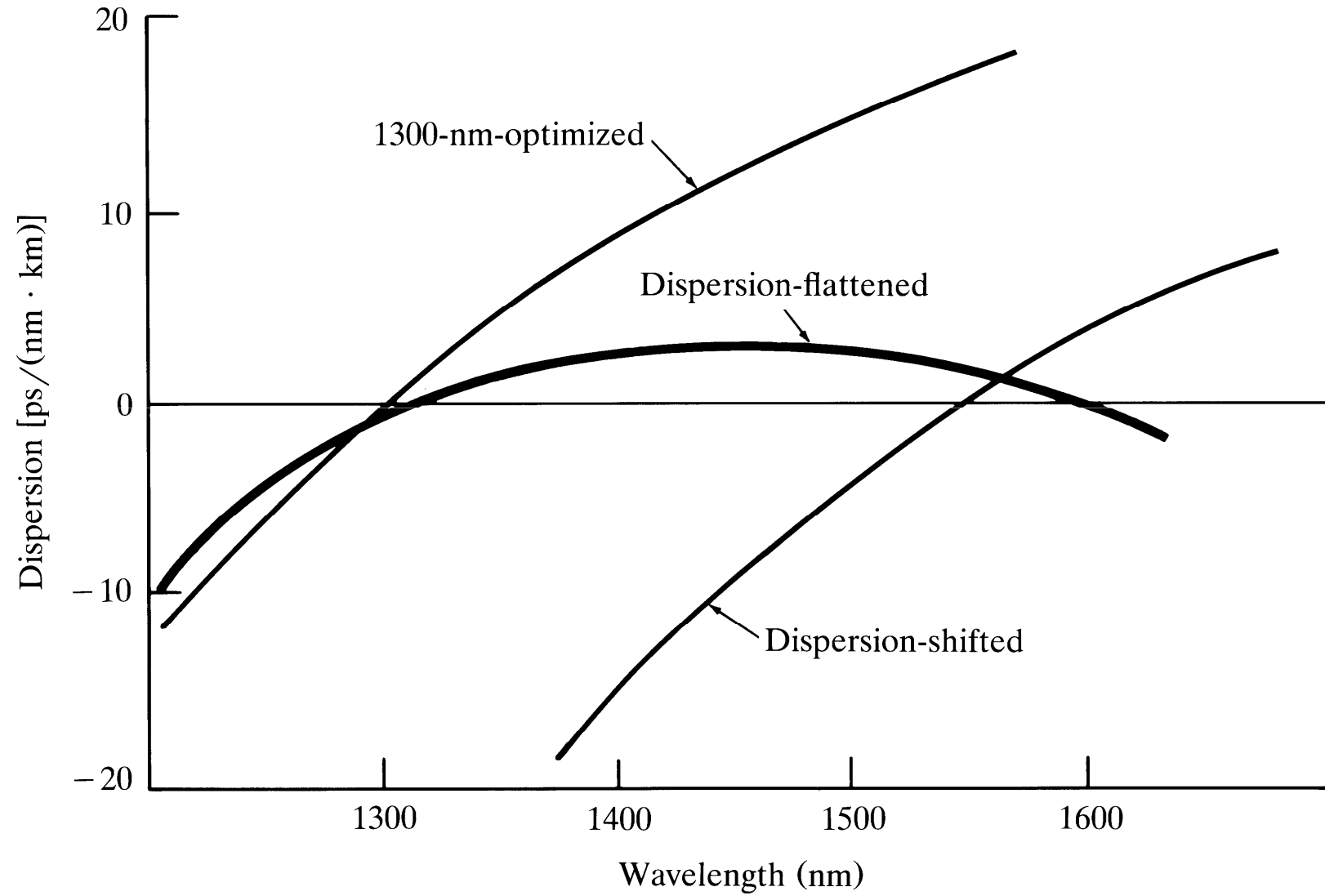


Pri daljših valovnih dolžinah je zakasnitev večja.

Zakasnitev impulza pri $D < 0$ in $D > 0$



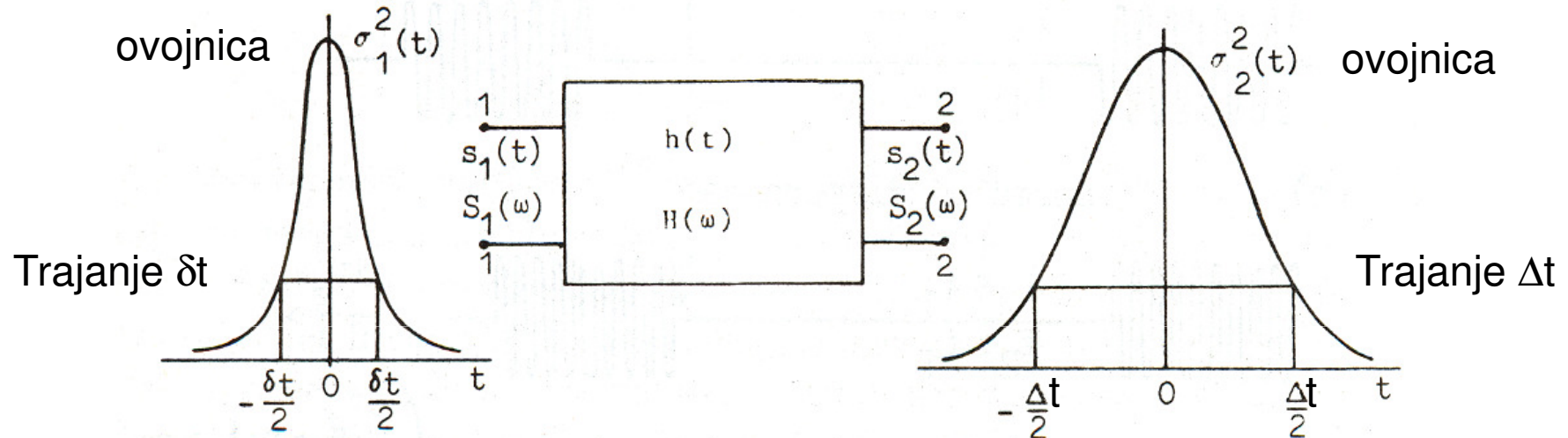
Osnovne vrste vlaken



(b)

Trajanje impulza na vhodu in izhodu 33

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (5.17)$$



$$s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt,$$

$$\sigma(t) = s(t) e^{-j\omega_0 t},$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

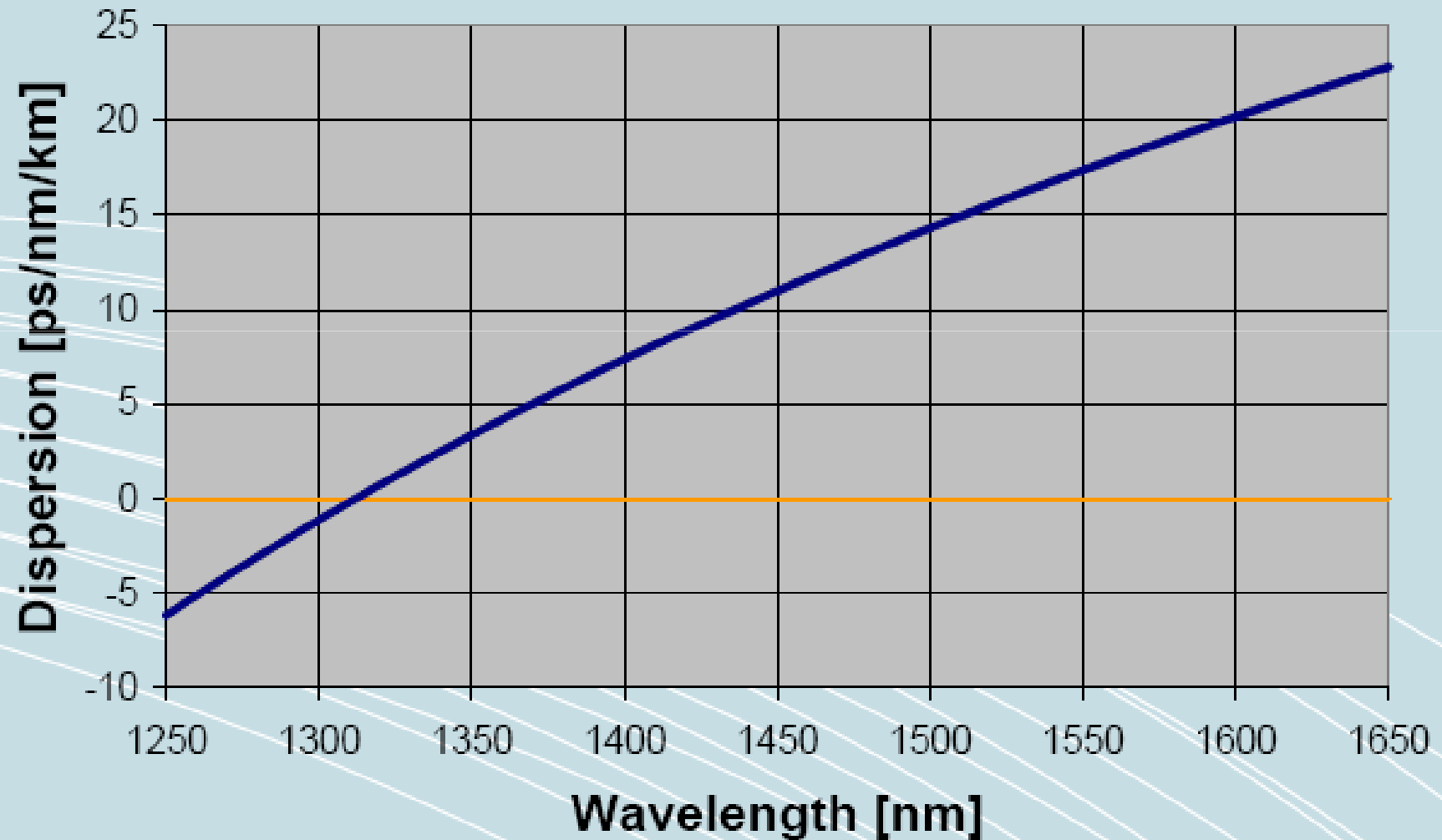
$$\Sigma(\omega) = S(\omega - \omega_0).$$

Širina (trajanje) izhodnega impulza

$$\Delta t = \sqrt{(\delta t)^2 + \left(\frac{4\beta_0'' L}{\delta t} \right)^2}.$$

Disperzija vlakna SMF-28

Dispersion of standard SMF-28 fiber (Corning)



Disperzijska enačba

$$k_T a \frac{J'_l(k_T a)}{J_l(k_T a)} = \gamma a \frac{K'_l(\gamma a)}{K_l(\gamma a)}$$

$$k_T^2 = n_1^2 k_o^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_o^2$$

$$J'_l(x) = \pm J_{l\pm 1}(x) \mp l \frac{J_l(x)}{x}$$

$$K'_l(x) = -K_{l\pm 1}(x) \mp l \frac{K_l(x)}{x}$$

$$k_T a \frac{J_{l-1}(k_T a)}{J_l(k_T a)} = -\gamma a \frac{K_{l-1}(\gamma a)}{K_l(\gamma a)} \quad \text{or} \quad k_T a \frac{J_{l+1}(k_T a)}{J_l(k_T a)} = \gamma a \frac{K_{l+1}(\gamma a)}{K_l(\gamma a)}$$

HE rodovi

EH rodovi

Disperzijska enačba osnovnega rodu
 HE_{11} (LP_{01})

$$\frac{uJ_1(u)}{J_0(u)} - \frac{wK_1(w)}{K_0(w)} = 0$$

Aditivnost

Aditivnost snovne in valovodne disperzije:

$$D_{ch}(\lambda) \approx \left| D_{mat} + D_{wg} \right| \quad \text{Kromatska disperzija}$$

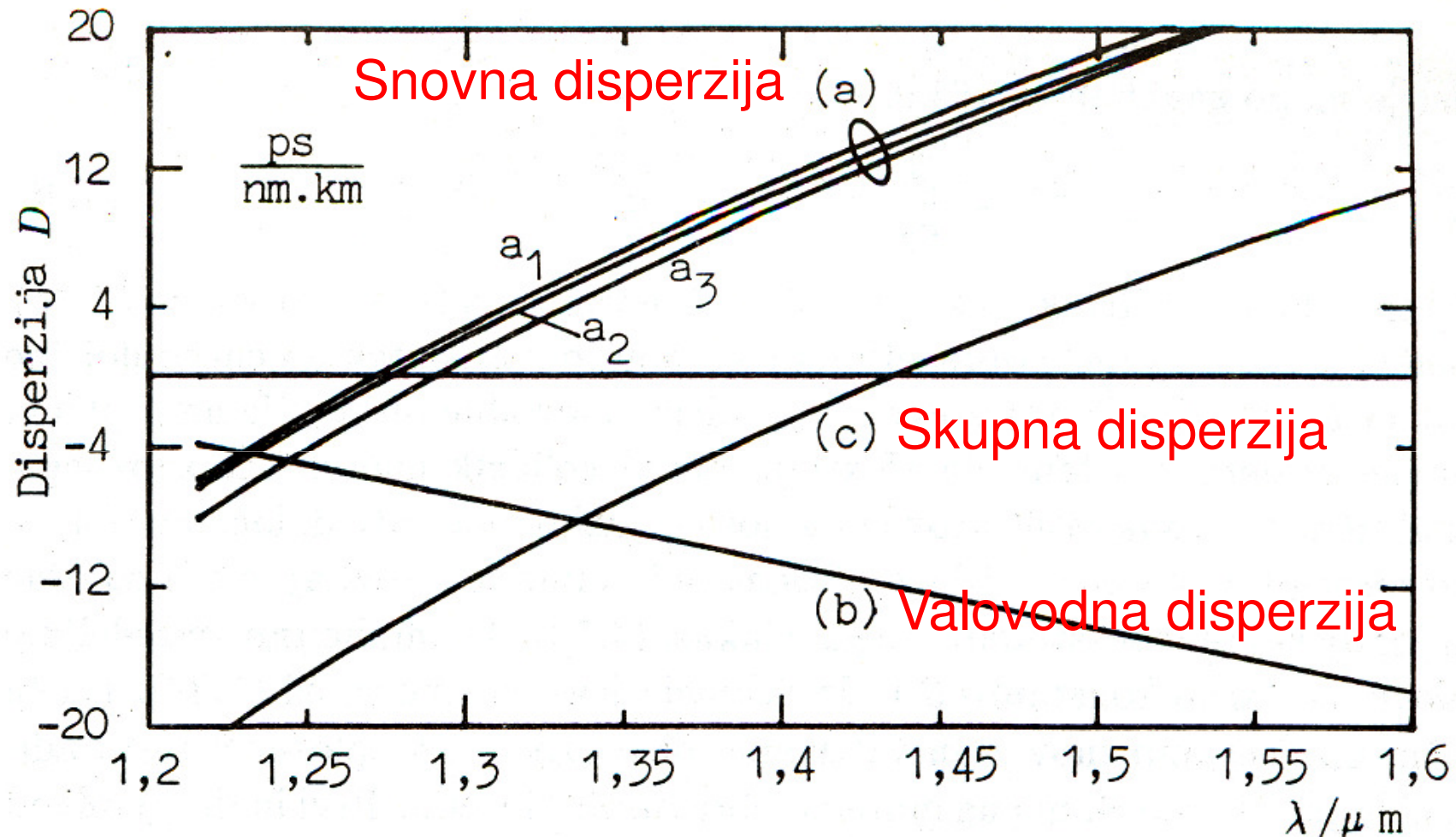
$$\sigma_{ch} = D_{ch}(\lambda) L \sigma_{\lambda}$$

Aditivnost kromatske in polarizacijske disperzije:

$$D_{total} \approx \left| D_{ch} + D_{pol} + \dots \right|$$

$$\sigma_{total} = D_{total} L \sigma_{\lambda}$$

Snovna, valovodna in skupna disperzija



$a_1, a_2, a_3 \dots$ različne primesi in različni deleži

Snovna disperzija

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - a_i^2},$$

$$n^2 = 1 + \frac{0,696166\lambda^2}{\lambda^2 - 0,068404^2} + \frac{0,407942\lambda^2}{\lambda^2 - 0,116241^2} + \frac{0,897479\lambda^2}{\lambda^2 - 9,896161^2}$$

$$\tau_g = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} = L \frac{d}{d\omega}(k_0 n) = \frac{L}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}.$$

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{A_i a_i^2 (3\lambda^2 + a_i^2)}{(\lambda^2 - a_i^2)^3} - \frac{1}{n^2} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{A_i a_i^2 \lambda}{(\lambda^2 - a_i^2)^2} \right)^2 \right)$$

Skupna disperzija

$$D = \frac{1}{c} \left\{ \frac{dN_1}{d\lambda} B + \frac{dN_2}{d\lambda} (1 - B) + (N_1 - N_2) \frac{dB}{d\lambda} - \left(\frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right) \right.$$

$$\left. D = -\frac{1}{c} \left(\lambda \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} B + \lambda \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} (1 - B) + (n_1 - n_2) \frac{V}{\lambda} \frac{d^2(VB)}{dV^2} \right) \right.$$

Glavna formula za disperzijo vlakna pri pogoju $dn_1/d\lambda = dn_2/d\lambda$:

$$D \doteq -\frac{1}{c} \left(\lambda \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} + (n_1 - n_2) \frac{V}{\lambda} \frac{d^2(VB)}{dV^2} \right) .$$

Ekspanzija in kompresija

Podobnega pomena kot razklon vidne svetlobe na prizmi je kromatska (snovna in valovodna) disperzija v kremenovem vlaknu. V prenosnem mediju, čigar prenosna karakteristika $\beta(\omega)$ odstopa od linearne frekvenčne odvisnosti, se posamezni deli spektra signala različnih frekvenc širijo z različno skupinsko hitrostjo (razpršitev skupinske hitrosti). Je linearnen pojav, pri katerem se ohranja amplituda prenašanega spektra, zakasnitev (oz. hitrost širjenja) spektralnih komponent pa se spremeni, zato se ovojnica (impulz) razširi tem bolj, čim večja je širina $\Delta\lambda$ spektra.

$$\Delta\tau_g = DL\Delta\lambda$$

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$$

$$n_e = \frac{\beta}{k_0}$$

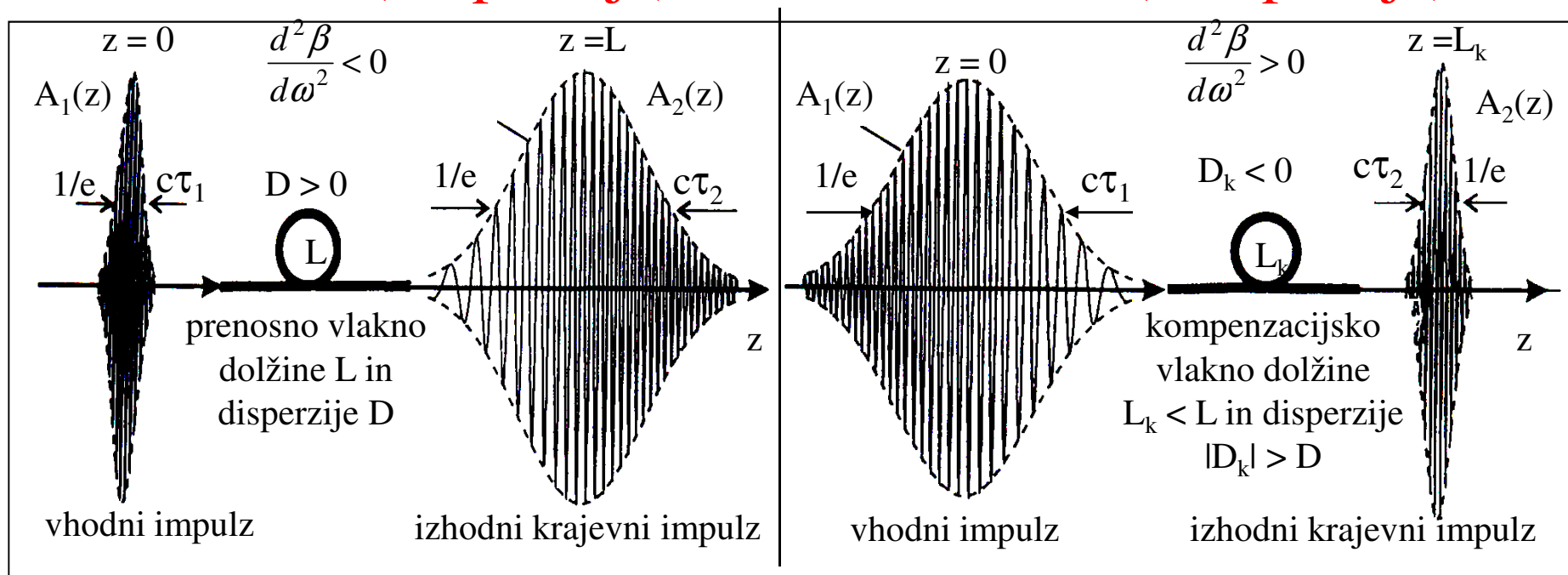
$\Delta\tau_g$ razširitev impulza

D disperzijski koeficient v ps/nm/km

n_e efektivni lomni količnik

razširitev (ekspanzija)

skrčitev (kompresija)



Disperzijski koeficient kromatske disperzije

42

1. Splošna opredelitev disperzijskega koeficienta drugega reda:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

$D > 0$ višje frekvence prehitevajo nižje

$D < 0$ nižje frekvence prehitevajo višje

2. Disperzijski koeficient snovne disperzije:

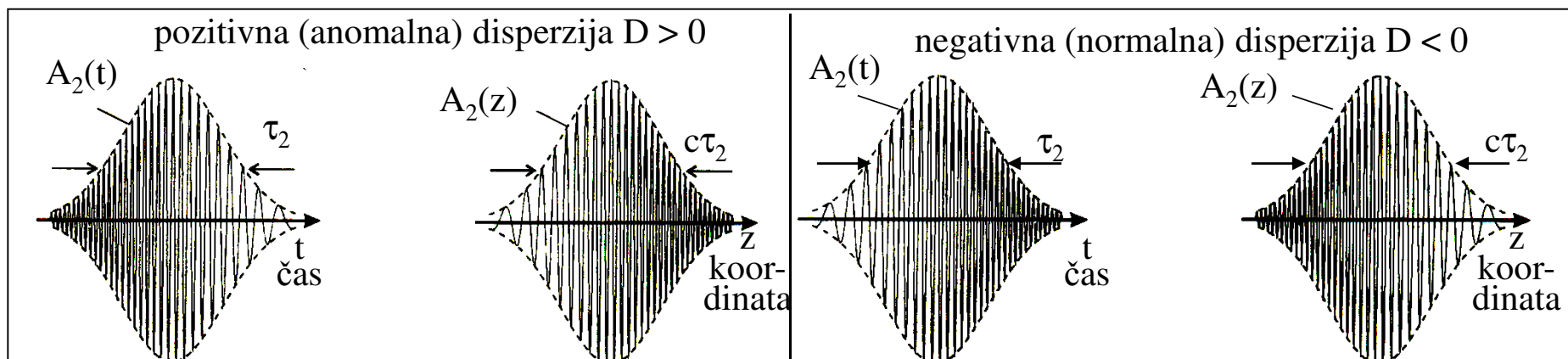
$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

n lomni količnik snovi (jedra ali obloge)

3. Disperzijski koeficient valovne disperzije:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n_e}{d\lambda^2}$$

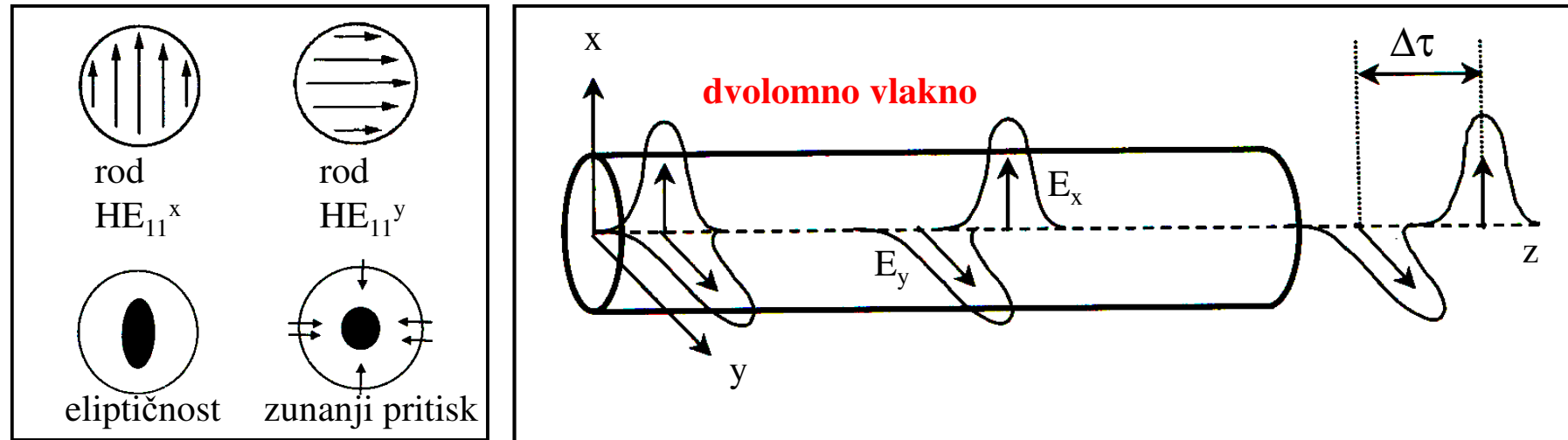
n_e efektivni lomni količnik valovodnega rodu HE_{11}



Razširjen in notranje frekvenčno prerazporejen impulz na koncu vlakna pri pozitivni ($D > 0$) in negativni ($D < 0$) disperziji. Običajne vrednosti disperzijskega koeficienta so 0 do $\oplus 20$ ps/nm/km. **Kromatska disperzija je linearen pojav in je zato tehnično lažje obvladljiva.**

Polarizacijska rodovna disperzija

Naključna dvolomnost (različna skupinska hitrost širjenja dveh ortogonalnih polj) vzdolž optične poti (vlakna). Impulz skupne moči dveh polarizacij se raztegne.



Povprečna vrednost diferenčne skupinske zakasnitve

$$\sigma = D_p \sqrt{L}, \quad \sigma = \sqrt{\Delta\tau^2} \quad D_p \text{ koeficient polarizacijske rodovne disperzije}$$

- | | |
|-------------------------------------|---|
| D_p položenih vlaken | $D_p = 0,1 - 1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ |
| D_p novih vlaken | $D_p = 0,05 - 0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ |
| D_p vrhunskih (prihodnjih) vlaken | $D_p < 0,01 - 0,05 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ |

Zaradi svoje statistične narave in odvisnosti od zunanjih vplivov je polarizacijska rodovna disperzija tehnično težko obvladljiva. Postaja končna omejitev pri zelo hitrih optičnih zvezah.

Omejitev dosega optične zveze z disperzijo ⁴⁴

Razširitev NRZ impulza zaradi disperzije ne sme preseči določene tolerance; izhodni impulz mora ostati znotraj bitnega intervala. Ta je tem manjši, čim večja je bitna hitrost. Omejitev zveze zaradi disperzije zato narašča z bitno hitrostjo. Razlikujemo:

- **Kromatska disperzija - nezahtevna optična zveza.** V spektru prevladuje spekter vira nad modulacijskim spektrom ($\Delta v \gg \Delta f$). Vir je npr. laser F-P.

$$4BL|D|\Delta\lambda \leq 10^3$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrto bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
$\Delta\lambda$	širina spektra v nm
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo že pri bitnih hitrostih pod 1 Gb/s.

- **Kromatska disperzija - sodobna optična zveza.** V spektru prevladuje modulacijski spekter nad spektrom vira ($\Delta f \gg \Delta v$). Vir je npr. laser DFB ali DBR z zunanjo modulacijo.

$$B^2L|D| \leq 10^5$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrto bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo zlasti pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s.

- **Polarizacijska rodovna disperzija - zelo hitra optična zveza:**

$$B^2LD_p^2 \leq 10^4$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi največ za 0,1 bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D_p	koeficient polarizacijske rodovne disperzije v ps/km ^{1/2}

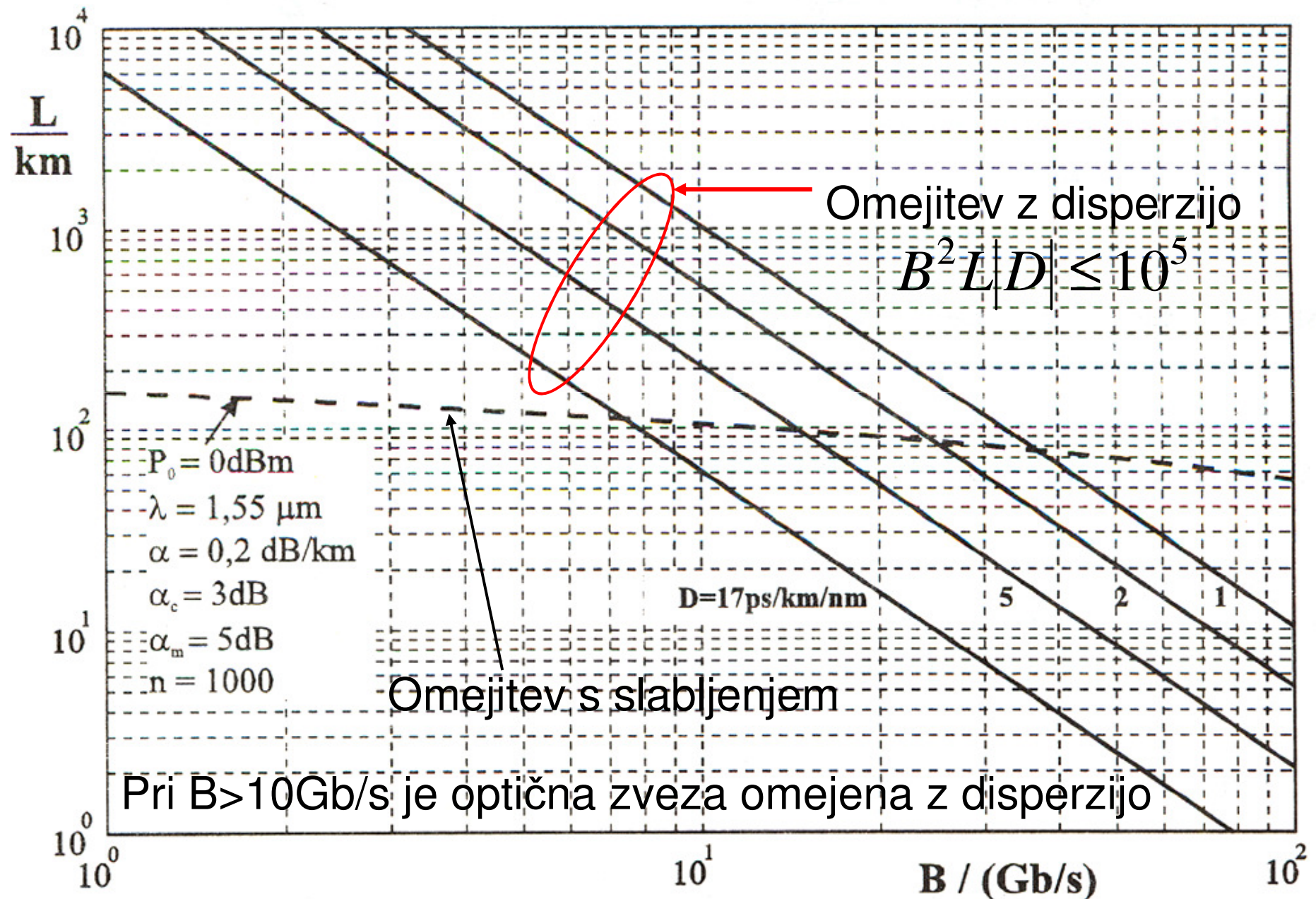
Disperzija močno omejuje optično zvezo pri bitnih hitrostih $B > 40$ Gb/s.

Disperzija najpomembnejših vlaken

Našteta vlakna se pogosto uporabljajo v transportnih omrežjih.

Vrsta vlakna	Disperzija [ps/nmkm]	Naklon disperzije [ps/nm ² km]	κ [nm]
SMF	17	0.058	298
LEAF	4.2	0.085	50
TrueWave-RS	4.5	0.045	100
TeraLight	8	0.057	140
PureGuide	8	0.06	133

Omejitev dosega optične zveze



Omejitve s kromatsko disperzijo

$$\text{Omejitveni pogoj } B^2|D|L < 104.000 \text{ (Gb/s) ps/nm}$$

Omejitev dolžine L prenosnega vlakna različne disperzije D (ps/nm/km) pri nekaterih bitnih hitrostih B (Gb / s) in omejitev dopustne vrednosti $T = |D|L$ (ps/nm) :

- vlakno SMF (G.652) disperzije $D = 17$ ps/nm/km in dolžine L_1
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 8$ ps/nm/km in dolžine L_2
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 4$ ps/nm/km in dolžine L_3

B (Gb/s)	L_1 (km)	L_2 (km)	L_3 (km)	T (ps/nm)
2,5	1000	2000	4000	
10	60	130	250	1000
40	4	8	16	65
80	1	2	4	16
160	0,25	0,5	1	4

Na optičnih zvezah, ki uporabljajo ozkopasovni laserski vir (dioda DFB ali DBR z zunanjo modulacijo), omejuje disperzija doseg zveze pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s. Pri manjših bitnih hitrostih $B < 10$ Gb/s je zveza omejena predvsem s slabljenjem.

Disperzija je linearen pojav in ga je zato mogoče kompenzirati. Pri bitnih hitrostih $B > 80$ Gb/s, je potrebna dinamična kompenzacija disperzije.

Karakteristike kompenzacijskih vlaken⁴⁸

- **Kakovost** (Figure of Merit)

$$FOM(\text{ps/nm/dB}) = \frac{|D|}{\alpha}$$

kjer je D koeficient disperzije in α slabljenje.

- **Relativna disperzijska strmina** (Relative Dispersion Slope)

$$RDS(\text{nm}^{-1}) = \frac{S}{D} \quad \text{ali} \quad \kappa(\text{nm}) = \frac{D}{S}$$

kjer je S disperzijska strmina in D disperzijski koeficient. Vlakno SSMF ima razmerje $RDS = 0,0033$.

- **Kompenzacijsko razmerje** (Dispersion to Slope Compensation Ratio)

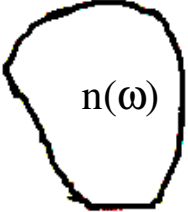
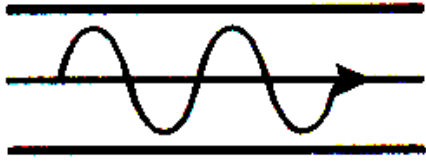

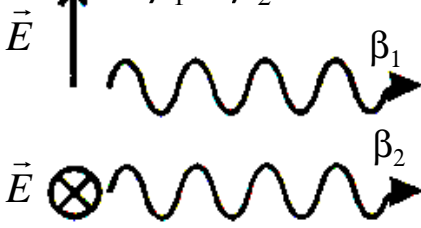
$$DSCR = \frac{D_p / S_p}{D_k / S_k} = \frac{\kappa_p}{\kappa_k}$$

kjer sta D_p in D_k koeficienta disperzije in S_p ter S_k koeficienta disperzijske strmine prenosnega in kompenzacijskega vlakna. Želena vrednost tega razmerja je 1.

Disperzija (razpršitev) skupinske hitrosti svetlobe

Disperzija je razpršitev skupinske hitrosti kot posledica odvisnosti skupinske hitrosti od valovne dolžine oz. frekvence, načina širjenja ter polarizacije svetlobe. Nastaja:

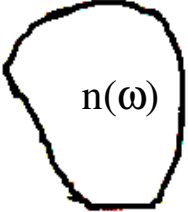
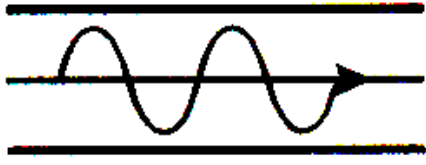

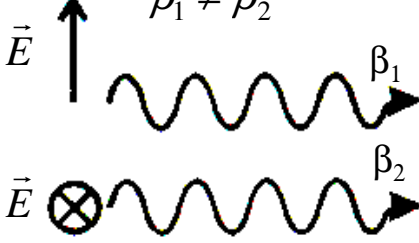
- **v neomejeni disperzni snovi**, lomni količnik katere je odvisen od valovne dolžine (snovna disperzija)
- **v omejenem prostoru**, ki je omejen s totalnim odbojem na plastni ali periodični nehomogenosti snovi (valovodna disperzija). Razlikujemo enorodovni in mnogorodovni način razširjanja (valovodna rodovna in mnogorodovna disperzija)
- **v dvolomni snovi** z različnimi polarizacijskimi parametri se ortogonalna valova širita z različno skupinsko hitrostjo (polarizacijska rodovna disperzija).

kromatska se povečuje z večanjem širine spektra		nekromatska ni odvisna od širine spektra	
Snovna  $n(\omega)$ n je odvisen od frekvence	Valovodna (rodovna) $\beta(\omega) = \frac{\omega n_e}{c} \neq k = \frac{\omega n}{c}$  β je nelinearno odvisen od frekvence	Večžarkovna (mnogorodovna) $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots$  β je različen za različne žarke (rodove)	Polarizacijska rodovna (dvolomnost) $\beta_1 \neq \beta_2$  β je odvisen od polarizacije

Disperzija (razpršitev) skupinske hitrosti svetlobe

Disperzija je razpršitev skupinske hitrosti kot posledica odvisnosti skupinske hitrosti od valovne dolžine oz. frekvence, načina širjenja ter polarizacije svetlobe. Nastaja:

- **v neomejeni disperzni snovi**, lomni količnik katere je odvisen od valovne dolžine (snovna disperzija)
- **v omejenem prostoru**, ki je omejen s totalnim odbojem na plastni ali periodični nehomogenosti snovi (valovodna disperzija). Razlikujemo enorodovni in mnogorodovni način razširjanja (valovodna rodovna in mnogorodovna disperzija)
- **v dvolomni snovi** z različnimi polarizacijskimi parametri se ortogonalna valova širita z različno skupinsko hitrostjo (polarizacijska rodovna disperzija).

kromatska se povečuje z večanjem širine spektra		nekromatska ni odvisna od širine spektra	
Snovna  $n(\omega)$ n je odvisen od frekvence	Valovodna (rodovna) $\beta(\omega) = \frac{\omega n_e}{c} \neq k = \frac{\omega n}{c}$  β je nelinearno odvisen od frekvence	Večžarkovna (mnogorodovna) $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots$  β je različen za različne žarke (rodove)	Polarizacijska rodovna (dvolomnost) $\beta_1 \neq \beta_2$  β je odvisen od polarizacije

$$\sigma_g \approx \left| \frac{d\tau_{mat}}{d\lambda} \right| \sigma_\lambda = \frac{L\sigma_\lambda}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right| = L\sigma_\lambda |D_{mat}(\lambda)|$$

$$\beta \approx n_2 k (1 + b\Delta)$$

$$V = ka(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx kan_2 \sqrt{2\Delta}$$

Strmina disperzije

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2$$

$$S_0 = S(\lambda_0) = \left. \frac{dD}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0}$$

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right]$$

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2$$

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2$$

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)S_0$$

Lastnosti disperzije

1. Disperzija je **linearen in aditiven pojav**. Zato lahko disperzijo kompenziramo na več načinov s konkatencijo vlaken različnoimenske disperzije.
2. **Snovna in valovna disperzija** vlakna sta v valovnem področju optičnih komunikacij po znaku nasprotni, kar spričo aditivnosti disperzije omogoča njuno medsebojno kompenzacijo
3. Disperzija povzroča **prerazporeditev spektralnih komponent** signala znotraj razširjenega impulza. Kompenzirati jo je mogoče zato s pojavi, ki bi povzročili nasprotno razporeditev spektralnih komponent, npr.
 - nelinearni pojav lastne fazne modulacije
 - nasprotna fazna modulacija vhodnega impulza (žvižg laserja)
4. Disperzijo lahko koristno uporabimo za **kompenzacijo** nekaterih nelinearnih pojavov oz. zmanjšanje njihovih posledic (glej štirivalovno mešanje).
5. Pozitivna disperzija vlakna in nelinearni pojav lastne fazne modulacije, omogočata nastanek in širjenje **solitonov**. To so impulzi vrste RZ, ki med širjenjem po disperznem in nelinearnem vlaknu pod določenimi pogoji ohranjajo svojo prvotno obliko. Ta način ni več aktualen.

Omejitev dosega optične zveze z disperzijo ⁵⁵

Razširitev NRZ impulza zaradi disperzije ne sme preseči določene tolerance; izhodni impulz mora ostati znotraj bitnega intervala. Ta je tem manjši, čim večja je bitna hitrost. Omejitev zveze zaradi disperzije zato narašča z bitno hitrostjo. Razlikujemo:

- **kromatska disperzija - nezahtevna optična zveza.** V spektru prevladuje spekter vira nad modulacijskim spektrom ($\Delta v \gg \Delta f$). Vir je npr. laser F-P.

$$4BL|D|\Delta\lambda \leq 10^3$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrtnega bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
$\Delta\lambda$	širina spektra v nm
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo že pri bitnih hitrostih pod 1 Gb/s.

- **Kromatska disperzija - sodobna optična zveza.** V spektru prevladuje modulacijski spekter nad spektrom vira ($\Delta f \gg \Delta v$). Vir je npr. laser DFB ali DBR z zunanjo modulacijo.

$$B^2 L |D| \leq 10^5$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrtnega bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo zlasti pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s.

- **Polarizacijska rodovna disperzija - zelo hitra optična zveza:**

$$B^2 L D_p^2 \leq 10^4$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi največ za 0,1 bitnega intervala

B	bitna hitrost v Gb/s
L	dolžina vlakna v km
D_p	koeficient polarizacijske rodovne disperzije v ps/km ^{1/2}

Disperzija močno omejuje optično zvezo pri bitnih hitrostih $B > 40$ Gb/s.

Disperzijski koeficient kromatske disperzije

1. Splošna opredelitev disperzijskega koeficienta drugega reda:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

$D > 0$ višje frekvence prehitevajo nižje

$D < 0$ nižje frekvence prehitevajo višje

2. Disperzijski koeficient snovne disperzije:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

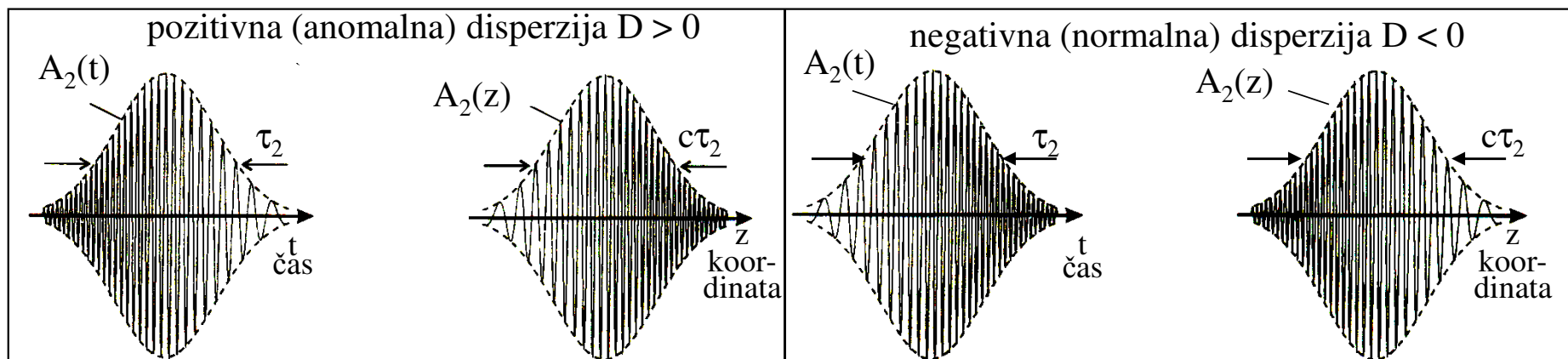
n lomni količnik snovi (jedra ali obloge)

3. Disperzijski koeficient valovne disperzije:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n_e}{d\lambda^2}$$

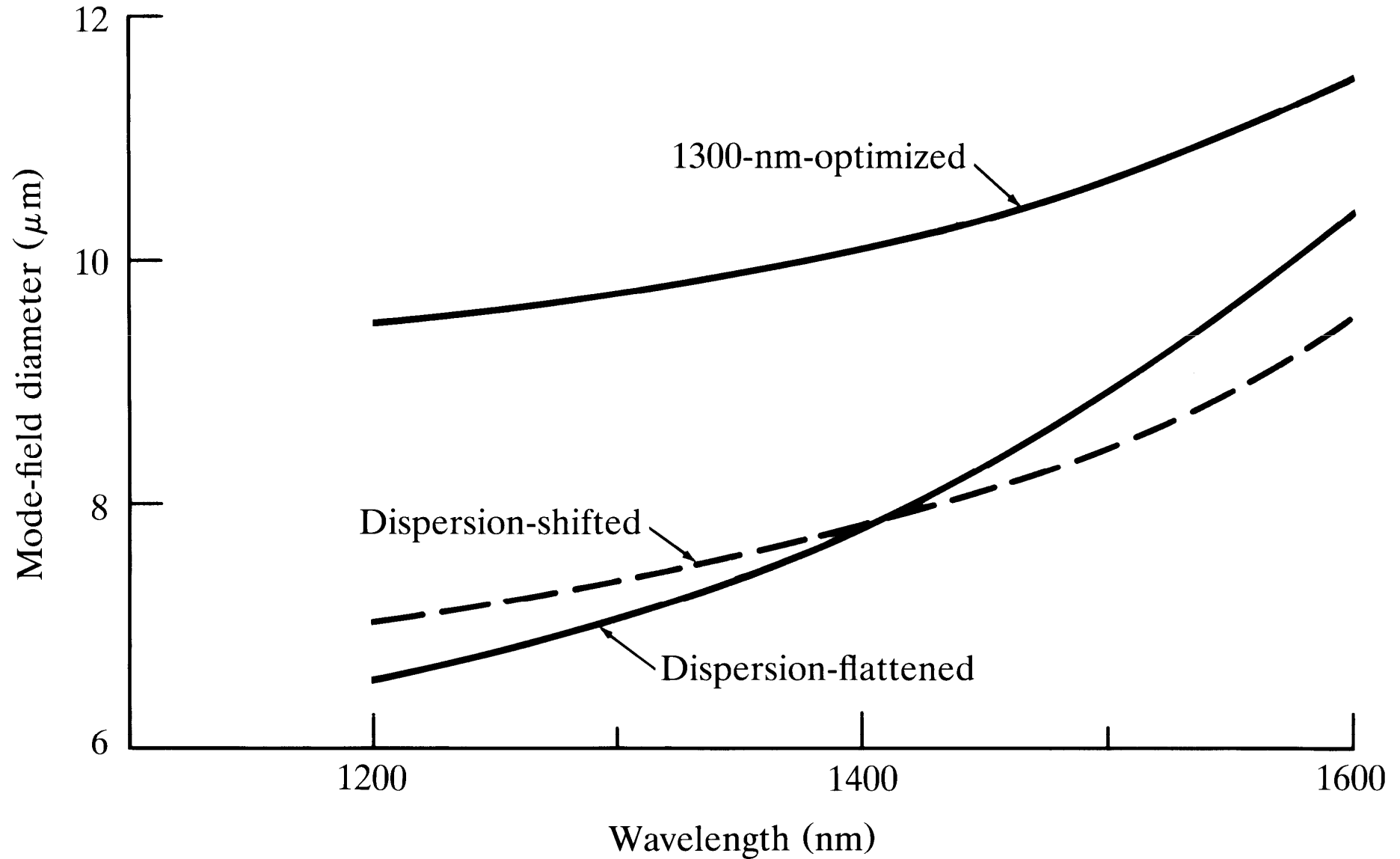
n_e efektivni lomni količnik valovodnega rodu

HE₁₁



Razširjen in notranje frekvenčno prerazporejen impulz na koncu vlakna pri pozitivni ($D > 0$) in negativni ($D < 0$) disperziji. Običajne vrednosti disperzijskega koeficienta so 0 do ± 20 ps/nm/km. **Kromatska disperzija je linearen pojav in je zato tehnično lažje obvladljiva.**

Premer svetlobnega jedra



Valovodna disperzija

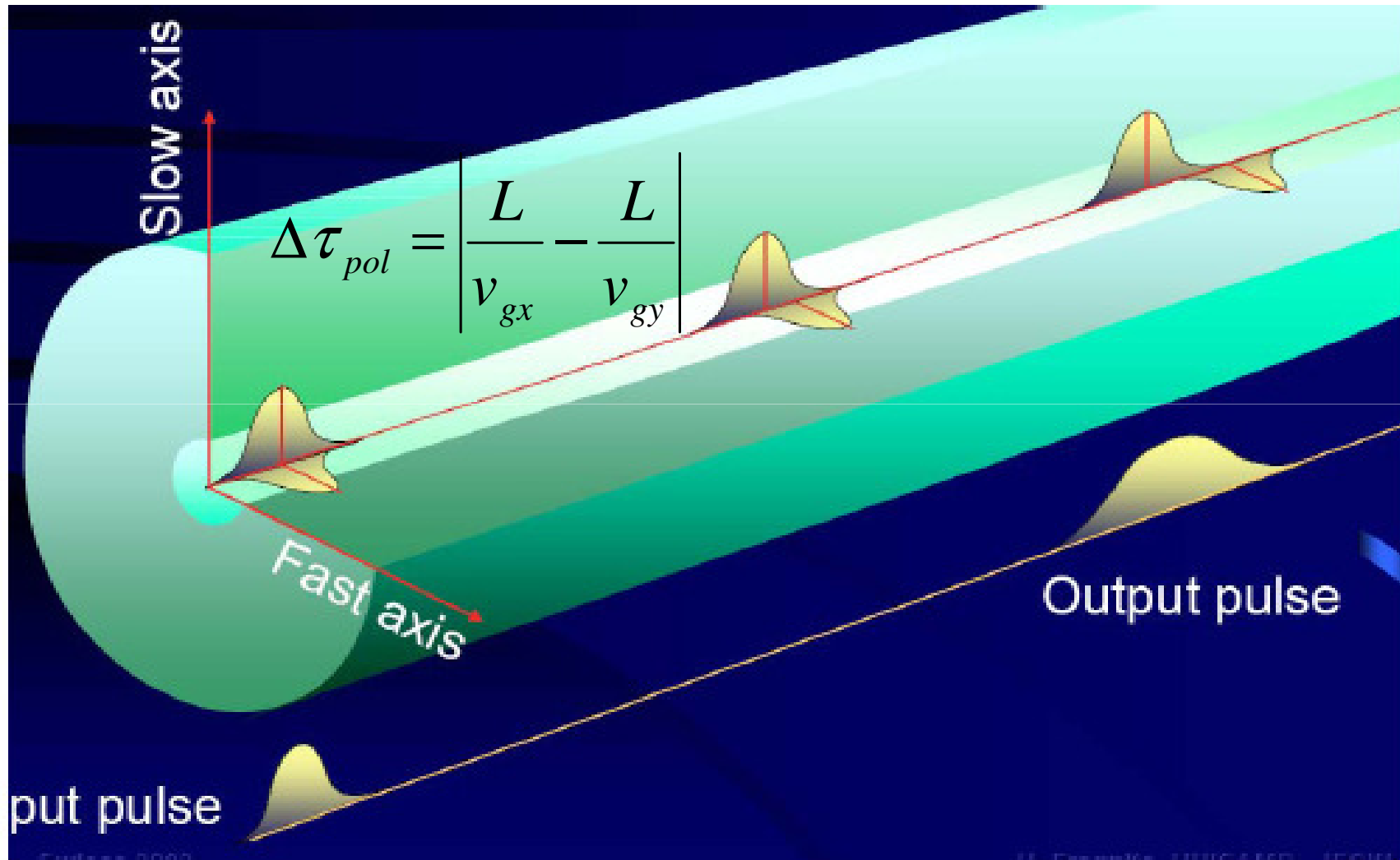
Valovodna zakasnitev:

$$\tau_{wg} = \frac{L}{c} \left[n_2 + n_2 \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

Razpršitev valovodne zakasnitve:

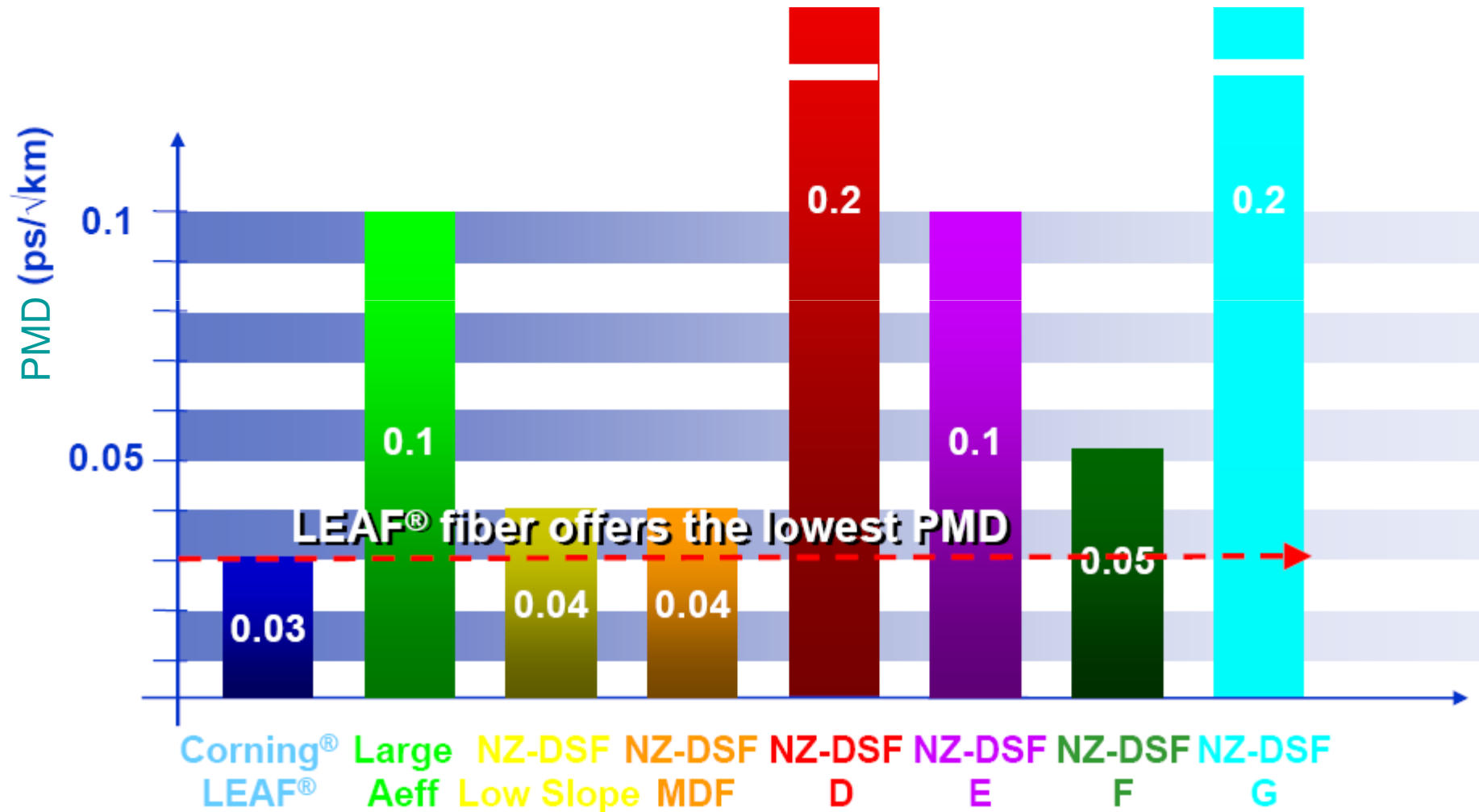
$$\sigma_{wg} \approx \left| \frac{d\tau_{wg}}{d\lambda} \right| \sigma_{\lambda} = L \sigma_{\lambda} \left| D_{wg}(\lambda) \right| = \frac{n_2 L \Delta \sigma_{\lambda}}{c \lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$$

Polarizacijska rodovna disperzija

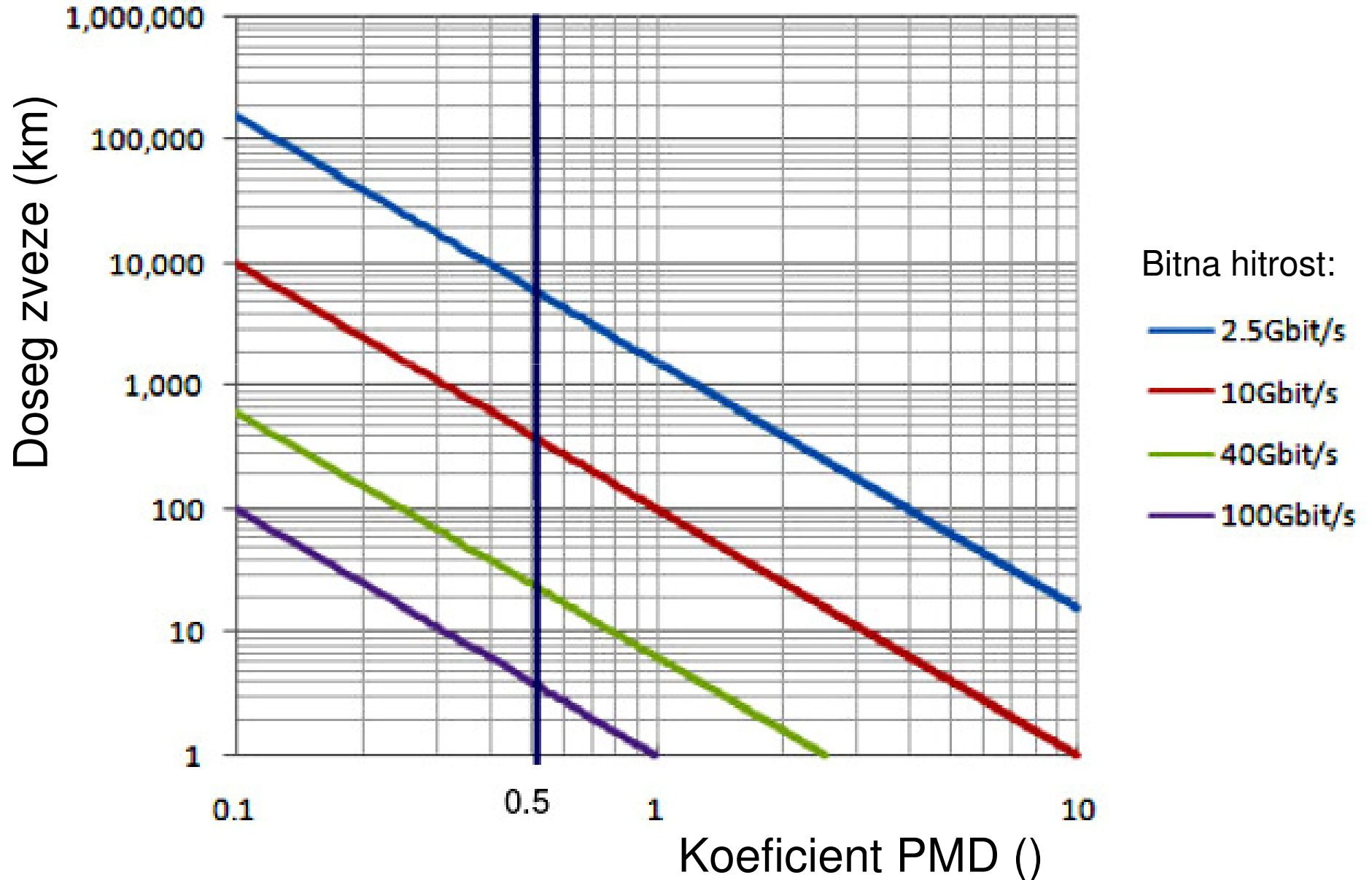


Polarizacijska rodovna disperzija

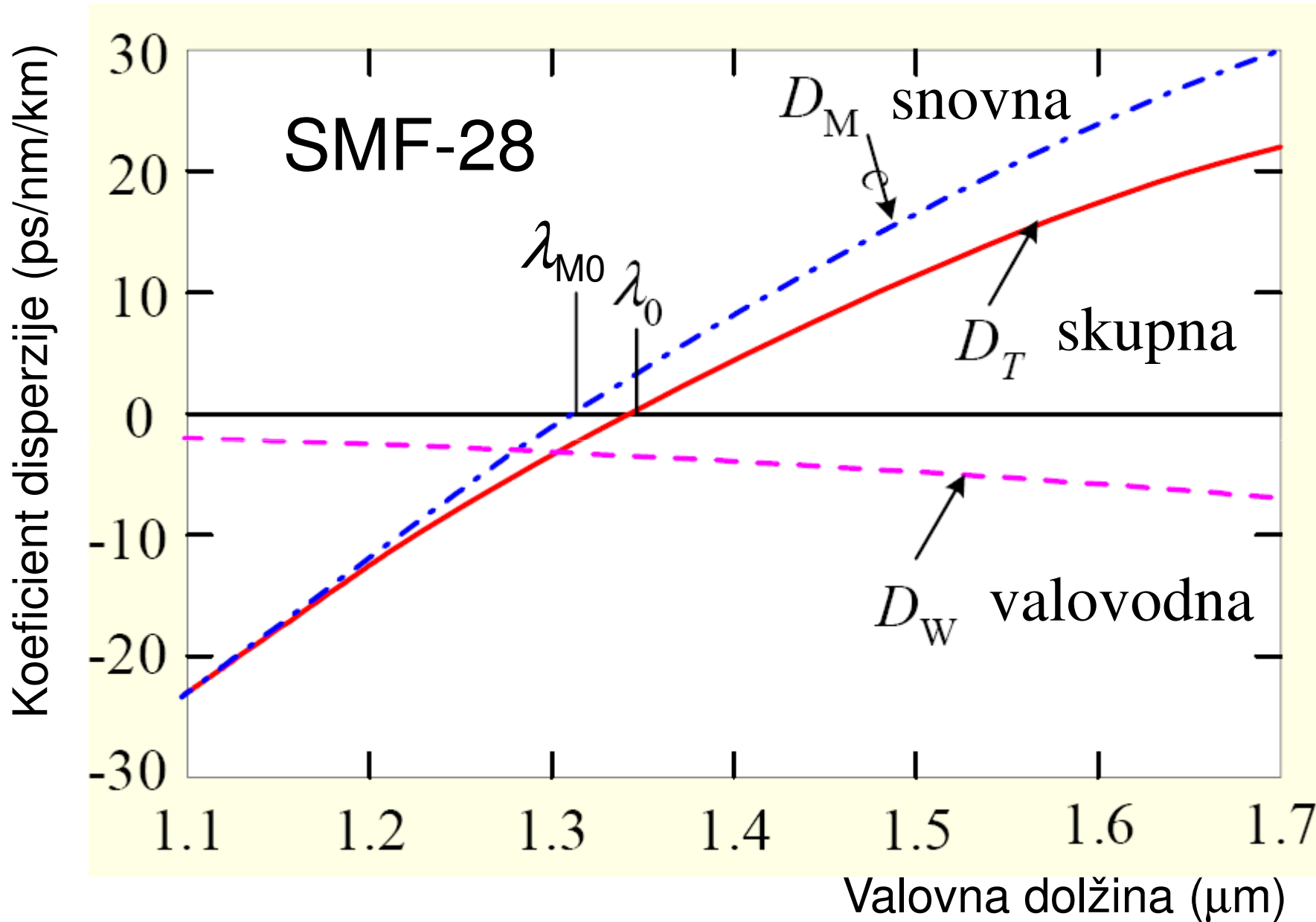
Opomba: novejša vlakna imajo močno izboljšano PMD



Omejitev dosega zaradi PMD



Snovna, valovodna in skupna disperzija⁶²



Besselove funkcije, relacije

Rekurzijske formule:

$$J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x)$$

$$K_{-n}(x) = K_n(x)$$

$$J_{n-1}(x) = \frac{2n}{x} J_n(x) - J_{n+1}(x)$$

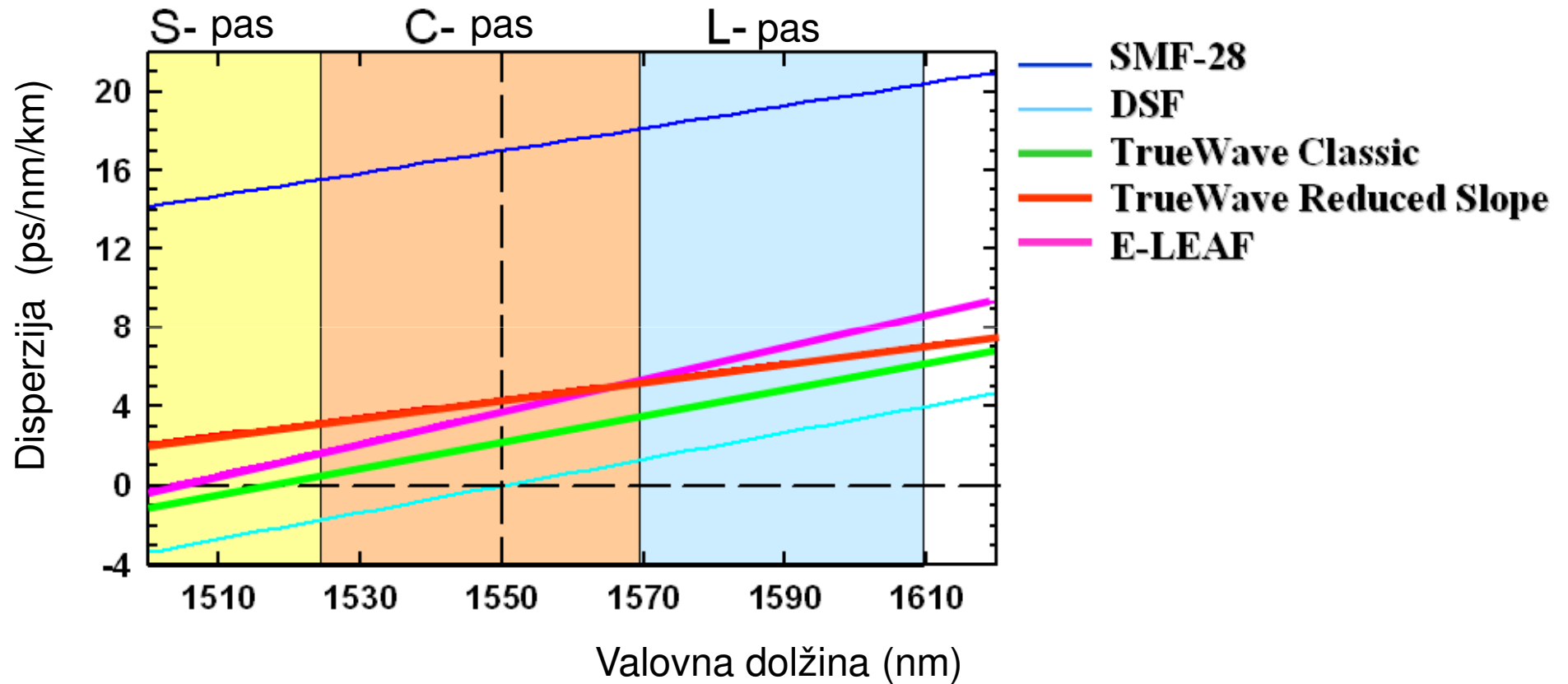
$$K_{n-1}(x) = -\frac{2n}{x} K_n(x) + K_{n+1}(x)$$

$$J_0(x) = \frac{2}{x} J_1(x) - J_2(x)$$

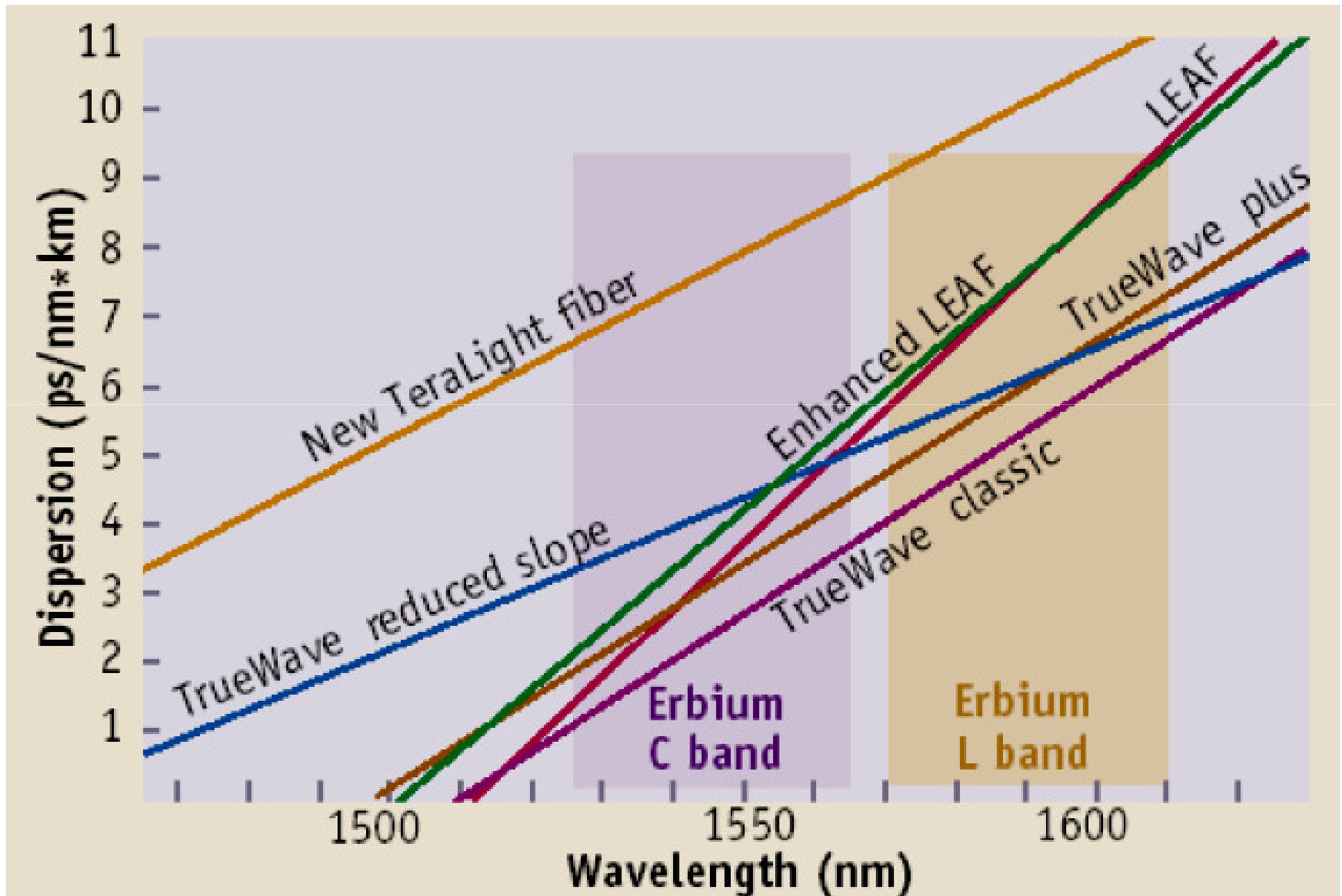
$$K_0(x) = -\frac{2}{x} K_1(x) + K_2(x)$$

$$K_n(x) \rightarrow \begin{cases} -\ln\left(\frac{x}{2}\right) - 0.5772 & n = 0 \\ \frac{(n-1)!}{2} \left(\frac{2}{x}\right)^n & n > 0 \end{cases}$$

Vlakna nenične disperzije



Disperzijsko premaknjena vlakna



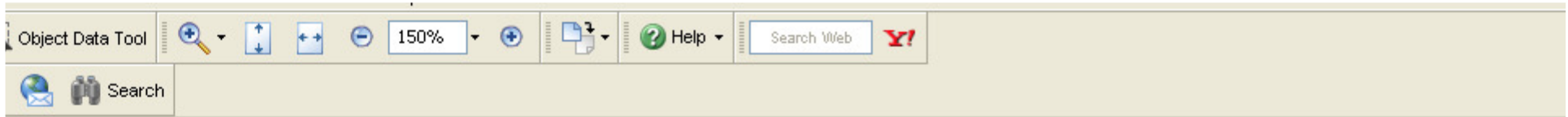
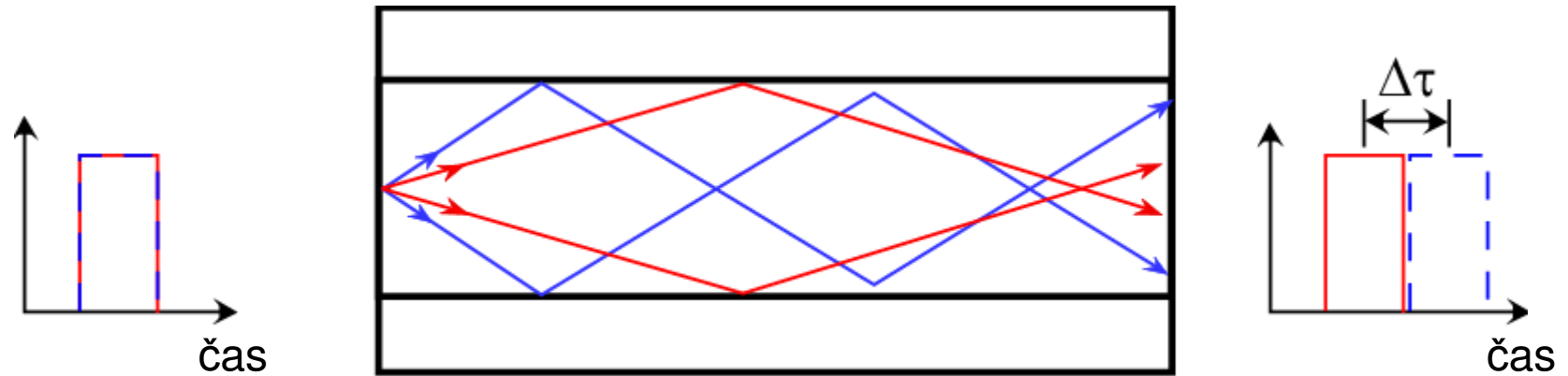


Table 4.2: Physical Parameters of all kinds of Fiber (Ref. [6])

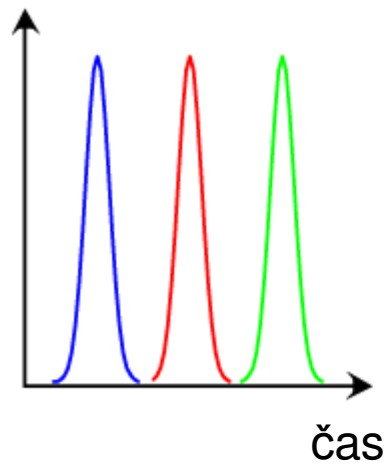
	Dispersion D @ 1550nm [ps/nm/km]	Dispersion slope S @1550nm [ps/nm ² /km]	Nonlinear refractive index n_2 [10 ⁻²⁰ m ² /W]	Effective core area A_{eff} [μm ²]	Fiber attenuation [dB/km]
Standard SMF	17	0.058	2.8	80	0.25
DCF for SSMF	-90	$0.058 \times \frac{-90}{17}$	4.3	14.3	0
TW	3.5	0.08	3.45	45	0.25
DCF for TW	-90	$0.08 \times \frac{-90}{3.5}$	4.3	14.3	0
TW-RS	4.4	0.045	3.2	55	0.25
DCF for TW-RS	-90	$0.045 \times \frac{-90}{4.4}$	3.0	14.3	0
LEAF	3.7706	0.11	3.0	72	0.25
DCF for LEAF	-90	$0.11 \times \frac{-90}{3.7706}$	4.3	14.3	0

ISI – Intersimbolna interferenca



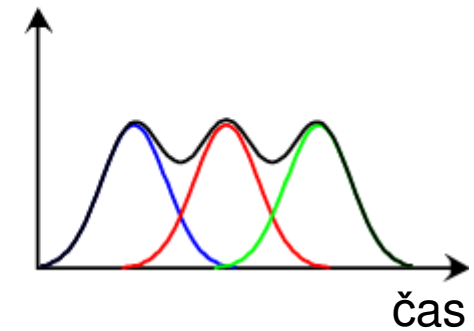
$$\Delta\tau = \frac{\Delta L}{v_g}$$

Vhodni signal



Disperzni kanal

Izhodni signal

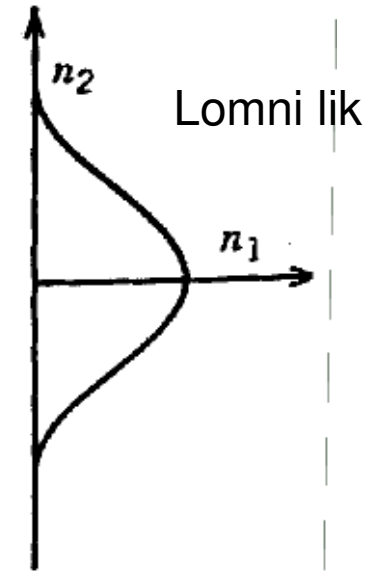
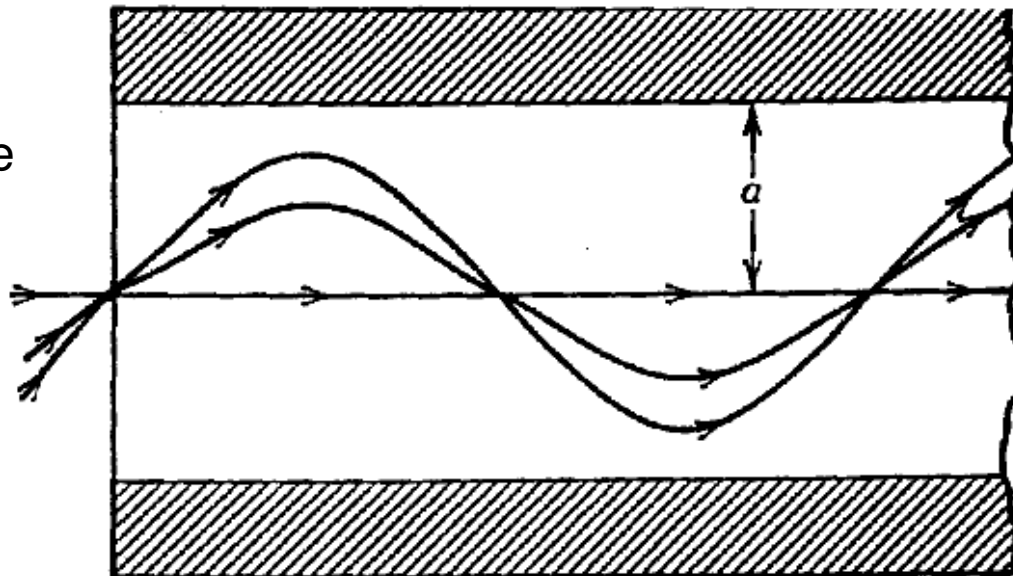


Mnogorodovno gradientno vlakno

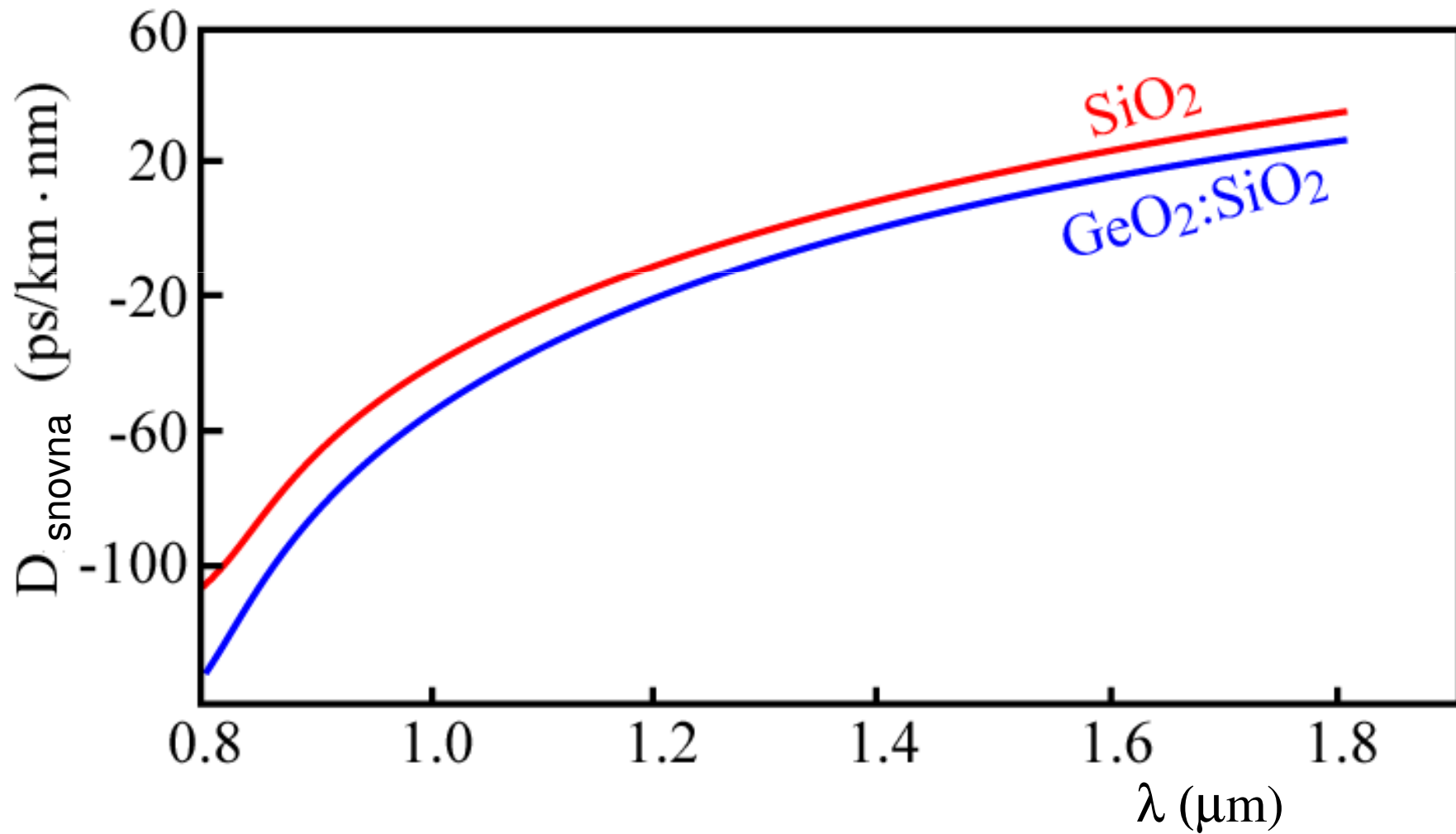
$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} & r < a \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 & r > a \end{cases}$$

$$D_{\text{inter}} = \frac{n_{1g}}{c} \frac{\Delta^2}{4}$$

Trajektorije
žarkov



Snovna disperzija



Primerjava disperzije

Dispersion

- Step index multi-mode optical fiber ($D_{tot} \sim 10 \text{ ns/km}$)

$$D_{tot} = D_{inter} = \frac{n_{1g}}{c} \frac{\Delta}{2}$$

- Graded index multi-mode optical fiber ($D_{tot} \sim 0.5 \text{ ns/km}$)

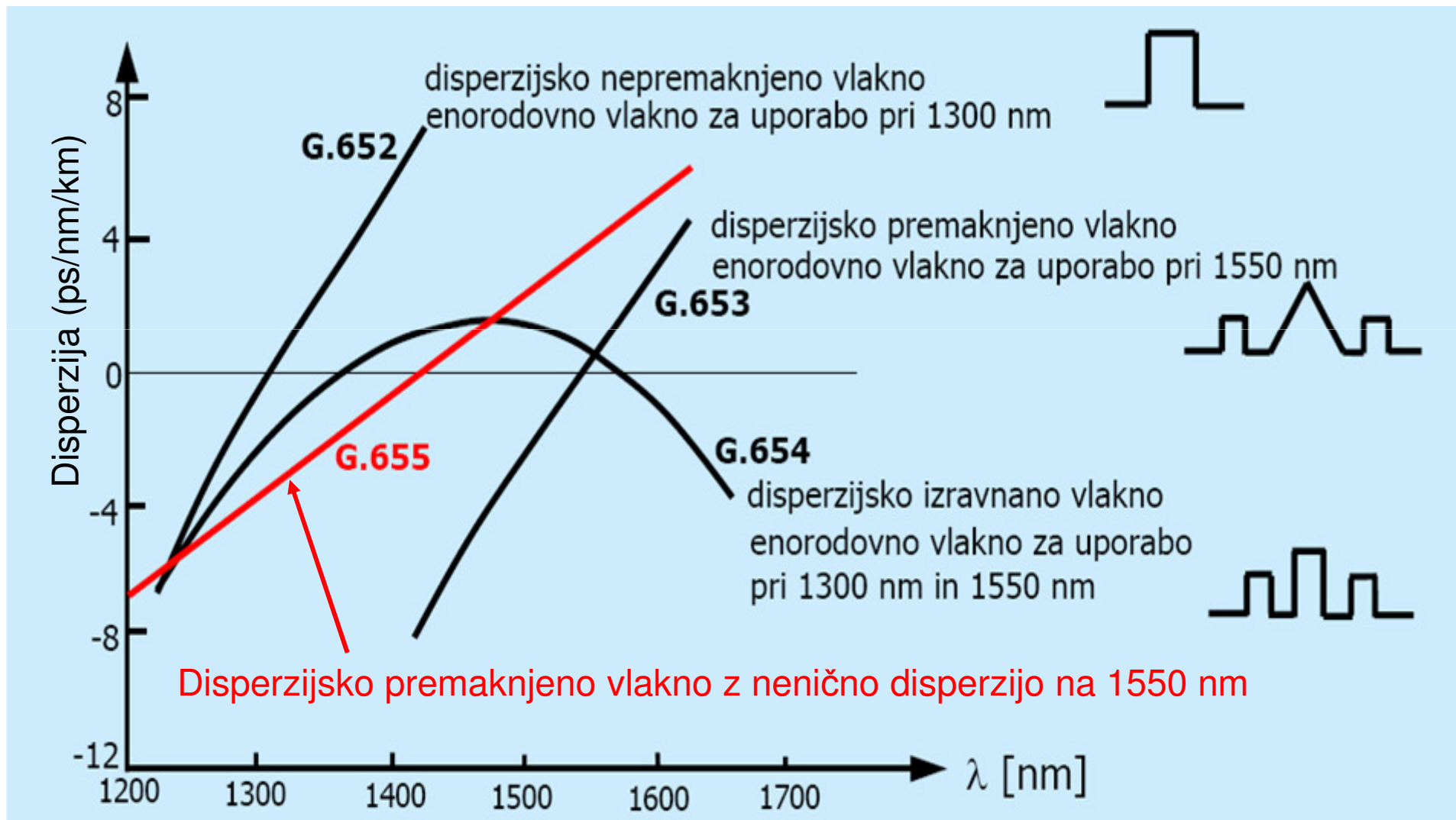
$$D_{tot} = D_{inter} = \frac{n_{1g}}{c} \frac{\Delta^2}{4}$$

- Single mode optical fiber ($D_{intra} \sim 18 \text{ ps/km nm}$)

$$D_{tot} = D_{intra} \Delta\lambda$$

Standardne vrste optičnega vlakna

Standardizacija ITU.G.



Dispersion for non-dispersion-shifted fibers (1270 nm – 1340 nm)

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad [3-33]$$

- τ_0 is relative delay minimum at the zero-dispersion wavelength λ_0 , and S_0 is the value of the dispersion slope in ps/(nm².km)

$$S_0 = S(\lambda_0) = \left. \frac{dD}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \quad [3-34]$$

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad [3-35]$$

Dodatek

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1}$$

- For a plane wave traveling in glass of index n_1 $\beta = n_1 \frac{\omega}{c}$

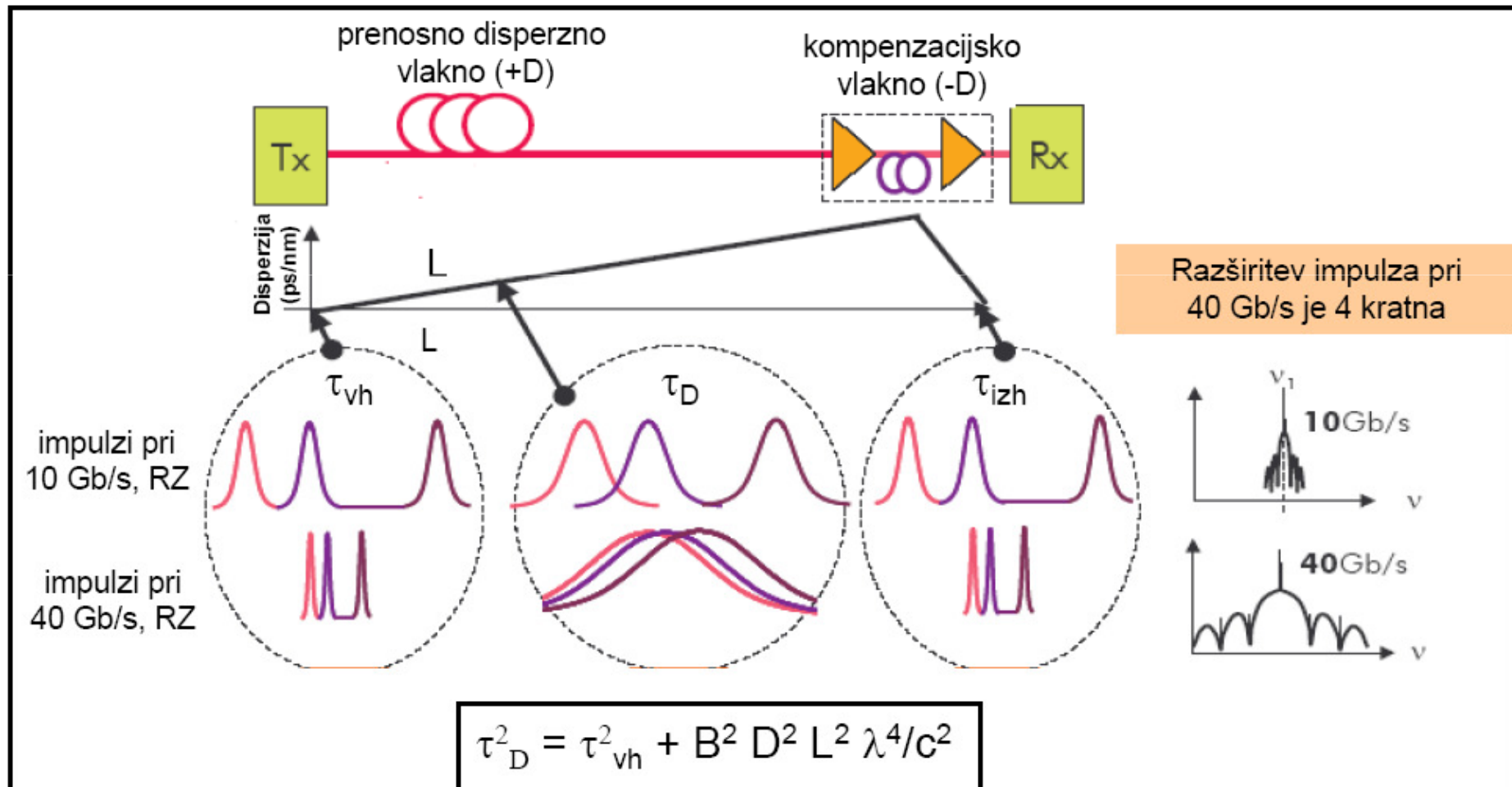
- Resulting in
$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial \omega} &= \frac{n_1}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{\partial n_1}{\partial \omega} \\ &= \frac{1}{c} \left(\omega \frac{\partial n_1}{\partial \omega} + n_1 \right) \\ &= \frac{n_{1g}}{c} \end{aligned}$$

$$v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{c}{n_{1g}}$$

$$n_{1g} = n_1 + \omega \frac{\partial n_1}{\partial \omega}$$

Učinek kromatske disperzije

Primerjava razširitve impulza pri 10 in 40 Gb/s



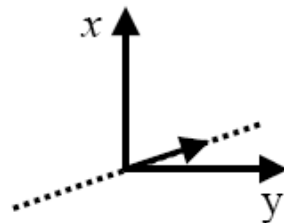
Polarizacija

- Svetlobo v optičnem vlaknu lahko približno obravnavamo kot transverzalno elektromagnetno valovanje. Električno polje optičnega vala je vedno mogoče razstaviti na dve ortogonalni komponenti:

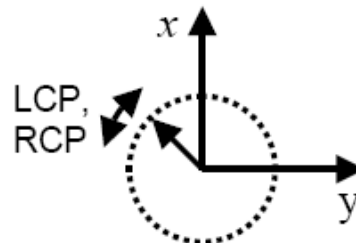
$$\begin{aligned}\vec{E}_x(z,t) &= \vec{1}_x E_0 a_x \exp(j(\omega t - kz + \phi_x)) & E_{0x} &= E_0 a_x \exp(j\phi_x) & |E_0| &= \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \\ \vec{E}_y(z,t) &= \vec{1}_y E_0 a_y \exp(j(\omega t - kz + \phi_y)) & E_{0y} &= E_0 a_y \exp(j\phi_y) & \sqrt{a_x^2 + a_y^2} &= 1 \\ \vec{E}(z,t) &= \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t) = E_0 \left(\vec{1}_x a_x \exp(j\phi_x) + \vec{1}_y a_y \exp(j\phi_y) \right) \exp(j(\omega t - kz))\end{aligned}$$

- Polarizacija svetlobe je določena z razmerjem amplitud in fazno razliko $\phi = \phi_y - \phi_x$ ortogonalnih komponent.

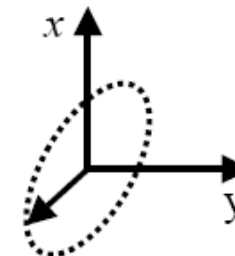
linearna polarizacija
 $\phi = 0, \pm\pi$



krožna polarizacija
 $\phi = \pm\pi/2, E_x = E_y$



eliptična polarizacija



KROMATSKA (BARVNA) DISPERZIJA

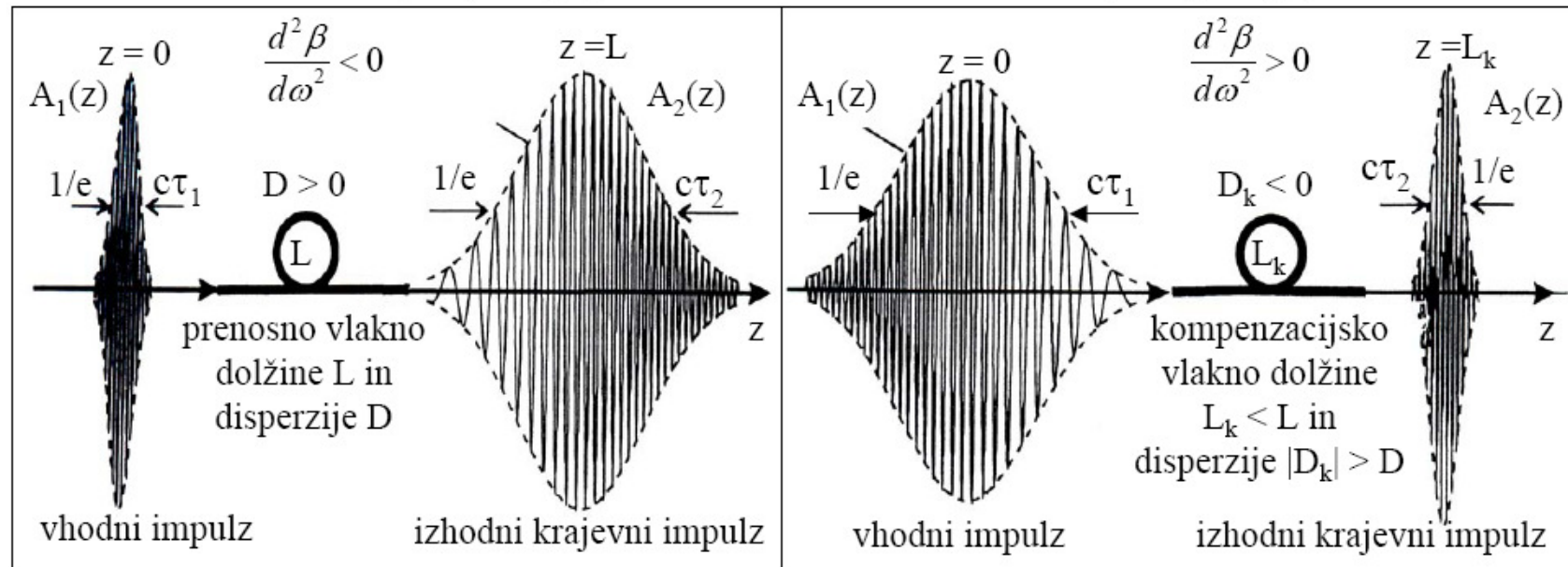
Podobnega pomena kot razklon vidne svetlobe na prizmi je kromatska (snovna in valovodna) disperzija v kremenovem vlaknu. V prenosnem mediju, čigar prenosna karakteristika $\beta(\omega)$ odstopa od linearne frekvenčne odvisnosti, se posamezni deli spektra signala različnih frekvenc širijo z različno skupinsko hitrostjo (razpršitev skupinske hitrosti). Je linearnen pojav, pri katerem se ohranja amplituda prenašanega spektra, zakasnitev (oz. hitrost širjenja) spektralnih komponent pa se spremeni, zato se ovojnica (impulz) razširi tem bolj, čim večja je širina $\Delta\lambda$ spektra.

$$\Delta\tau_g = DL\Delta\lambda \qquad D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \qquad n_e = \frac{\beta}{k_0}$$

$\Delta\tau_g$ razširitev impulza D disperzijski koeficient v ps/nm/km n_e efektivni lomni količnik

razširitev (ekspanzija)

skrčitev (kompresija)



DISPERZIJSKI KOEFICIENT KROMATSKE DISPERZIJE

1. Splošna opredelitev disperzijskega koeficienta drugega reda:

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

$D > 0$ višje frekvence prehitvajo nižje

$D < 0$ nižje frekvence prehitvajo višje

2. Disperzijski koeficient snovne disperzije:

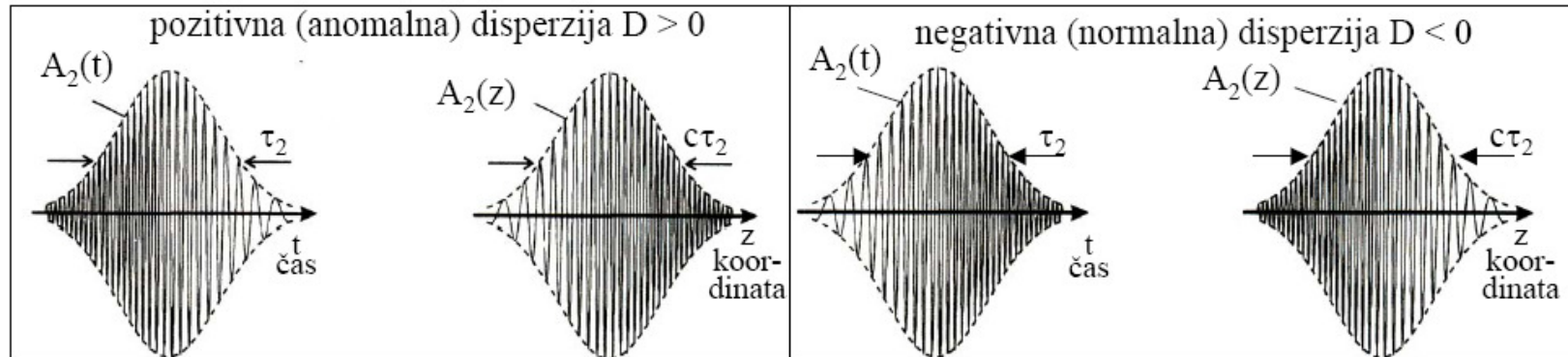
$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

n lomni količnik snovi (jedra ali obloge)

3. Disperzijski koeficient valovne disperzije:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left(\frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_e}{d\lambda^2}$$

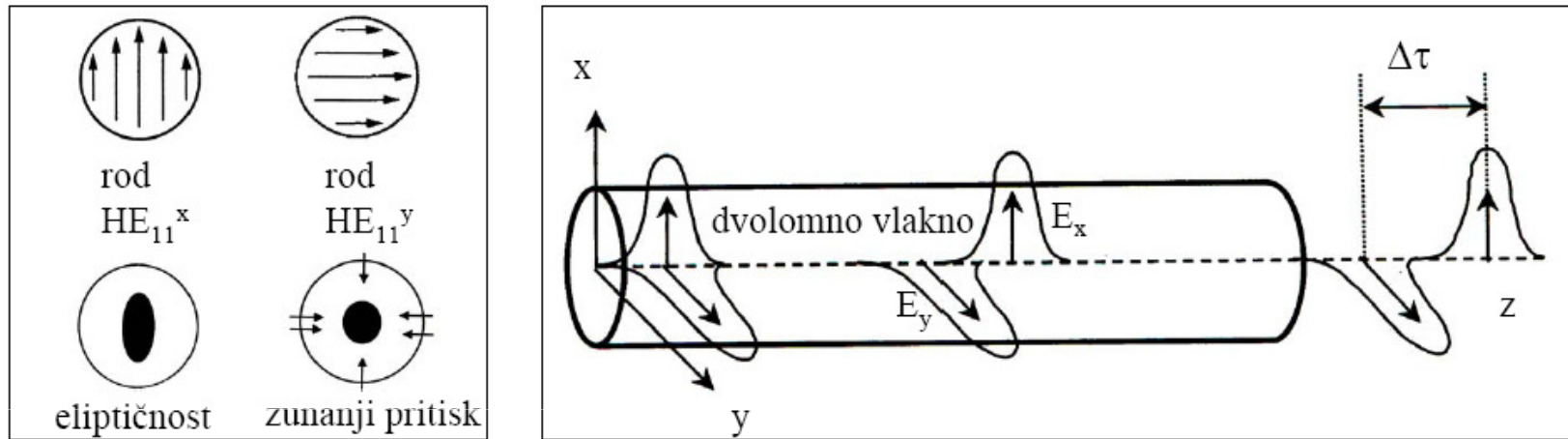
n_e efektivni lomni količnik valovodnega rodu HE_{11}



Razširjen in notranje frekvenčno prerazporejen impulz na koncu vlakna pri pozitivni ($D > 0$) in negativni ($D < 0$) disperziji. Običajne vrednosti disperzijskega koeficienta so 0 do ± 20 ps/nm/km. **Kromatska disperzija je linearen pojav in je zato tehnično lažje obvladljiva.**

POLARIZACIJSKA RODOVNA DISPERZIJA

Naključna dvolomnost (različna skupinska hitrost širjenja dveh ortogonalnih polj) vzdolž optične poti (vlakna). Impulz skupne moči dveh polarizacij se raztegne.



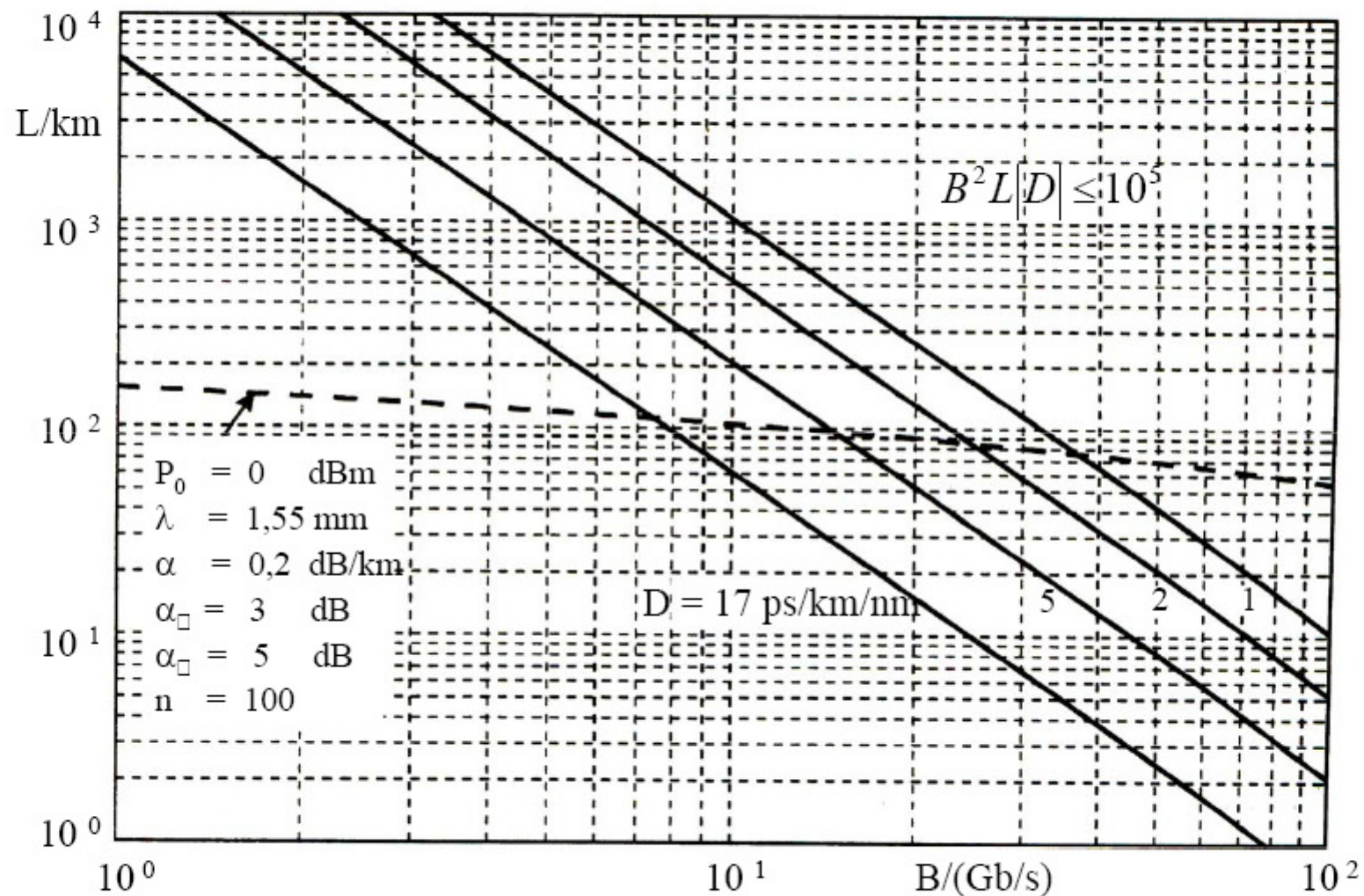
Povprečna vrednost diferenčne skupinske zakasnitve

$$\sigma = D_p \sqrt{L}, \quad \sigma = \sqrt{\Delta\tau^2} \quad D_p \text{ koeficient polarizacijske rodovne disperzije}$$

D_p položenih vlaken	$D_p = 0,1 - 1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$
D_p novih vlaken	$D_p = 0,05 - 0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$
D_p vrhunskih (prihodnjih) vlaken	$D_p < 0,01 - 0,05 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$

Zaradi svoje statistične narave in odvisnosti od zunanjih vplivov je polarizacijska rodovna disperzija tehnično težko obvladljiva. Postaja končna omejitev pri zelo hitrih optičnih zvezah.

2.10 DISPERZIJSKO OMEJENA ZVEZA Z OZKOPASOVNI LASERJEM



Prikaz dosega L/km optične zveze, ki uporablja zunanje moduliran ozkopasovni laser širokopasovno modulacijo ($\Delta\nu \ll \Delta f$), v odvisnosti od bitne hitrosti $B/(\text{Gb/s})$ pri neka vrednostih disperzije $D(\text{ps/nm/km})$. Kot primer je prikazana omejitev s slabljenjem pri $\lambda =$

2.11 LASTNOSTI DISPERZIJE

1. Disperzija je **linearen in aditiven pojav**. Zato lahko disperzijo kompenziramo na načinov s konkatencijo vlaken različnoimenske disperzije.
2. **Snovna in valovna disperzija** vlakna sta v valovnem področju optičnih komunikacij znaku nasprotni, kar spričo aditivnosti disperzije omogoča njuno medsebojno kompenzacijo
3. Disperzija povzroča **prerazporeditev spektralnih komponent** signala znotraj razširjenega impulza. Kompenzirati jo je mogoče zato s pojavi, ki bi povzročili nasprotno razporeditev spektralnih komponent, npr.
 - nelinearni pojav lastne fazne modulacije
 - nasprotna fazna modulacija vhodnega impulza (žvižg laserja)
4. Disperzijo lahko koristno uporabimo za **kompenzacijo** nekaterih nelinearnih pojavov zmanjšanje njihovih posledic (glej štirivalovno mešanje).
5. Pozitivna disperzija vlakna in nelinearni pojav lastne fazne modulacije, omogočata nastanek in širjenje **solitonov**. To so impulzi vrste RZ, ki med širjenjem po disperznem in nelinearnem vlaknu pod določenimi pogoji ohranjajo svojo prvotno obliko.

4.15 OMEJITVE S KROMATSKO DISPERZIJO

Omejitveni pogoj $B^2|D|L < 104.000$ (Gb/s) ps/nm

Omejitev dolžine L prenosnega vlakna različne disperzije D (ps/nm/km) pri nekaterih B hitrostih B (Gb / s) in omejitev dopustne vrednosti $T = |D|L$ (ps/nm) :

- vlakno SMF (G.652) disperzije $D = 17$ ps/nm/km in dolžine L_1
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 8$ ps/nm/km in dolžine L_2
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 4$ ps/nm/km in dolžine L_3

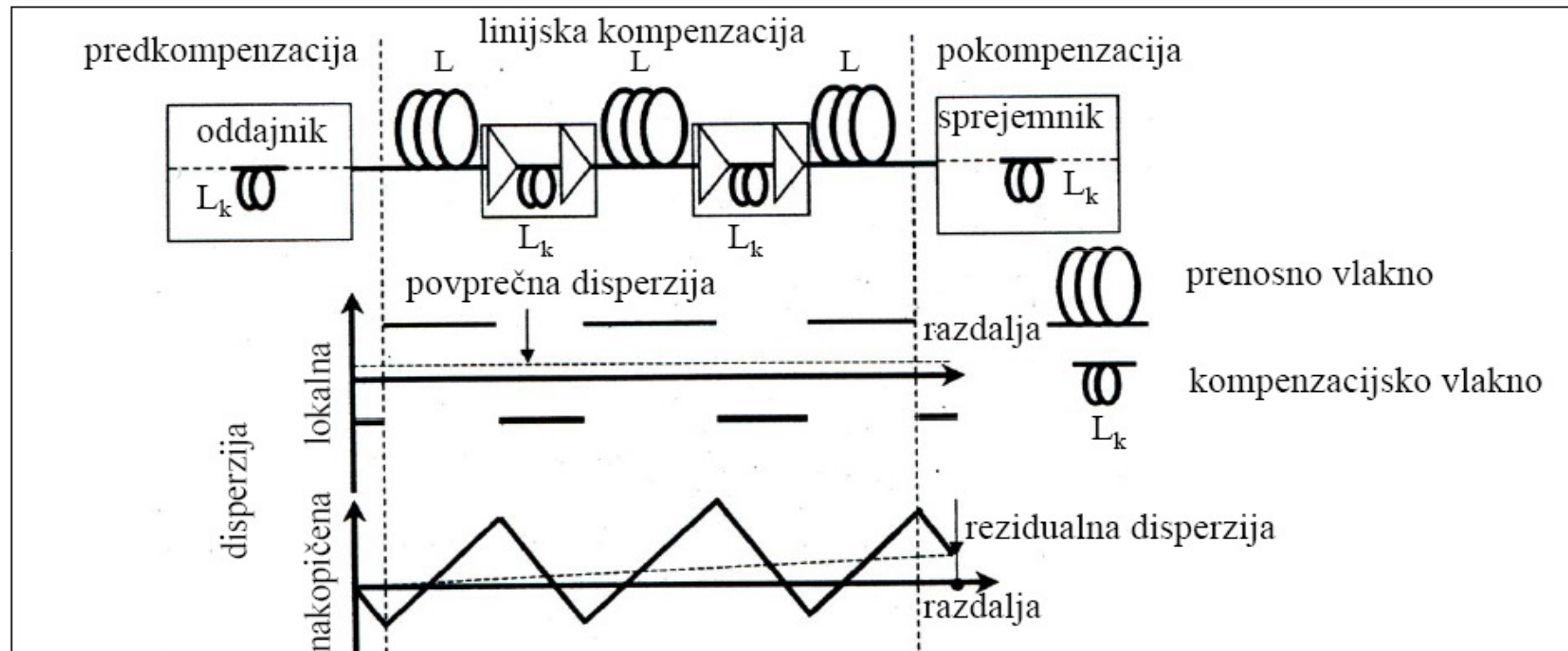
B (Gb/s)	L_1 (km)	L_2 (km)	L_3 (km)	T (ps/nm)
2,5	1000	2000	4000	
10	60	130	250	1000
40	4	8	16	65
80	1	2	4	16
160	0,25	0,5	1	4

Na optičnih zvezah, ki uporabljajo ozkopasovni laserski vir (dioda DFB ali DBR z zur modulacijo), omejuje disperzija doseg zveze pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s. Pri manjših B hitrostih $B < 10$ Gb/s je zveza omejena predvsem s slabljenjem.

Optična kompenzacija disperzije-princip⁸⁴

- **Mesto kompenzacije:**

- **predkompenzacija** (oddajnik: kompenzacijsko vlakno, modulacija žvižga)
- **linijska kompenzacija** (na odsekih prenosnega vlakna)
- **pokompenzacija** (sprejemnik: kompenzacijsko vlakno)

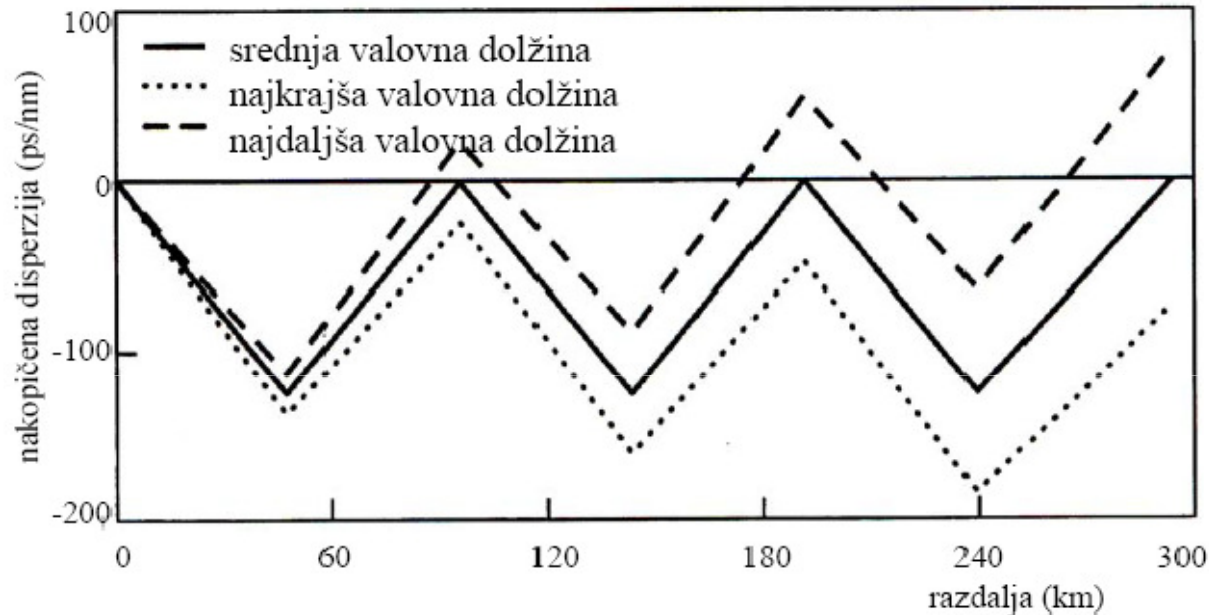


- **Načela:**

- **visoka vrednost lokalne disperzije** ($D > 4$ ps/nm/km) je potrebna za kompenzacijo nelinearnih pojavov.
- **nizka vrednost nakopičene (integralne) disperzije** na vhodu v sprejemnik je potrebna za zniževanje bitnega pogreška

Nakopičena disperzija

Prikaz nakopičene disperzije srednjega in obeh skrajnih kanalov zveze WDM, sestavljene iz šestih kompenzacijskih odsekov.



- odseki dolžine 50 km z disperzijo $D = \pm 2,5$ ps/nm/km
- kompenzacija rezidualne disperzije kanalov v sprejemniku

$$\text{Strmina disperzije} \quad S = \frac{dD}{d\lambda} \quad (\text{ps/nm}^2/\text{km})$$

$$\text{Disperzija } i \text{ - tega kanala} \quad D_i = D_0 \pm iS\Delta\lambda$$

Koliko je vreden čas pri disperzijski kompenzaciji?

Primer:

disperzija:

$$D = 4 \text{ ps/nm/km}$$

dolžina vlakna:

$$L = 10^8 \text{ km}$$

kompenziran čas:

$$t_k = 4 \cdot 10^{-4} \text{ s/nm}$$

strošek kompenzacije

$$S = 10^9 \text{ \$}$$

cena za kompenzacijo

sekunde/nm: $\Sigma = 0,25 \cdot 10^{13} \text{ \$}$



Podatki o disperziji vlaken

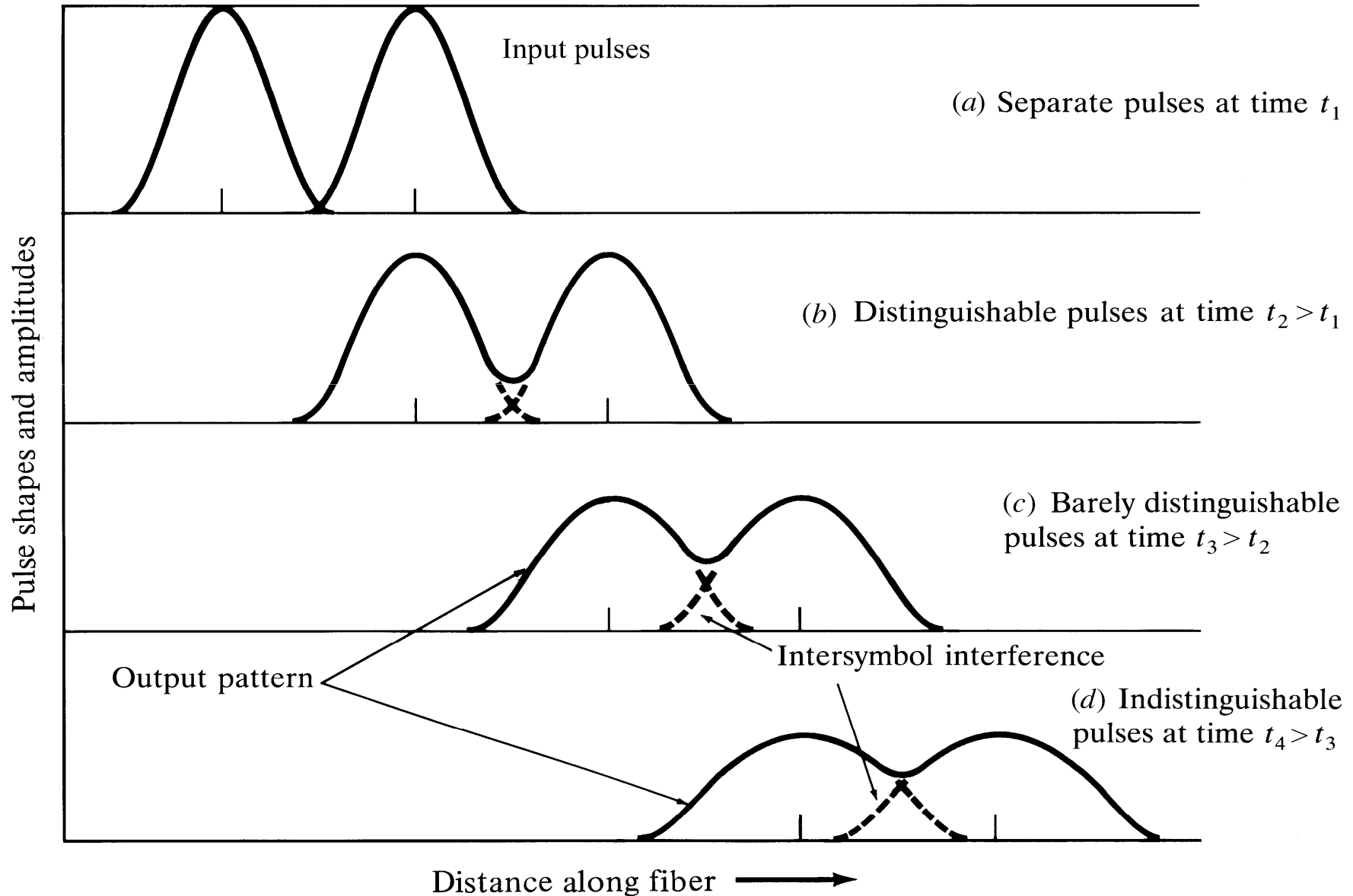
	Premer svetlobnega jedra (μm)	Efektivna površina (μm^2)	D_{1550} ps/nm/km	Strmina ps/nm ² /km	Mejna valovna dolžina (nm)
NZDSF (LEA) (G655)	9.4	72	4.5	0.085	≤ 1480
NZDSF (RS) (G655)	8.3	52	4.0	0.045	≤ 1260
SMF (G652)	10.5	80	17	0.080	≤ 1260

NZDSF ... Enorodovno vlakno z nenično disperzijo

LEA ... Velika efektivna površina
RS ... Znižana strmina

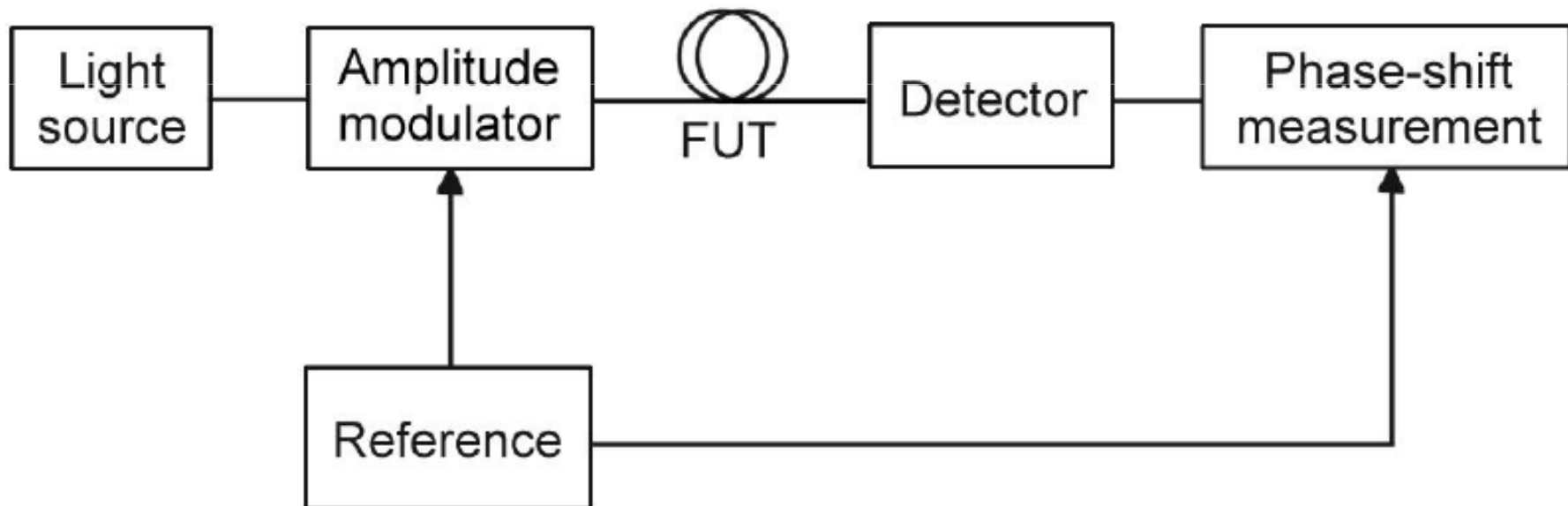
SMF ... Enorodovno vlakno

Popačitev RZ impulzov na vlaknu



Disperzija – merilni princip

$$D = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{2\pi f_m} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}$$



Konec