



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA

KATEDRA TELEKOMUNIKÁCIÍ A MULTIMÉDIÍ

Ťmenie a disperzia optických vlákien

Prednáška č. 3

J. Dubovan

Tlmenie optických vlákien

Mechanizmy vzniku tlmenia

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

- Vo všetkých typoch optických vlákien dochádza ku stratám aj keď je optické vlákno prostredie s pomerne nízkymi stratami. Existuje niekoľko mechanizmov ako k tomuto javu dochádza. Môžeme ich rozdeliť na tieto tri základné skupiny

straty absorpciou

straty rozptylom

straty manipuláciou a spájaním

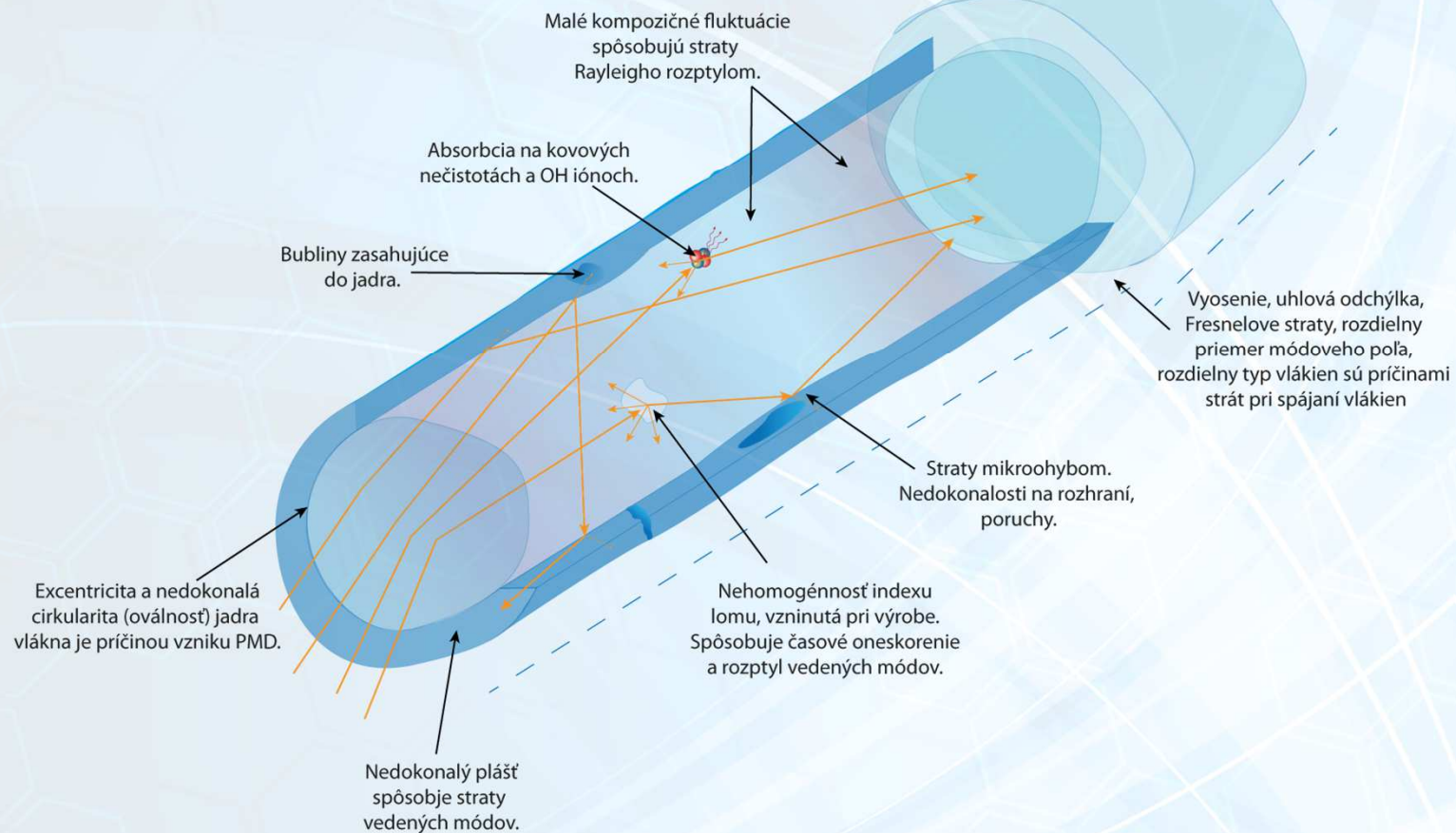
} intrinzické (vlastné)

– extrinzické (nevlastné)

- Optické vlákno ako prenosové médium začalo byť zaujímavé keď prenosové straty klesli pod úroveň 5 dB.km^{-1} .

Procesy vedúce k tlmeniu optického vlákna

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



Spektrum strát pre intrinzičné stratové mechanizmy v čistom $\text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$ vlákne

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

▪ Absorpcia v UV oblasti

objavuje sa pri kratších vlnových dĺžkach a je spôsobená v dôsledku vybudenia elektrónov.

▪ Absorpcia v IR oblasti

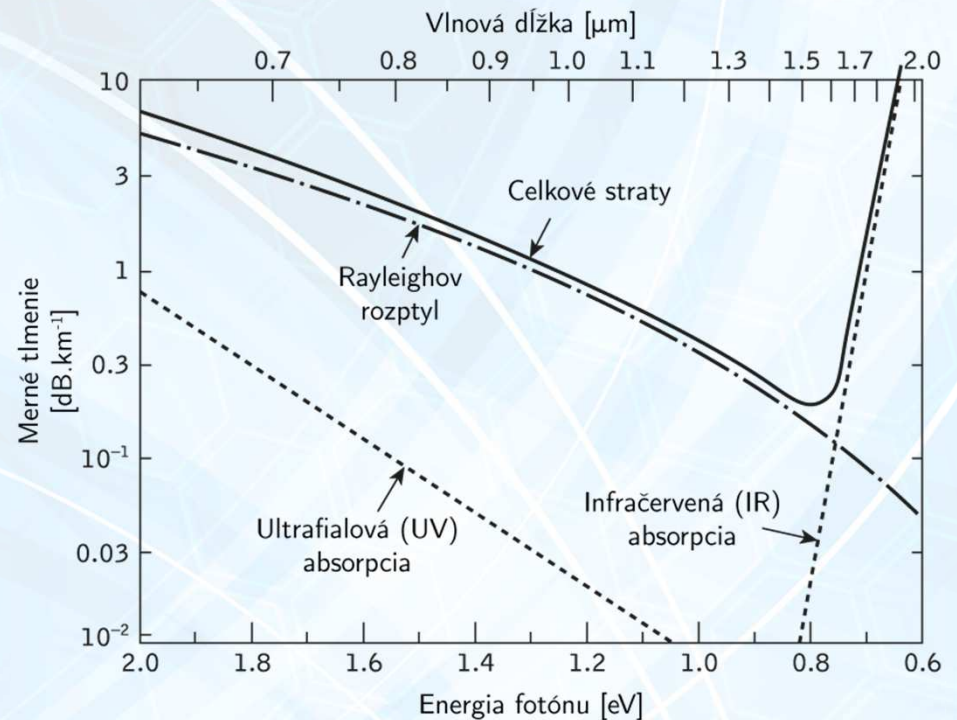
objavuje sa pri dlhších vlnových dĺžkach a je spôsobená v dôsledku vybudenia molekulových kmitov v SiO_2 .

▪ Absorpcia na nečistotách

spôsobená rôznymi nečistotami na atómovej úrovni (kovy – Cr, Cu, Ag) alebo molekulovej úrovni (hydroxidové zlúčeniny – OH^- ióny).

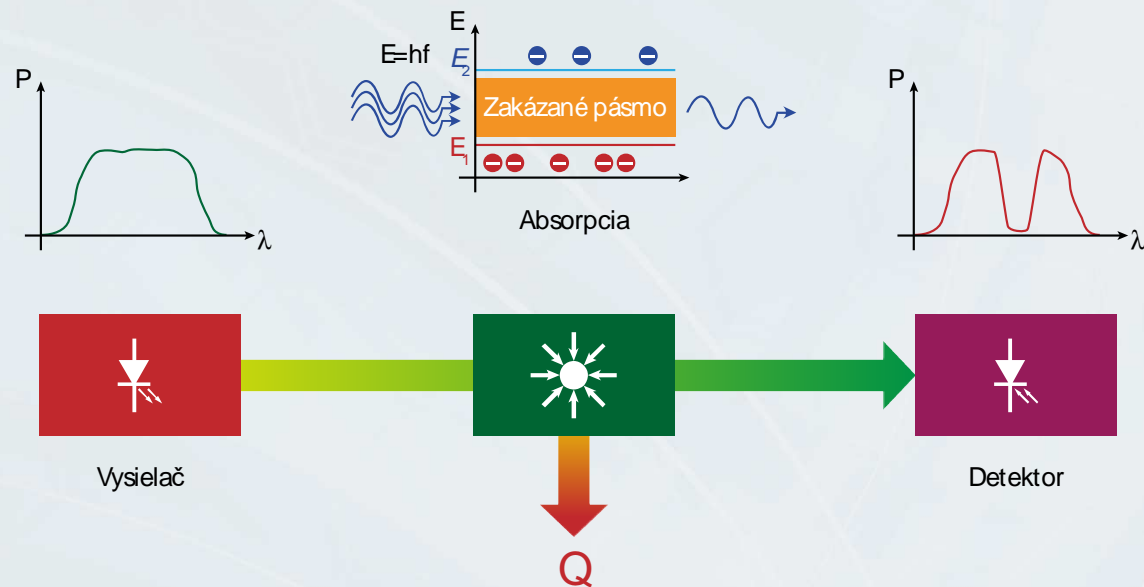
▪ Rayleighov rozptyl

spôsobený zmenami indexu lomu, ktoré trvalo vznikajú pri výrobnom procese, pričom sa jedná o dominantný rozptylový proces nepriamoúmerný λ^4 .



Straty absorpciou

Mieru absorpcie vyjadrujeme pomocou tzv. *absorpčného koeficientu*. Voľné atómy v plynnom stave sú podľa Kirchhoffovho zákona tepelného vyžarovania—schopné absorbovať žiarenie o rovnakých vlnových dĺžkach aké samé vyžarujú. Výsledkom sú napríklad Fraunhoferove čiary v slnečnom spektre. Absorpcia svetla ovplyvňuje disperziu a je príčinou vzniku tzv. *anomálnej disperzie*.



Selektívna absorpcia

Dopad na určitú časť spektra

Neutrálna absorpcia

Dopad na celé spektrum rovnako

Spojité a čiarová absorpcia

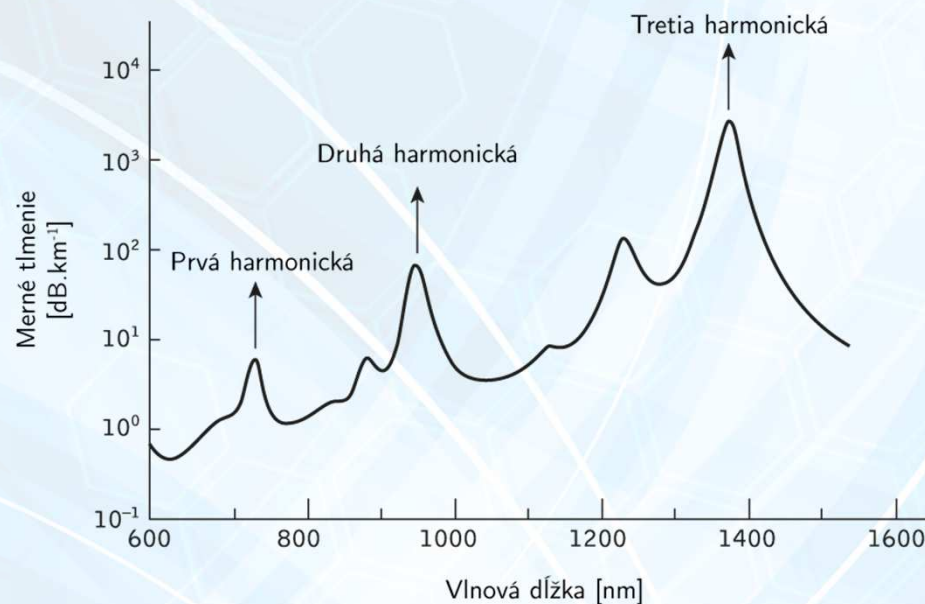
Absorpcia spôsobená nečistotami

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Absorpčné straty spôsobené niektorými najčastejšími kovovými iónmi v skle

	Absorpčné maximum [nm]	Jedna častica z 10^9 [dB.km ⁻¹]
Cr ³⁺	625	1,6
Co ²⁺	685	0,1
Cu ²⁺	850	1,1
Fe ²⁺	1100	0,68
Fe ³⁺	400	0,15
Ni ²⁺	650	0,1
Mn ³⁺	460	0,2
V ⁴⁺	725	2,7

Absorpčné spektrum pre hydroxidové nečistoty (OH⁻ ióny) v kremíku



24 Cr

Chróm

27 Co

Kobalt

29 Cu

Meď

26 Fe

Železo

28 Ni

Nikel

25 Ni

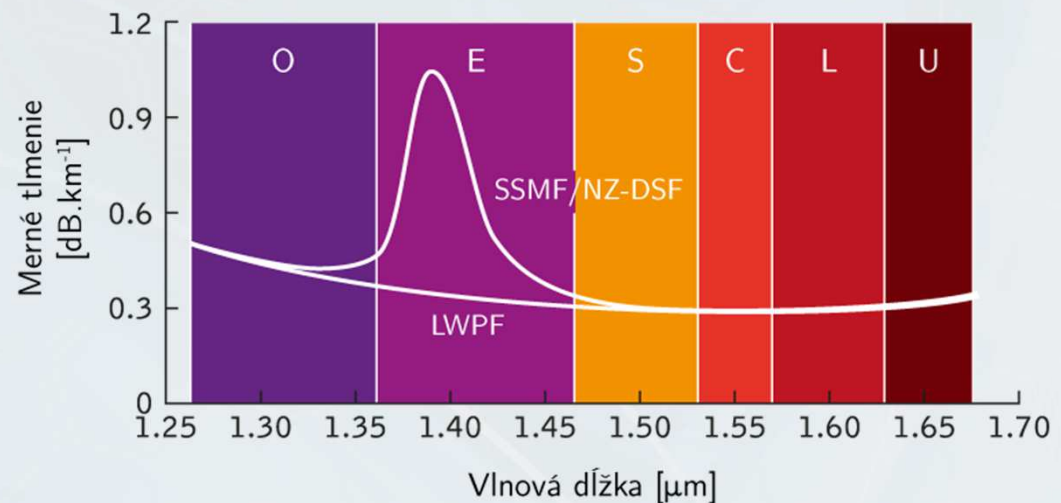
Mangán

23 V

Vanád

Pásma optických vlákien

Pre jednoduchšiu orientáciu v rámci prenášaných vlnových dĺžok používame tieto (ITU-T) označenia pásiem v rámci konvenčných telekomunikačných vlákien.

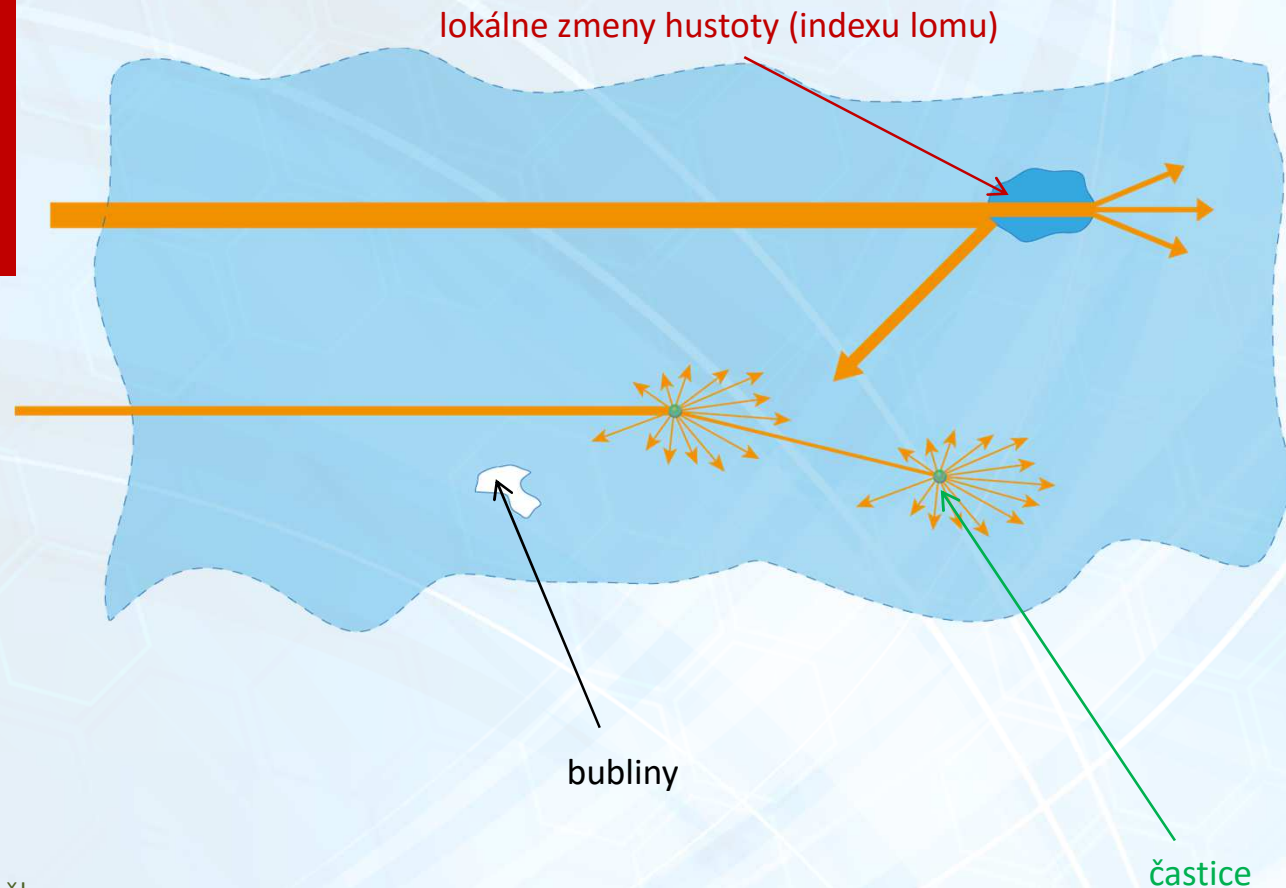


Názov pásma	ITU ozn.	λ [μm]
Original band	O-band	od 1,26 do 1,36
Extended band	E-band	od 1,36 do 1,46
Short band	S-band	od 1,46 do 1,53
Conventional band	C-band	od 1,53 do 1,565
Long band	L-band	od 1,565 do 1,625
Ultralong band	U-band	od 1,625 do 1,675

Rozptyl a rozptylové centrá

ŽILinská univerzita v Žiline

Rozptyl je **fyzikálny jav**, ktorý spôsobuje, že vlnenie (svetlo, zvuk, ...) alebo pohybujúce sa častice (žiarenie) sú **odchyľované** z priamej dráhy vplyvom drobných porúch (nehomogenít) prostredia, ktorým vlnenie (častica) prechádza.



- poruchy kryštalografickej mriežky
- nerovnomernosti povrchu

Rozptyl v optických vlákna

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

▪ Pružný rozptyl (lineárny)

Rayleighov rozptyl

Mieov rozptyl

Tyndallov rozptyl

} nedochádza k energetickým zmenám

▪ Nepružný rozptyl (nelineárny)

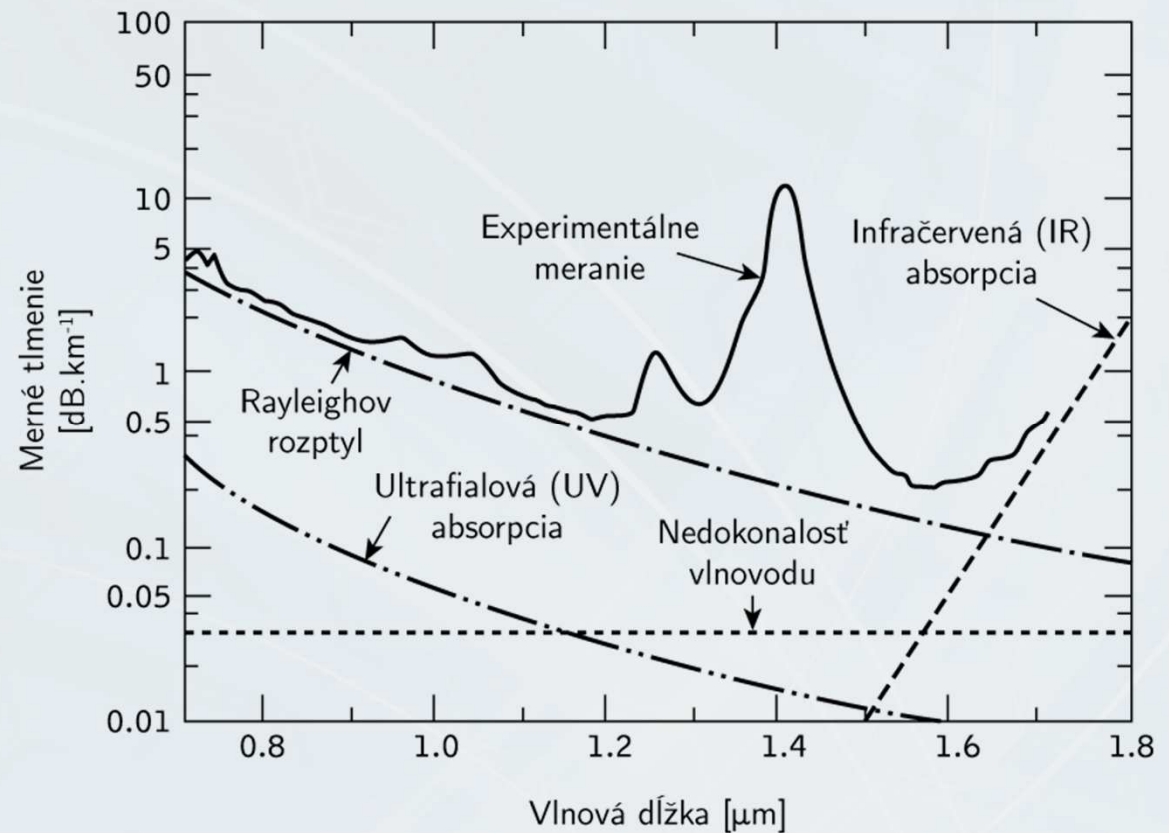
Brillouinov rozptyl

Ramanov rozptyl

} dochádza k energetickým zmenám

Tlmenie optického vlákna

Ukážka nameraného tlmenia optického vlákna s nízkym tlmením (plná čiara) s vypočítaným spektrom tlmenia za predpokladu niektorých mechanizmov tlmenia prispievajúcich k celkovým stratám (čiarkované a bodkočiarkované čiary).



Spájanie optických vlákien

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

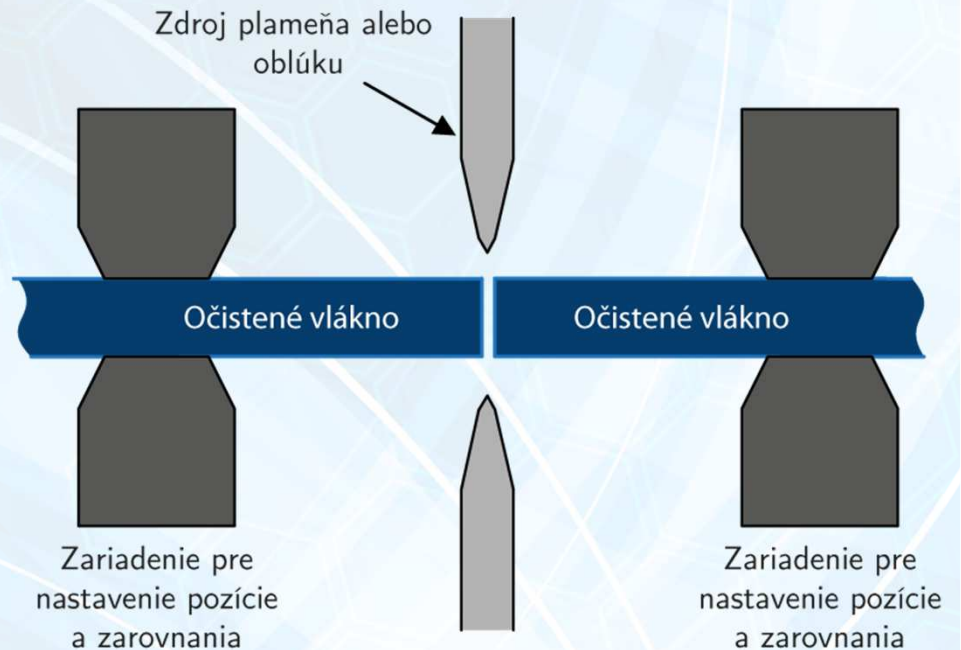
Pri vytváraní optických trás sa tak ako u ostatných komunikačných systémoch stretávame s prvkami pre **spájanie, rozvetvovanie a zakončovanie** prenosového média, t. j. optického vlákna.

Rozpoznávame tieto druhy spojenia:

- zdroj – vlákno
- vlákno – vlákno
- vlákno – detektor

Väčšina výrobcov zdroje a detektory svetla pre komerčných užívateľov zakončuje krátkym úsekom optického vlákna (**pigtail**), preto pri budovaní optického spojenia v praxi prichádzajú do úvahy predovšetkým spoje typu **vlákno-vlákno**.

Zváranie vlákien



Správny zvar

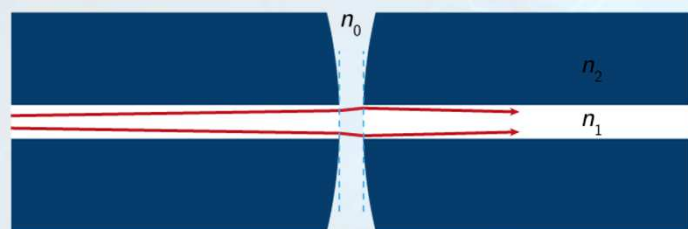


Chyby zvarov



Fresnelove straty

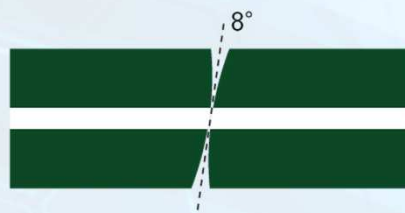
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



(a) Fresnelove straty



(b) Physical Contact (PC)



(c) Angled Physical Contact (APC)

$$r = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

$$L_F = -10 \log (1 - r) \quad [\text{dB}]$$

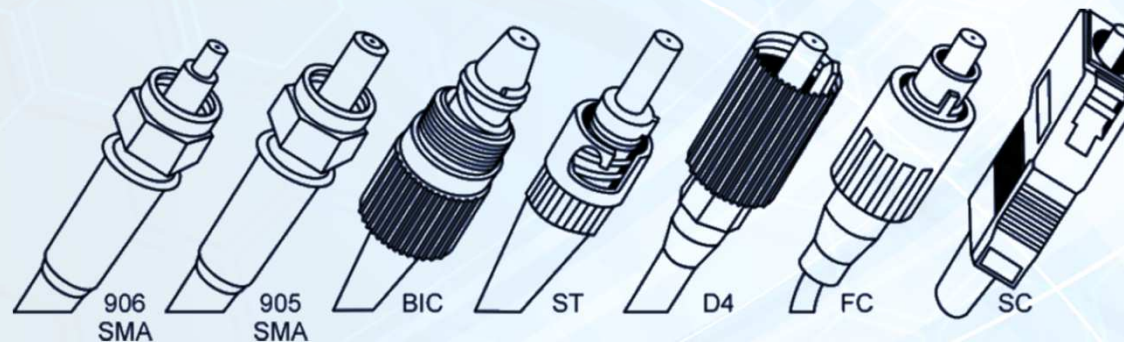
Aj keď budú oba konce spájaných OV dokonale hladké, kolmé a ich osi ležia na tej istej priamke, určitá časť naviazaného svetla je z rozhrania týchto vlákien odrazená späť do budiaceho vlákna. Tento jav, známy ako Fresnelov odraz, je spojený so skokovou zmenou indexu lomu na rozhraní a možno ho opísať klasickým Fresnelovým vzorcom.

Riešenie: Imerzná kvapalina

Optické konektory

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

- Optický konektor by mal byť použiteľný pre vlnové dĺžky od 1300 do 1650 nm.
- Každé optické spojenie pozostáva z dvoch zásuvných častí a jedného adaptéra. Optický adaptér by mal byť vyrobený z takých materiálov, ktoré budú garantovať mechanickú odolnosť voči nárazu, tlaku, jednoduchú manipuláciu, tepelnú odolnosť a nehorľavosť týchto častí.
- Vytvorenie ľahko ručne rozoberateľného dočasného spojenia OV.
- jednoduchá manipulácia, Používajú sa vo vnútri budov, ale aj v prepojovacích šachtách, resp. skriniach umiestených vo vonkajšom prostredí.
- Konektory sú jednovláknové resp. mnohovláknové.
- Na konektory sú kladené tieto hlavné požiadavky:
 - rozoberateľnosť,
 - opakovateľnosť spojenia bez zníženia väzobnej účinnosti,
 - odolnosť voči klimatickým vplyvom.



-

Prenosové média - III. prednáška

Vybrané vlastnosti konektorov

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Prenosové charakteristiky

- Vlnový rozsah
- Vložné straty
- Spätné straty
- Polarizačne závislé straty
- Polarizačne závislý odraz
- Dovoľený vstupný výkon

Podmienky okolia

- Zmena teploty
- Odolnosť voči vibráciám
- Odolnosť voči vlhkosti
- Životnosť

Vybrané vlastnosti konektorov

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

- **Konštrukcia kolíka konektora (Ferrule construction)**

Konštrukcia kolíka (ferrule) musí byť z takého materiálu, ktorý zabezpečí dostatočne pevné uchytenie samotného optického vlákna počas celej doby životnosti konektora. Materiál kolíka (ferrule) musí mať taký koeficient teplotnej rozťažnosti, aby pri prípadných teplotných zmenách výrazne neovplyvňoval prenosové charakteristiky konektora. Tvar a konštrukcia kolíka (ferrule) musí zabezpečiť také centrovanie optického vlákna, aby boli splnené všetky prenosové parametre.

- **Potlačenie tolerancie plášťa vlákna (Cladding diameter tolerance elimination)**

Podľa požiadaviek musí byť priemer plášťa vlákna 125 μm s toleranciou $\pm 1 \mu\text{m}$ (tolerancia podľa ITU-T G.652 je $\pm 2 \mu\text{m}$). S ohľadom na minimalizovanie neurčitej polohy vlákna v kapiláre kolíka (ferrule) v dôsledku tolerancie plášťa a jeho excentricity, musí byť táto vhodným spôsobom korigovaná tak, aby konektor spĺňal predpísané prenosové parametre počas celej doby životnosti.

- **Potlačenie chyby sústrednosti mórového poľa (Mode field concentricity error elimination)**

Podľa požiadaviek nesmie chyba sústrednosti mórového poľa presiahnuť $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (v špecifikácii ITU-T G.652 je $\pm 1 \mu\text{m}$). Z dôvodov minimalizácie toho, že (vláknové) jadro vlákna i napriek vycentrovaniu pomocou vonkajšieho priemeru bude vychýlené z osi kolíka (ferrule), je nutné, aby bolo jadro optického vlákna centrované do rozmedzia požadovanej vyššie uvedenej hodnoty.

- **Tvar čelnej plochy (Ferrule front shape)**

Na dosiahnutie vyššej hodnoty útlmu odrazu (High Return Loss – HRL) je nutné, aby bolo čelo kolíka (ferrule) brúsené pod uhlom 8° (konektory typu APC). Pri vlastnom brúsení nesmie dôjsť k tvarovej degradácii konca vlákna, ani jeho okolia.

Vybrané vlastnosti konektorů

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINĚ

▪ *Ťahová odolnosť (Pull resistance)*

Minimálna ťahová odolnosť konektora, upevneného na optický kábel, musí byť 100 N.

▪ *Rozsah teplôt (Temperature range)*

Konektory musia byť vyrobené tak, aby vydržali takéto teplotné rozsahy pri nezhoršených predpísaných prenosových parametroch:

- teplotný rozsah pre prevádzku, resp skladovanie od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- teplotný rozsah pre montáž a manipuláciu od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

▪ *Životnosť konektora (Service life)*

Výrobca musí garantovať minimálnu životnosť konektora aspoň 1000 spojení alebo rozpojení a 15 rokov pri prevádzkovom rozsahu teplôt.

Prenosové charakteristiky konektorů

▪ *Vložné tlmenie (Insert loss - IL)*

Hodnoty vložného tlmenia konektorového spoja, merané podľa IEC 61300-3-4 a IEC 61300-3-7 musia byť takéto:

- typická stredná hodnota $IL_{AVG} < 0,15\text{ dB}$,
- maximálna hodnota tlmenia ľubovoľnej kombinácie spojení $IL_{MAX} < 0,20\text{ dB}$,
- reprodukovateľnosť spojenia $\Delta IL < \pm 0,05\text{ dB}$.

▪ *Tlmenie odrazu (Return loss - RL)*

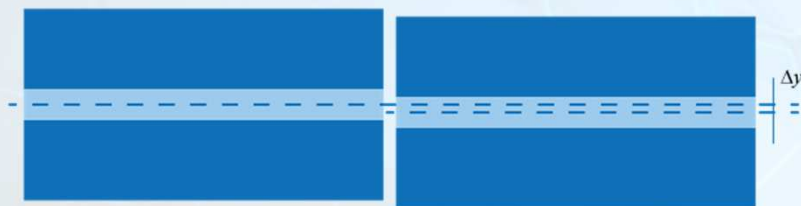
Hodnota tlmenia odrazu musí byť $RL_{MIN} > 65\text{ dB}$, meraná podľa IEC 61300-3-6.

Všetky hodnoty tlmenia odrazu musia vyhovovať pre vlnové rozsahy od 1260 nm do 1360 nm a od 1460 nm do 1625 nm.

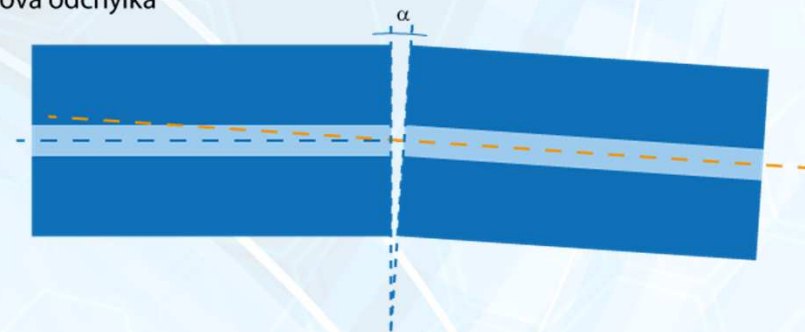
Chyby pri spájaní optických vlákien

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

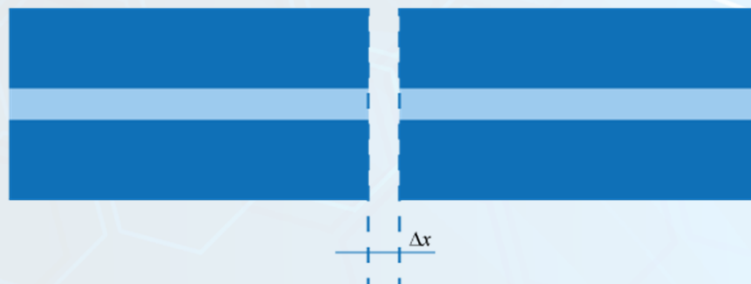
Vyosenie



Uhlová odchýlka



Nadmerná vzdialenosť



Rôznorodosť

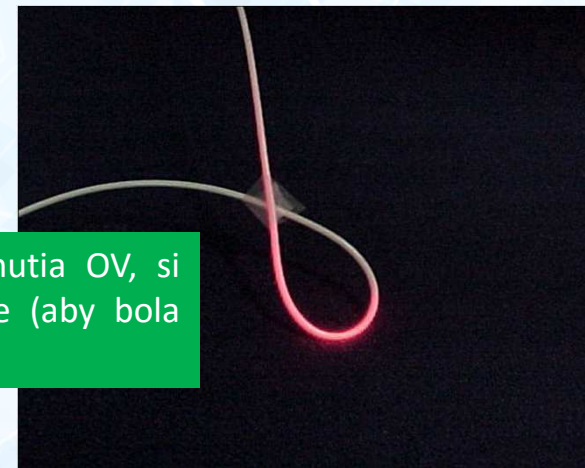


Makroohybové straty

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



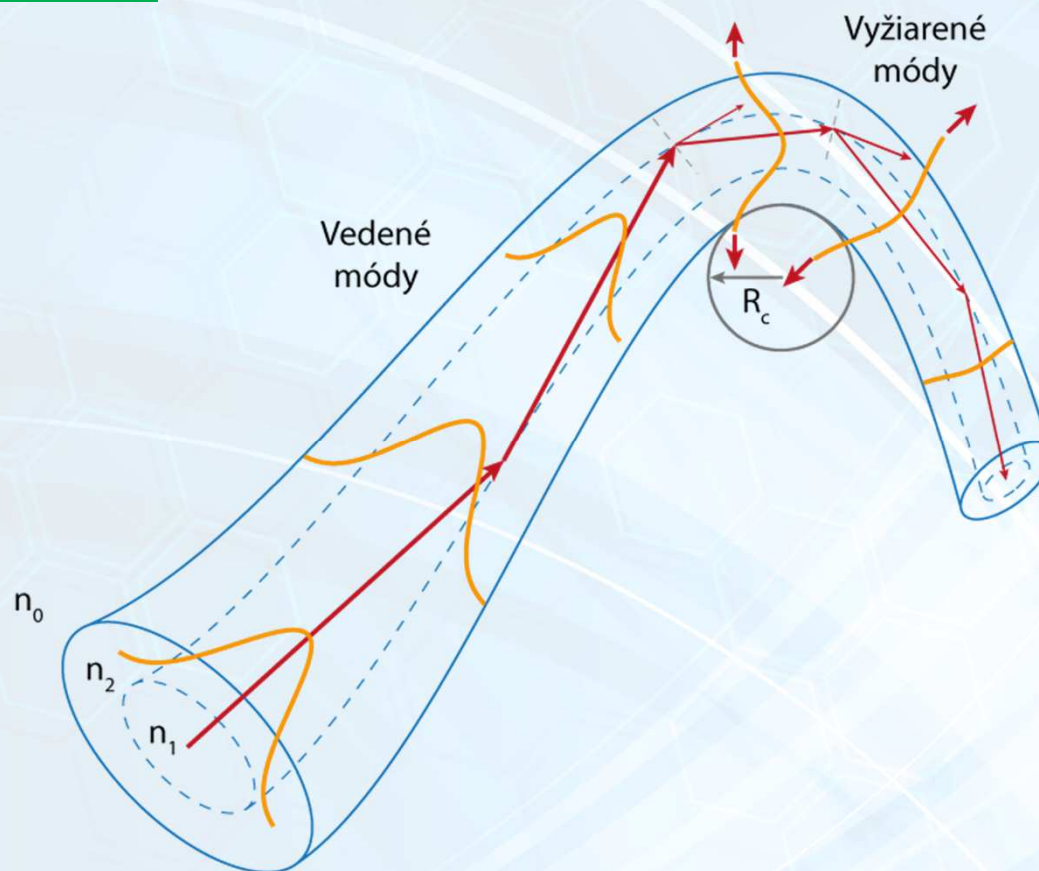
Časť elektromagnetického poľa, ktorá je na vonkajšej strane ohnutia OV, si vyžaduje šírenie pri väčšej rýchlosti ako časť na vnútornej strane (aby bola zachovaná kolmosť vlnoplochy na smer šírenia).



Kritický polomer

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Kritický polomer



Minimálny polomer ohybu

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



30 mm – G.652

15 mm – AllWave® (G.652.D)

10 mm – AllWave® FLEX (G.657.A1)

7,5 mm – AllWave® FLEX (G.657.A2)

5 mm – EZ-Bend™ (G.657.B3)

Pokles výkonu signálu so vzdialenosťou

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Vo výsledku sa na výstupe z optického vlákna prejaví tlmenie signálu.

Ako z obrázka vidíme, dochádza k exponenciálnemu poklesu výkonu so vzdialenosťou.

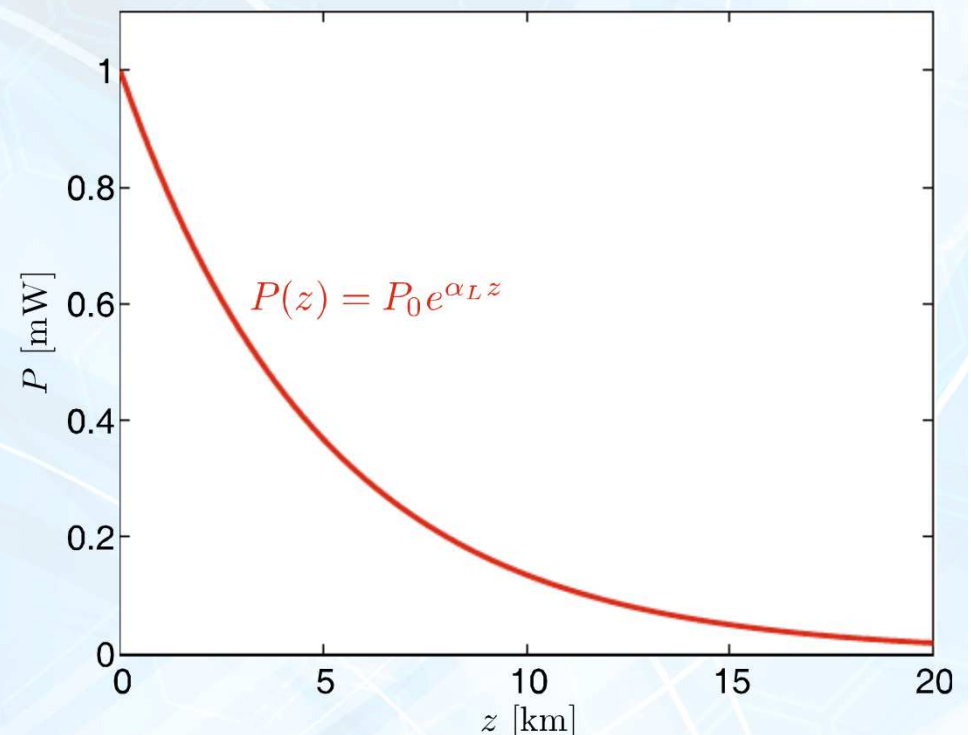
Tlmenie optického vlákna vypočítame ako

$$\alpha_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad [\text{dB}]$$

Alebo pomocou úrovni

$$\alpha = P_i^* - P_o^* \quad [\text{dB}].$$

Zmena výkonu signálu so vzdialenosťou

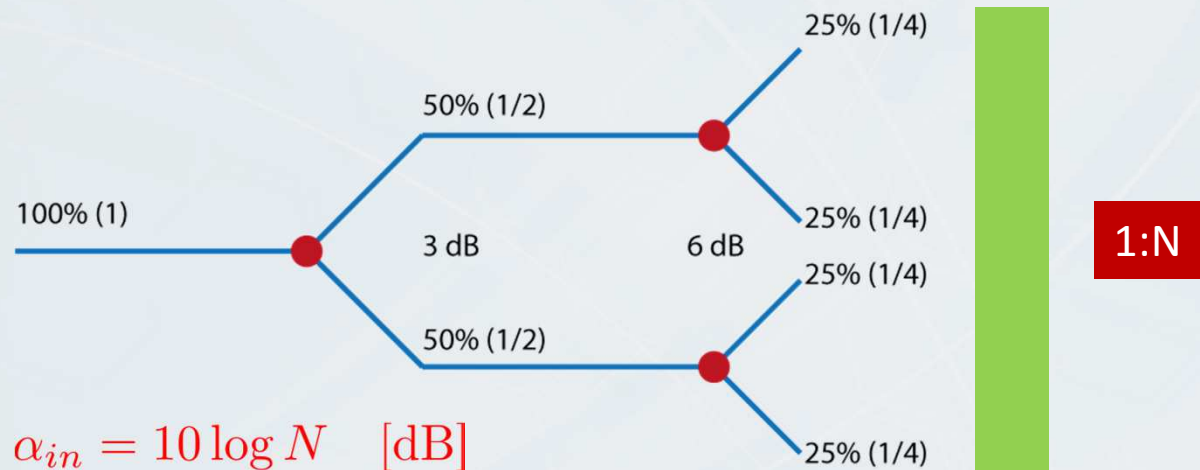
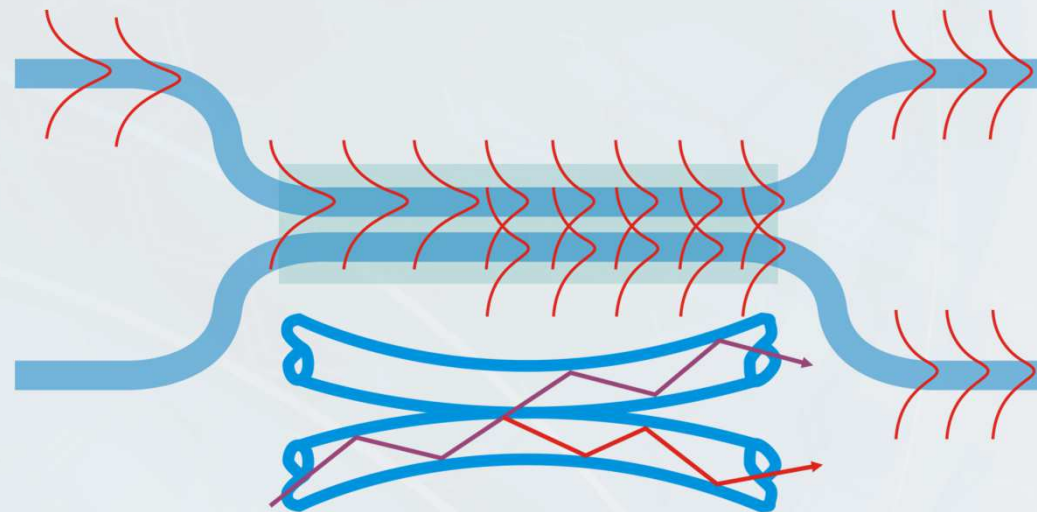


Pasívne optické členy - delič

Slúži na zlučovanie alebo rozbočovanie optického signálu. Je jedným z primárnych prvkov sietí FTTx.

Existujú viaceré možnosti vytvorenia optického člena.

Najčastejšie je potreba vytvoriť delič 1:N (1:2, 1:4, 1:16, 1:32, 1:64, prípadne 1:128).



Fúzny delič

Disperzia v optických vláknach

Rozdelenie disperzií

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Intramodálna

Intermodálna

CD
(SM,MM)

Materiálová
disperzia

Vlnodová
disperzia

Profilová
disperzia

Módová
disperzia

(MM)

Polarizačná
módová disperzia

(SM)

Materiálová disperzia

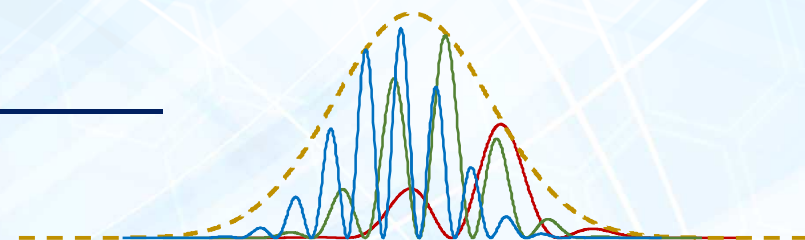
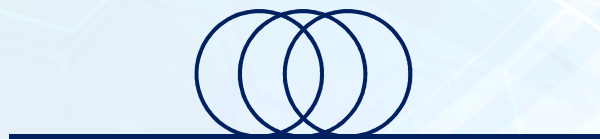
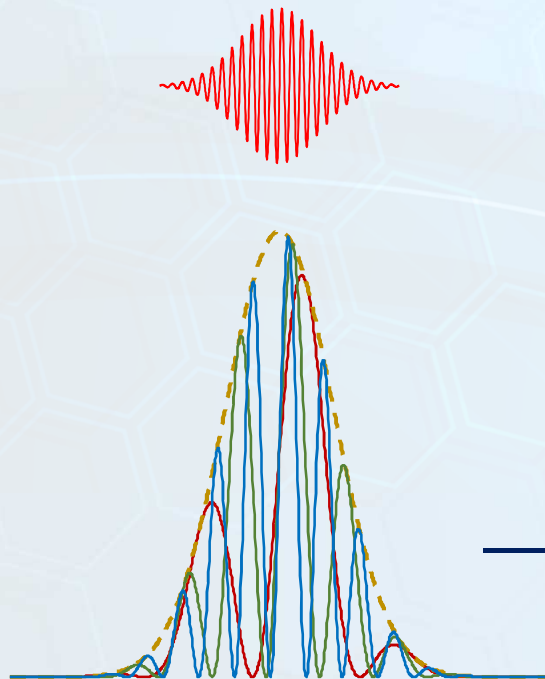
ŽILinská UNIVERZITA V ŽILINE

GVD

Spektrum

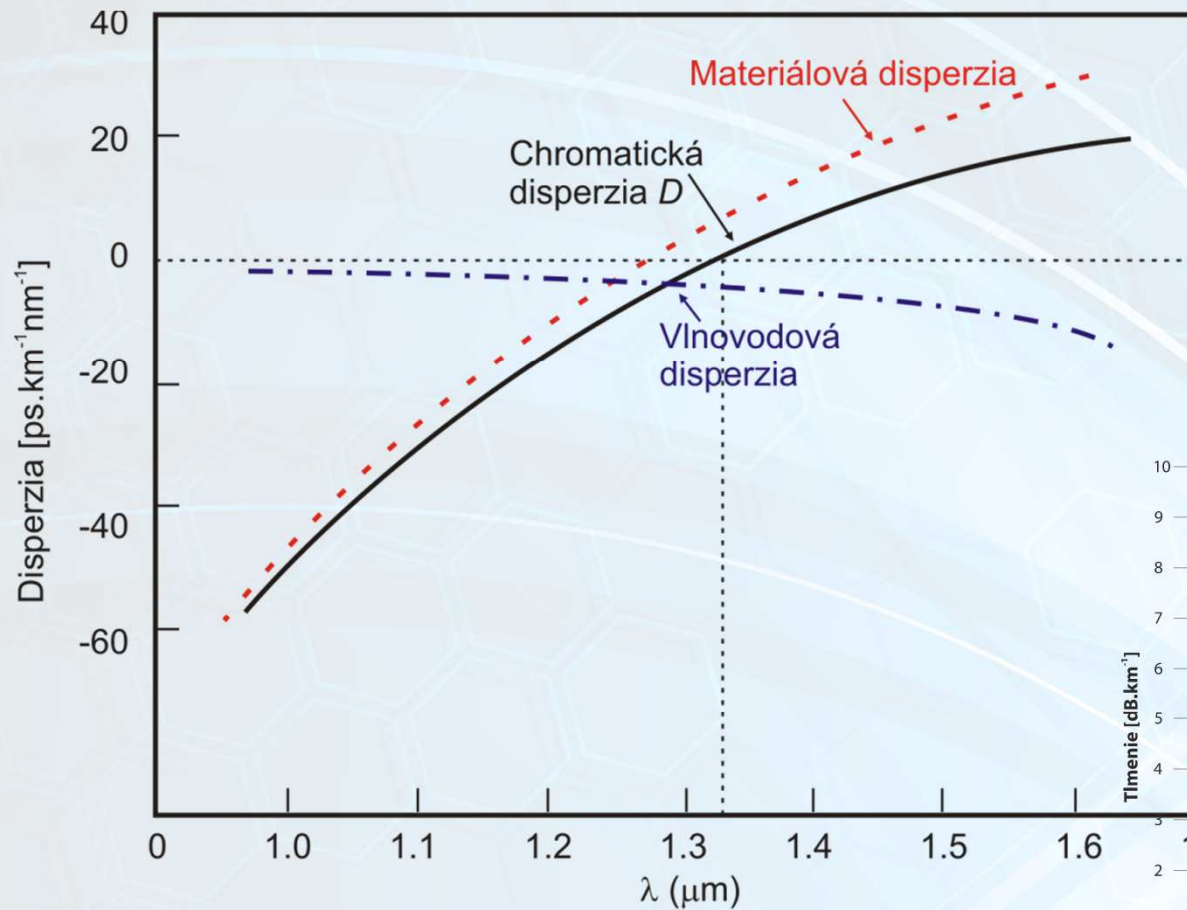
$$D_M = \frac{\delta\tau_m}{L \cdot \Delta\lambda}$$

Spektrum



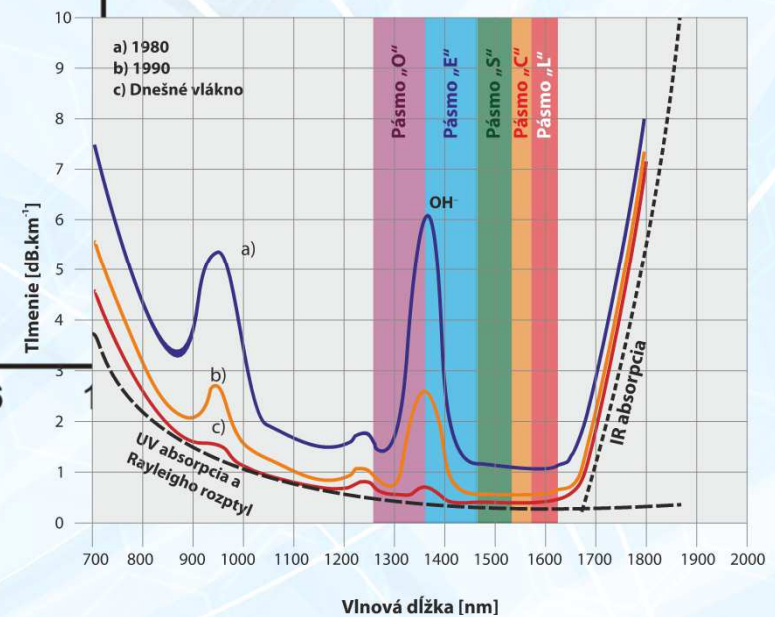
Chromatická disperzia

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



$D < 0$ – normálna disperzia

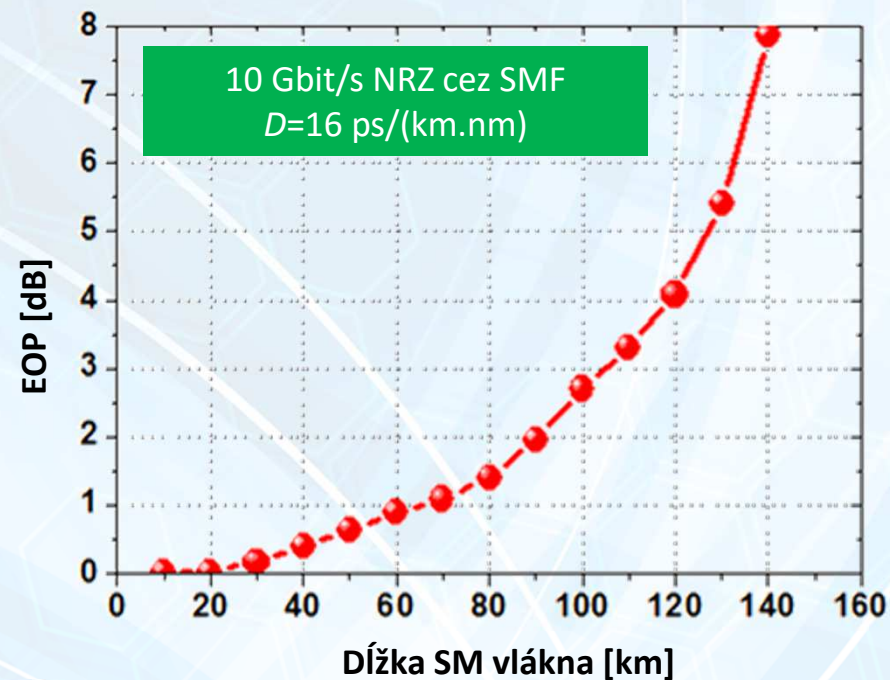
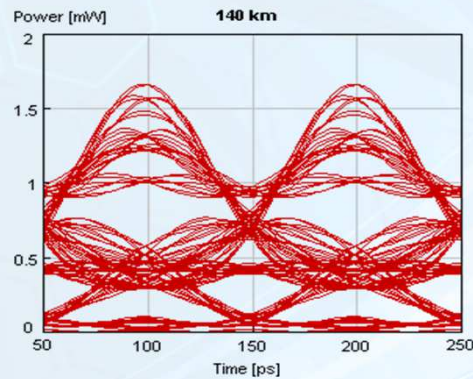
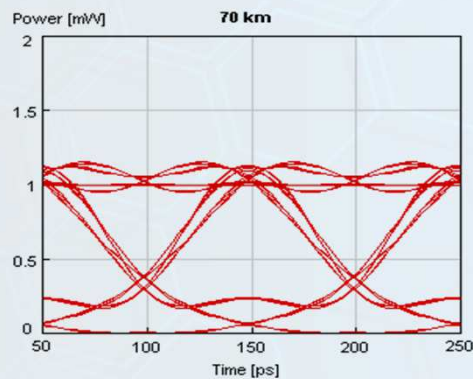
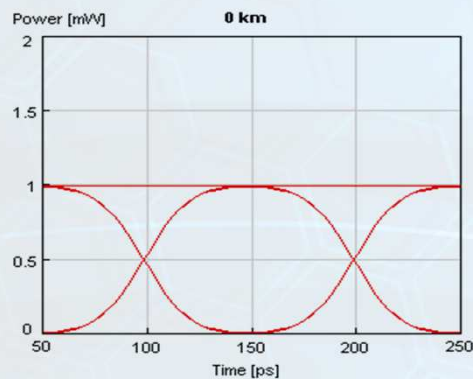
$D > 0$ – anomálna disperzia



Disperzia

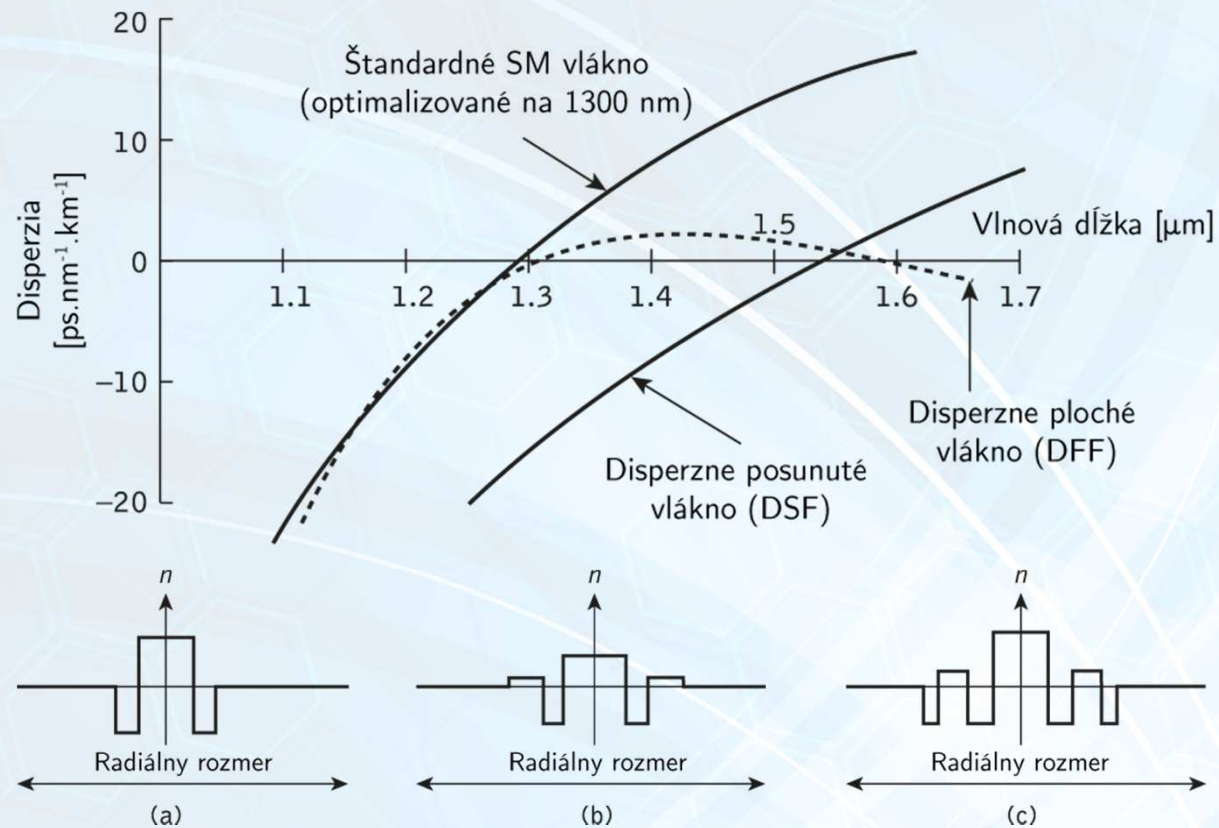
Rozšírenie impulzu v časovej oblasti vedie k zvýšenému uzatváraniu diagramu oka. Charakterizované je tzv. kumulatívnou disperziou D_{acc} [ps/nm]

$$D_{acc} = D \cdot L$$



Disperzne ploché vlákna

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



Prakticky je celkový disperzný parameter v jednomódových vláknach daný ako

$$D_T = D_M + D_W + D_P \text{ [ps.nm}^{-1}\text{km}^{-1}\text{]}.$$

Disperzný manažment – kompenzácia disperzie

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Disperzia je lineárny parameter

Môže byť kompenzovaná

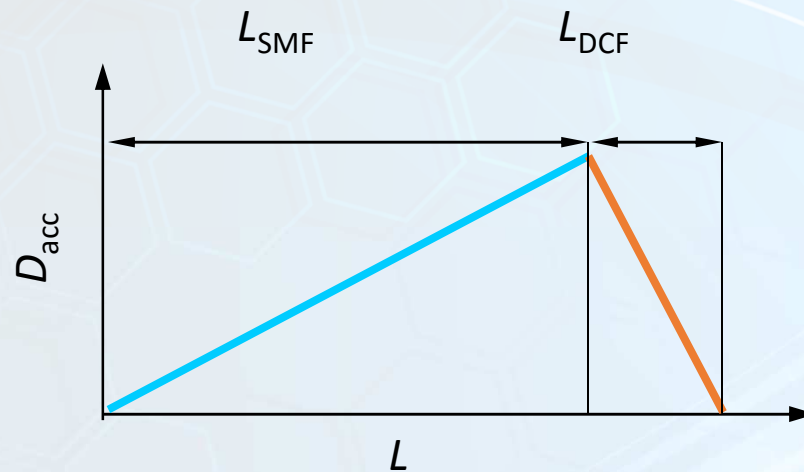
Spôsoby kompenzácie: DCF alebo FBGM



$$D_{SMF} \approx 17 \frac{\text{ps}}{\text{km.nm}}$$



$$D_{DCF} \approx -100 \frac{\text{ps}}{\text{km.nm}}$$



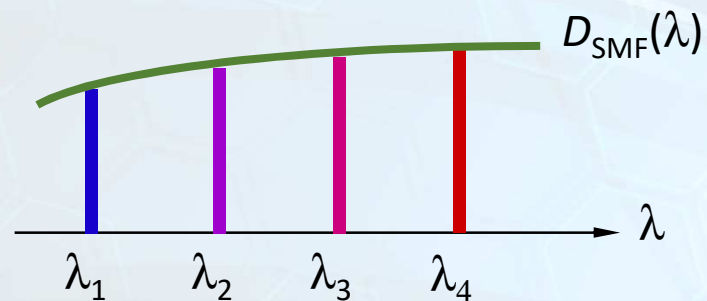
Kompenzácia GVD 1. rádu

$$L_{SMF} D_{SMF} = -L_{DCF} D_{DCF}$$

Sklon disperznej krivky

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Predpokladajme 4 WDM kanály.

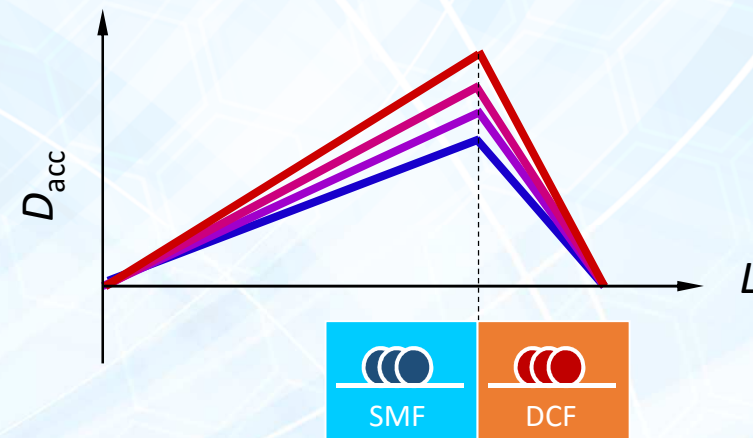
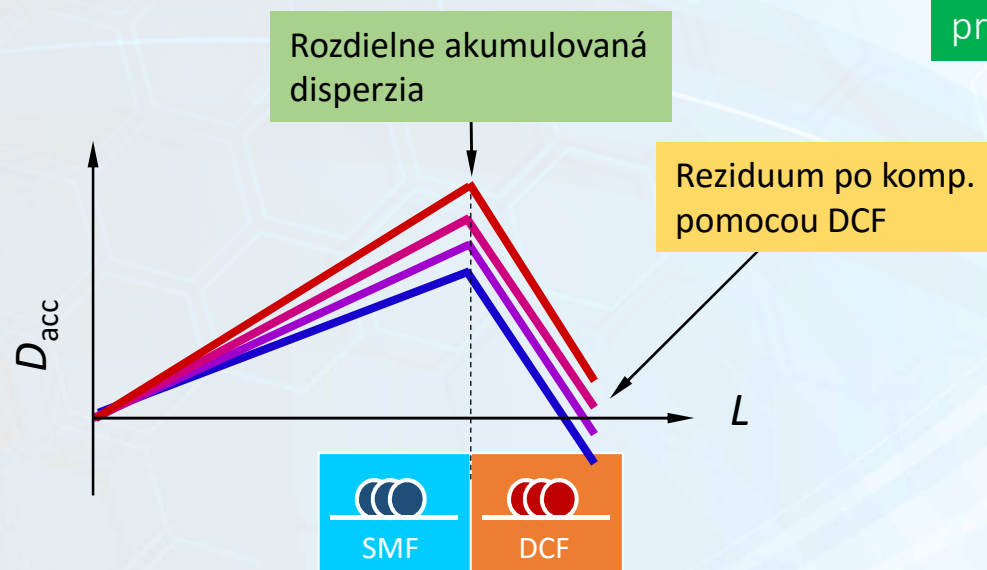


Parameter disperzie D je funkciou vlnovej dĺžky λ .

Požiadavka pre ideálnu kompenzáciu GVD 2. rádu

$$\frac{S_{SMF}}{S_{DCF}} = \frac{D_{SMF}}{D_{DCF}}$$

pre všetky vlnové dĺžky λ .

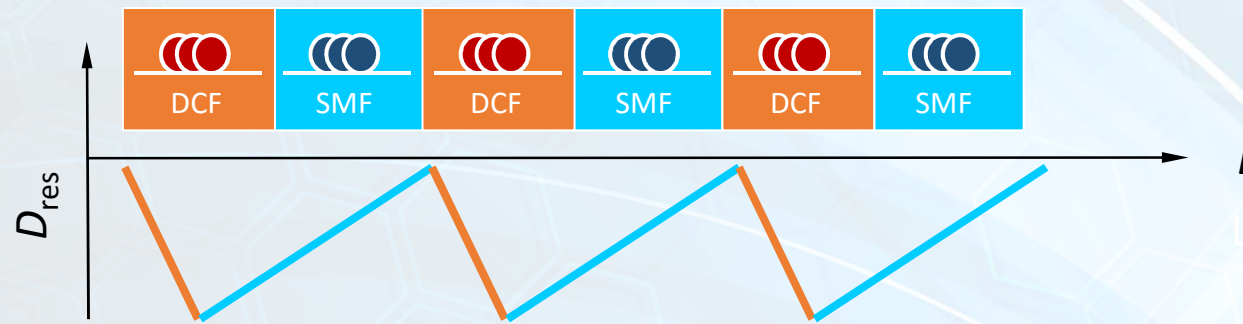


Kompenzačné schémy

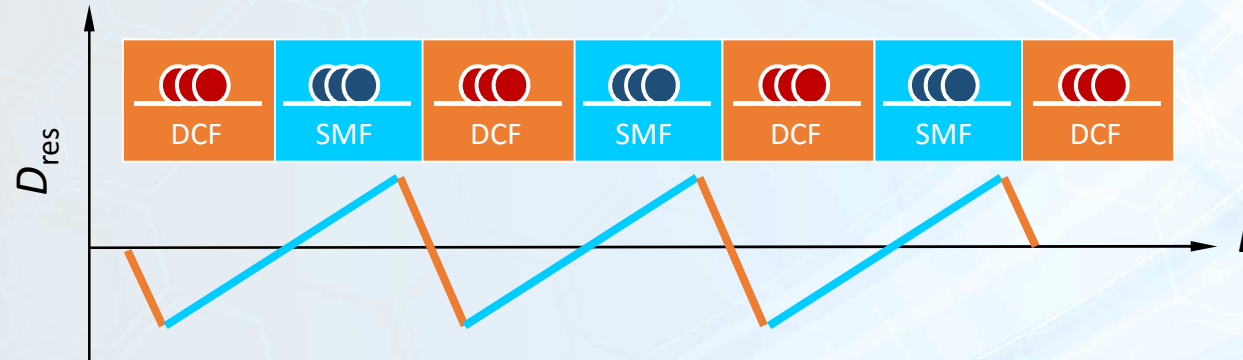
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



Postkompenzácia



Prekompenzácia



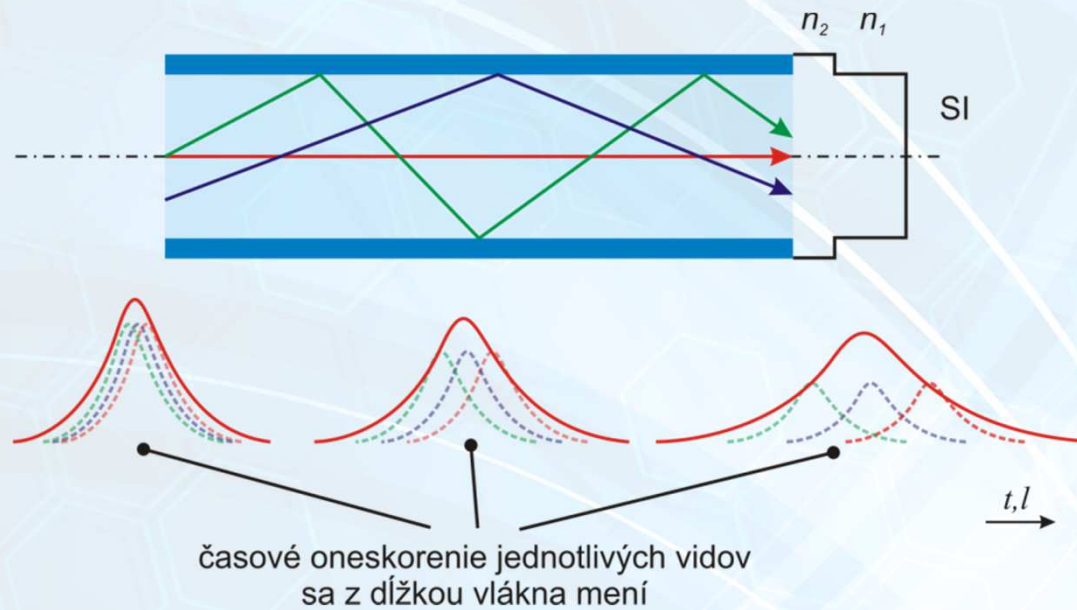
Hybridná kompenzácia

Módová disperzia

Multimódové optické vlákna

Módová disperzia - SI

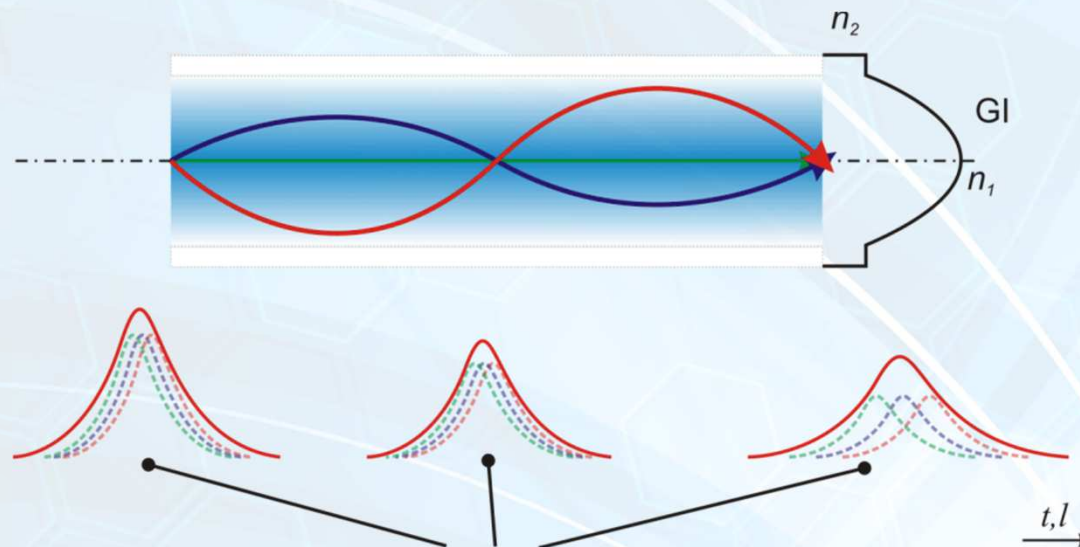
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



$$\sigma_s \approx L \frac{n_1 \Delta}{2\sqrt{3}c}$$

Módová disperzia - GI

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE



časové oneskorenie jednotlivých vidov
sa z dĺžkou vlákna mení, ale oneskorenie je asi
1000 násobne menšie ako u rovnakého SI vlákna

$$\sigma_g \approx L \frac{n_1 \Delta^2}{20\sqrt{3}c}$$

Polarizačná módomá disperzia

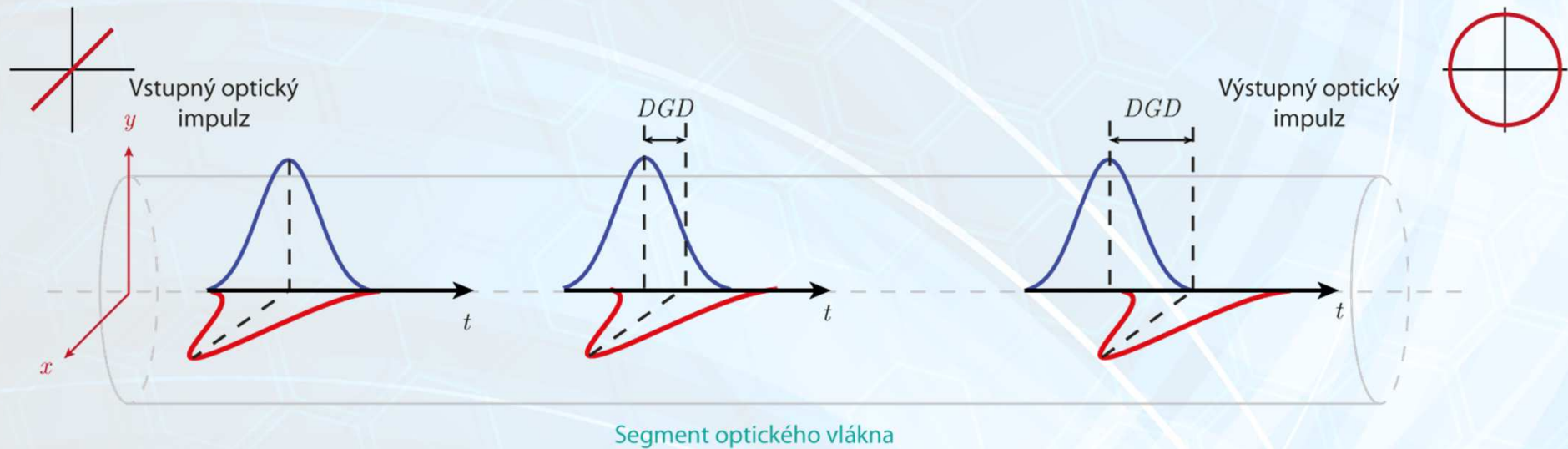
Jednomódové optické vlákna

Polarizačná módová disperzia

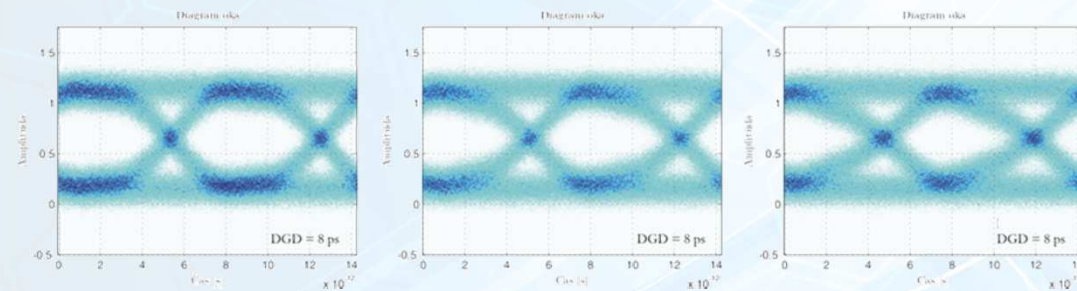
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Vstupný SOP

Výstupný SOP

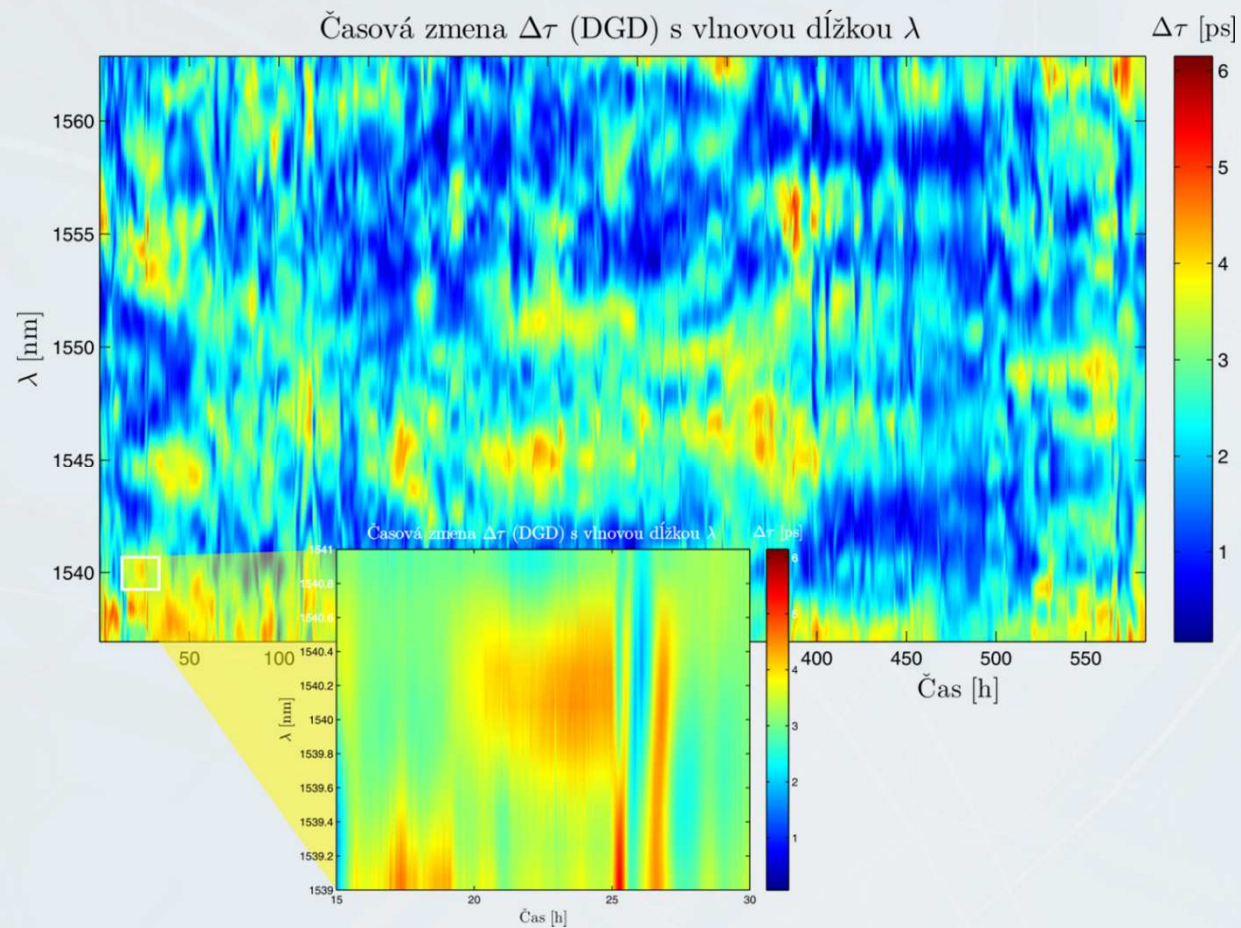


Zmena otvorenia diagram oka so zmenou PSP



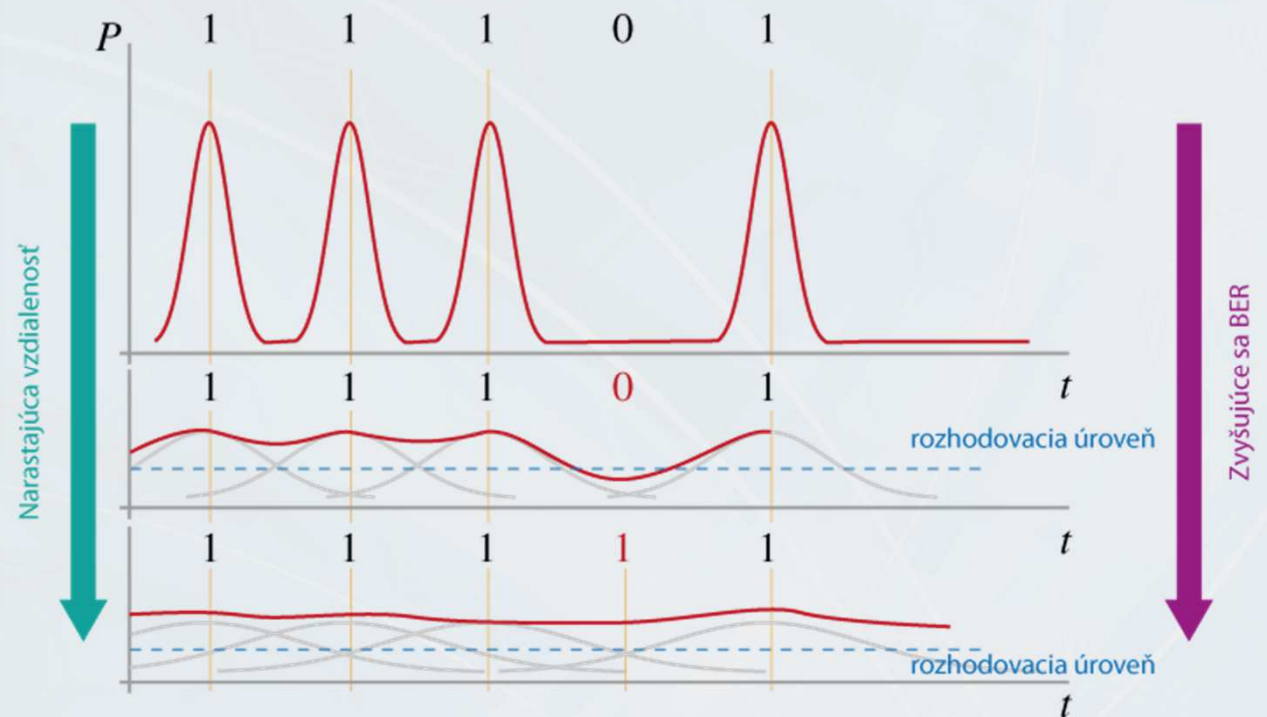
Časová zmena DGD vs. λ

Časový vývoj reálne nameraných hodnôt DGD optického vlákna (SSMF, dĺžka vlákna 421 km, 2xEDFA).



Intersymbolová interferencia - ISI

Inter-symbolová interferencia spôsobuje vzájomné ovplyvňovanie blízkych symbolov, ktoré zasahujú do susedných symbolových (bitových) medzier. Susedné impulzy teda predstavujú šum.



Ďakujem za pozornosť

jozef.dubovan@fel.uniza.sk