



RNDr. Ing. Vladimír Smotlacha, Ph.D.

Katedra počítačových systémů
Fakulta informačních technologií
České vysoké učení technické v Praze
© Vladimír Smotlacha, 2019

Počítačové sítě BI-PSI

LS 2018/19, Přednáška 9

<https://courses.fit.cvut.cz/BI-PSI>



FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE



EVROPSKÁ UNIE

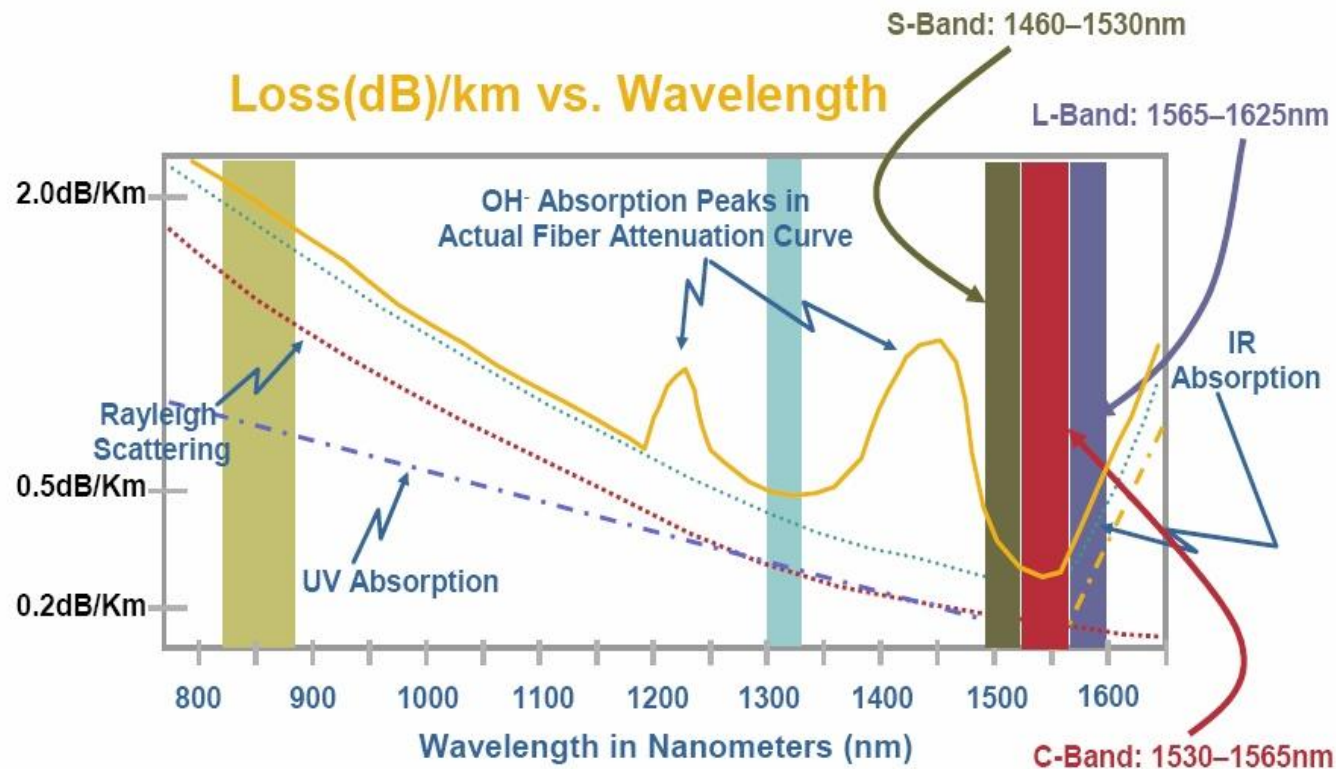
- decibel
- optické sítě
 - optický přenos
 - typy vláken
 - vlnové délky
 - WDM
- prvky optických sítí



- Jednotka decibel slouží k porovnání dvou výkonů
$$L = 10 * \log_{10} (P / P_0) \quad [\text{dB}, \text{W}, \text{W}]$$
 - 10 (20, 30, ..) dB znamená výkon 10x (100x, 1000x) vyšší
 - -10 (-20, -30, ..) dB znamená výkon 10x (100x, 1000x) nižší
 - 3 dB znamená výkon 2x vyšší ($\log_{10} 2 = 0.301\dots$)
- Odvozená absolutní jednotka dBm
 - definice: $P = 0 \text{ dBm}$ odpovídá výkonu 1mW

70-tá léta

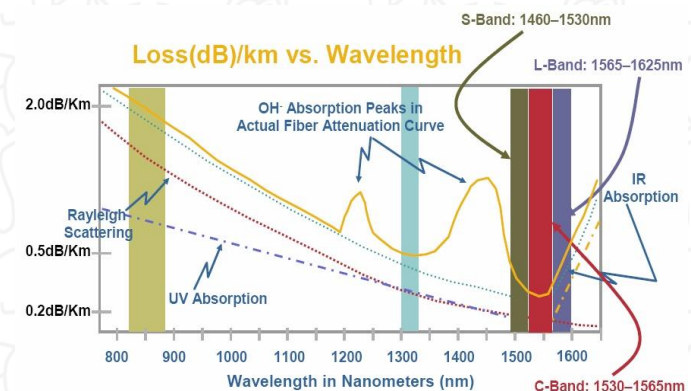
- vlákno s útlumem 20 dB/km
- polovodičový laser



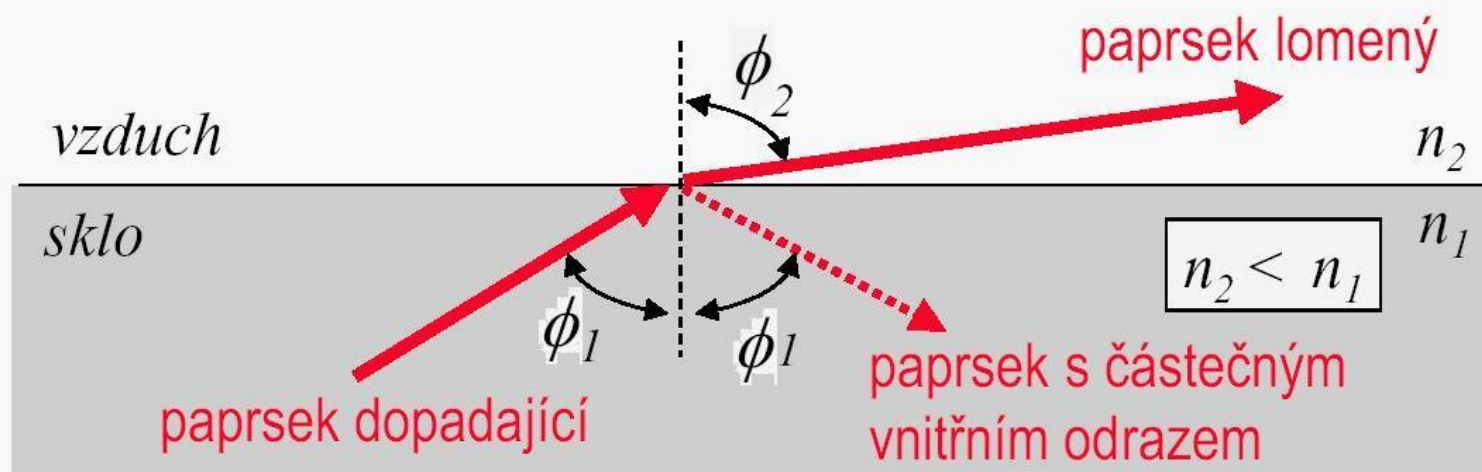


850 nm -> 1310 nm -> 1550 nm

- 1. generace: GaAs laser, 850nm (80. léta)
 - 45 Mb/s, multi-mode, regenerace 10km
- 2. generace: 1310 nm (2. polovina 80. let)
 - 1310 nm, 1 dB/km, 100 Mb/s, multi-mode
 - 2 Gb/s, single mode, regenerace 50 km
- 3. generace: 1550 nm (90. léta)
 - 1550 nm, regenerace 60 -70km
 - 2.5 Gb/s a 10 Gb/s



Snellův zákon lomu



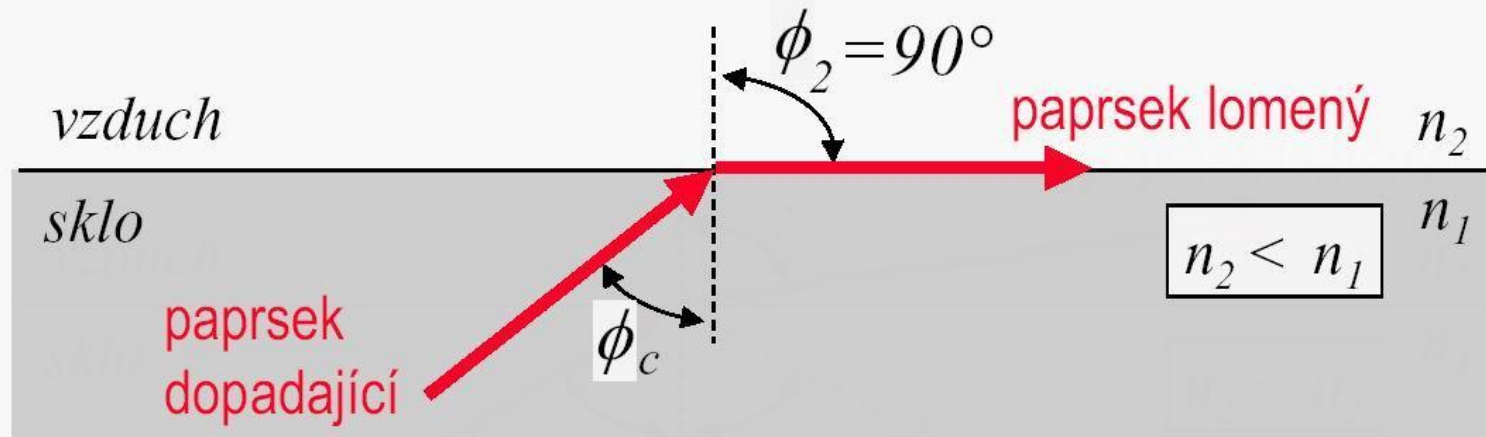
$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

nebo

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

zdroj: Jan Kubr

Kritický úhel lomu



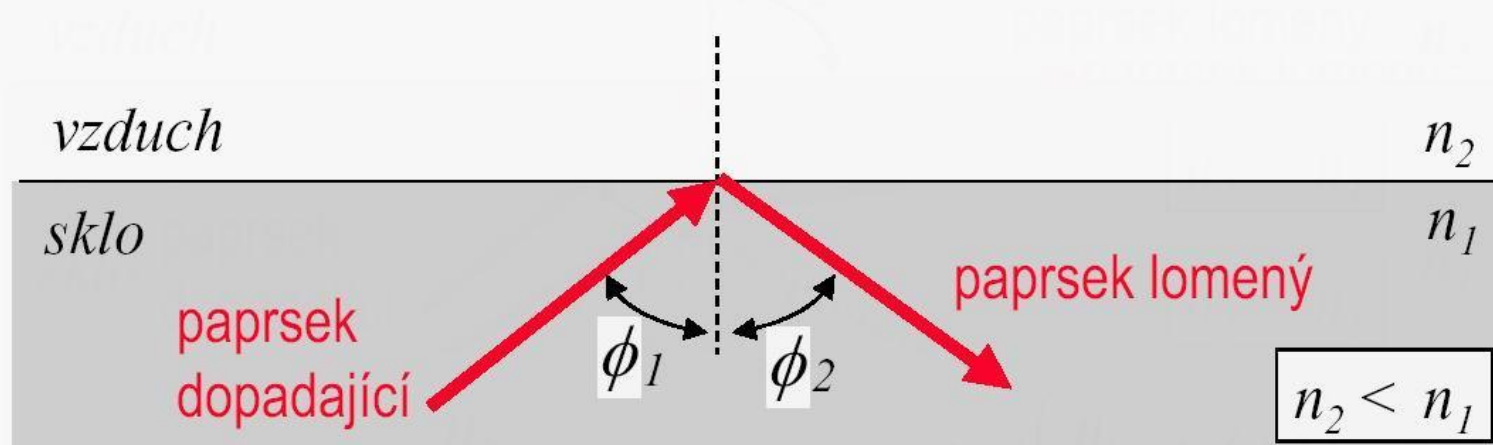
Když $\sin \phi_1 = \frac{n_2}{n_1}$ potom $\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\phi_1)\right) = 90^\circ$

Takže, kritický úhel lomu je definován

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

zdroj: Jan Kubr

Jev totální vnitřního odrazu

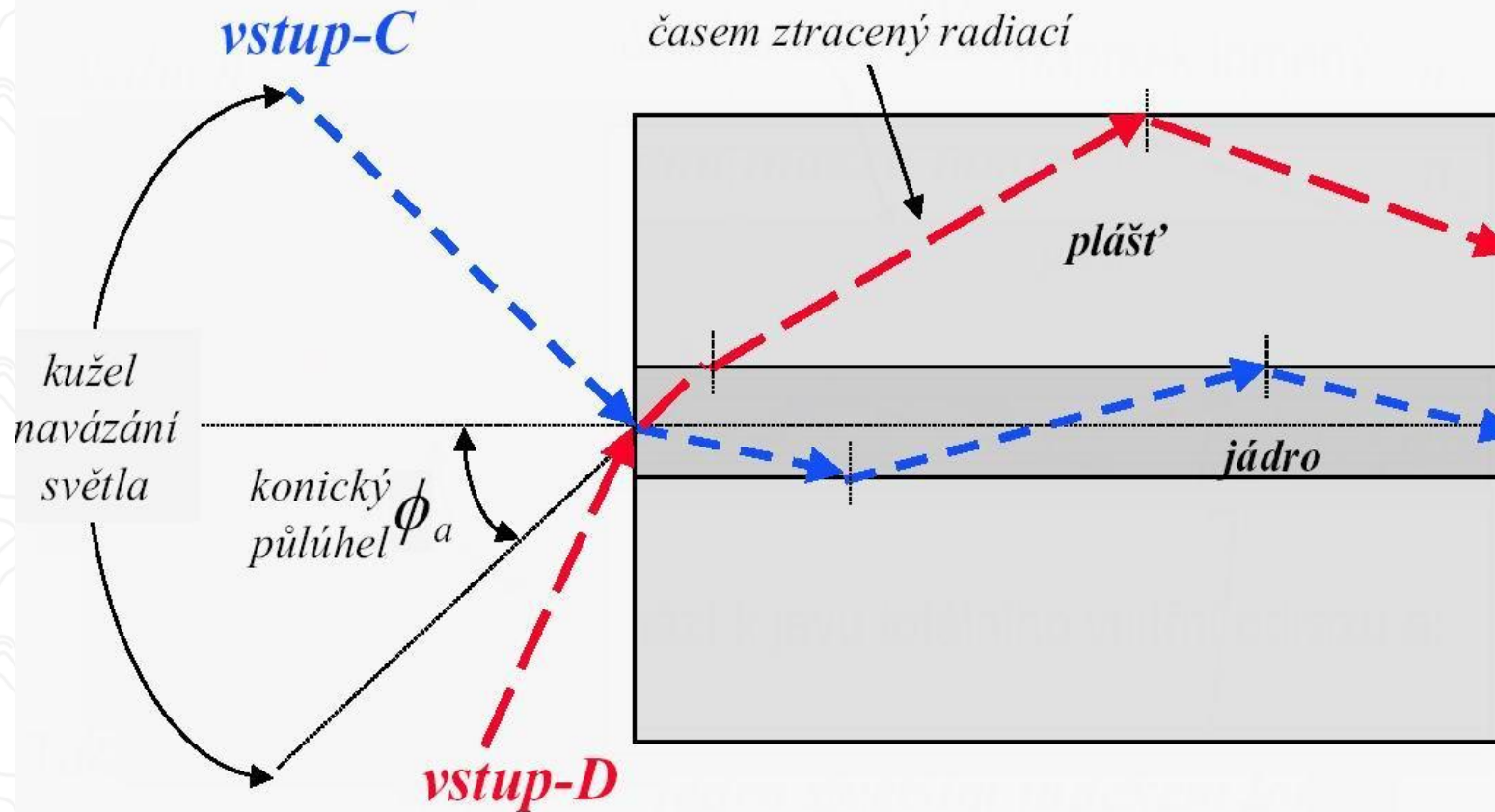


Když $\phi_1 > \phi_c$ potom dochází k jevu totálního vnitřního odrazu a:

$$\phi_1 = \phi_2$$

zdroj: Jan Kubr

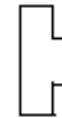
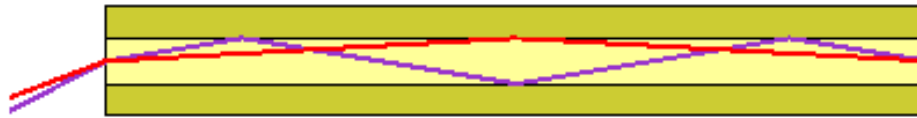
Maximální úhel navázání



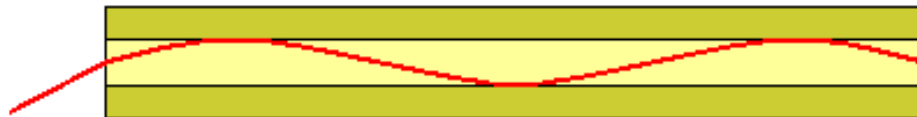
zdroj: Jan Kubr

Multimode

50/125, 62.5/125, 100/140 μm



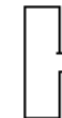
Multimode



**Multimode
graded index**

Singlemode

9/125 μm



Singlemode



Single mode (SM, SMF)

- průměr jádra $9\ \mu\text{m}$
 - typicky pod 10 vlnových délek
- přenáší pouze základní mód,
 - další módy jsou potlačeny (cut-off)
 - mód – jedno z řešení vlnové (Maxwellovy) rovnice pro dané vlákno a vlnovou délku
- útlum cca $0.2\ \text{dB/km}$ pro $1550\ \text{nm}$, resp. $0.4\ \text{dB/km}$ pro $1310\ \text{nm}$

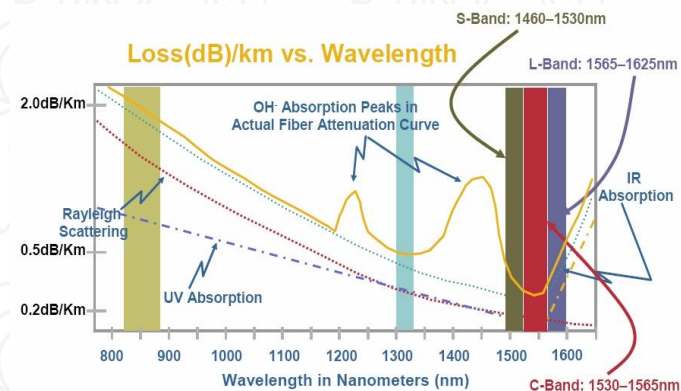
Multimode (MM)

- průměr jádra 50 – 100 μm
 - mnohem více než vlnová délka
- multimode, „step-index“ (MM SI)
 - modální disperse: různě dlouhá cesta pro různé paprsky
 - vhodné pro 10 Mb/s
- multimode, gradientní index (MM GI)
 - snížená modální disperse
 - vhodné pro 100 Mb/s – 1 Gb/s (vyjímečně 10 Gb/s)
- útlum 1 – 4 dB/km, resp. <10 dB/km pro plast



Pásmo (band)

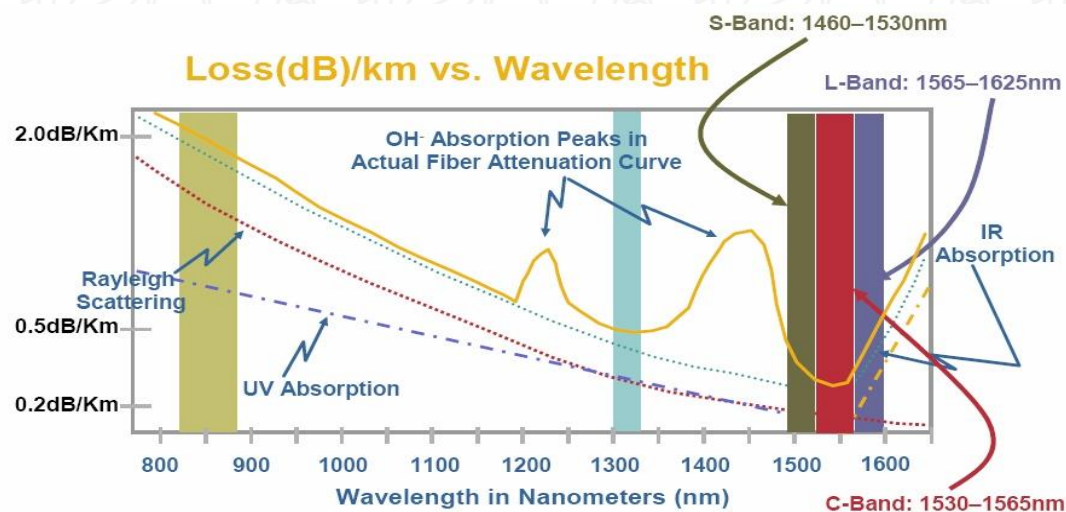
- O (Original) 1260—1360 nm
- E (Extended) 1360—1460 nm
- S (Short wavelength) 1460—1530 nm
- C (Conventional) 1530—1565 nm
- L (Long wavelength) 1565—1625 nm
- U (Ultra) nad 1625 nm



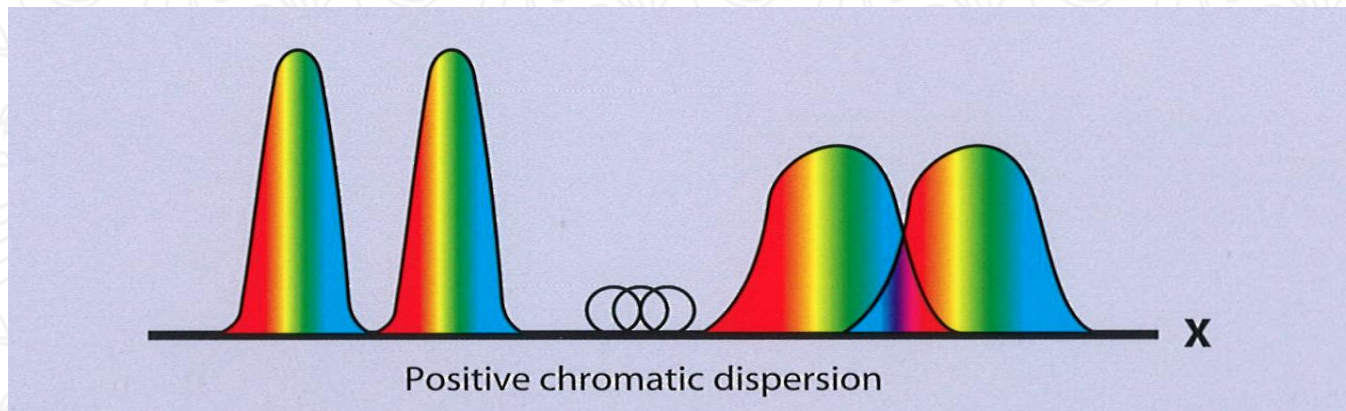


- **útlum – Attenuation**
 - zeslabení signálu při průchodu vláknem
- **chromatická disperse – Chromatic Dispersion (CD)**
 - rychlost šíření závisí na vlnové délce
- **polarizační disperse - Polarization Mode Dispersion (PMD)**
 - rychlost šíření závisí na polarizační rovině
- **další nelineární jevy**

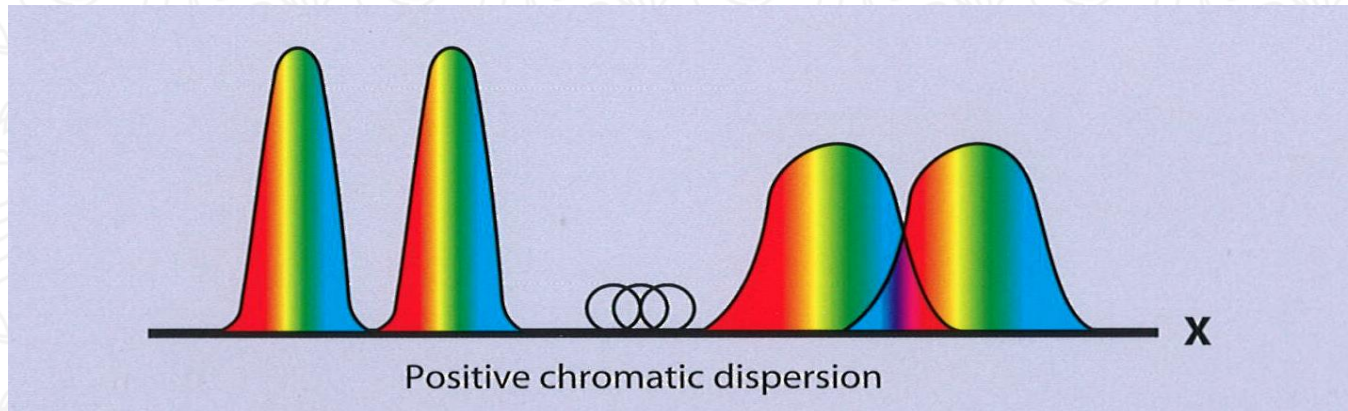
- zeslabení signálu
 - absorpce, nečistoty, geometrie vlákna, ...



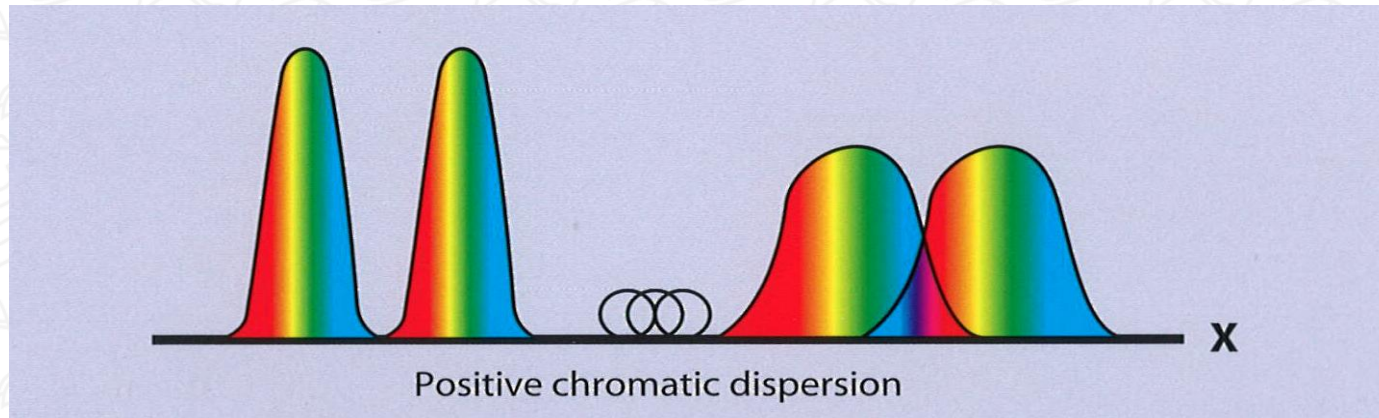
- orientační hodnoty
 - pásmo O (1260 – 1360 nm): 0.35 dB/km
 - pásmo C (1530 – 1565 nm): 0.22 dB/km
 - pásmo L (1565 – 1625 nm): 0.25 db/km



- rychlost světla ve vlákně:
 $v = c / n$ [rychlost ve vakuu / index lomu]
 - index lomu závisí na vlnové délce
- důsledek: impuls se „roztáhne“
 - lze kompenzovat speciálním vláknem (negativní hodnota CD)
 - typická hodnota: 17 ps / (nm * km)



- rychlost světla ve vlákně:
 $v = c / n$ [rychlost ve vakuu / index lomu]
 - index lomu závisí na vlnové délce
 - příklad: rozklad světla hranolem, duha
- důsledek: impuls se „roztáhne“
 - lze kompenzovat speciálním vláknem (negativní hodnota CD)
 - typická hodnota: 17 ps / (nm * km)



- rychlost šíření závisí na polarizaci signálu
- důsledek: „rozšíření“ pulsu
 - uplatňuje se pro vysoké modulační rychlosti (10 Gbps a více)
- komplikovaná kompenzace (aktivní)
 - typická hodnota: $0.2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$

ST



FC/PC



MT



LC



E2000



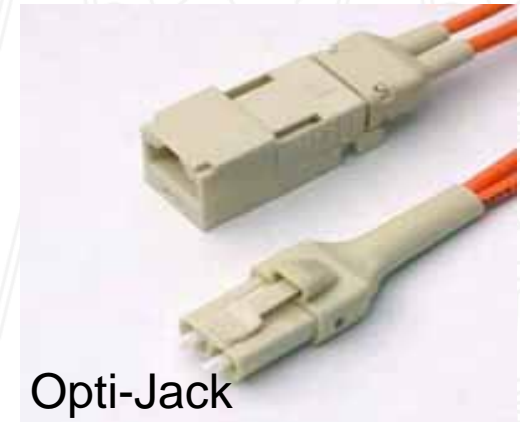
SC



MT-RJ



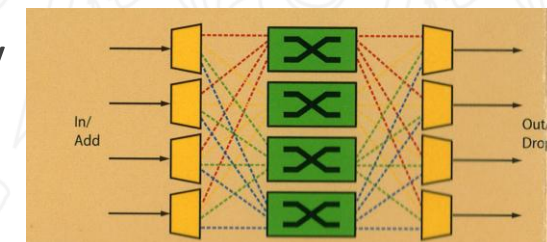
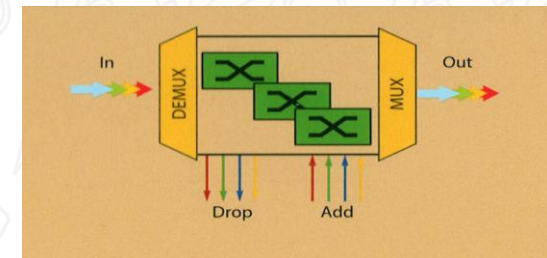
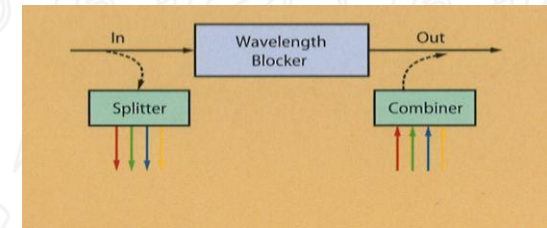
Opti-Jack





- multiplexer
 - sloučí signál z několika vysílačů do jednoho vlákna
 - každý vstupní signál má jinou vlnovou délku (wavelength, color, lambda, ...)
- demultiplexer
 - rozdělí vstupní signál na jednotlivé vlnové délky

- OADM – Optical Add-drop Multiplexer
 - umožní přidat (odebrat) jednu nebo více vlnových délek do signálu DWM
 - pevná konfigurace (resp. výměnné filtry)
 - změna vyžaduje ruční zásah
- ROADM – Reconfigurable OADM
 - délkově ovládané konfigurace
 - plní funkci optického směrovače
- OXC – Optical Cross-connect
 - optická přepojovací matice s více vstupy / výstupy
 - ROADM je v principu OXC se 2 vstupy / výstupy





- **transmitter + receiver**
- kombinuje (optický) přijímač i vysílač v jednom modulu
- standardizované typy / konektory, snadná záměna
 - odlišný výkon i citlivost
 - odlišná vlnová délka
 - příklad:
 - 1 Gb/s: GBIC, **SFP**
 - 10 Gb/s: SFP+, XFP, XENPAK
 - 40 Gb/s: QSFP
 - 100 Gb/s: CFP, SFP-DD



- převážně polovodičové prvky
 - LED (infračervená)
 - dosah několik km
 - do 100 (resp. 622) Mb/s
- laserová dioda
 - koherentní světlo
 - do 10 Gb/s (i více)
 - desítky km (typicky do 80 km)
- modulace:
 - do 10 Gb/s přímá binární modulace (svítí s vyšší a nižší intenzitou)
 - kvadratická modulace pro vyšší rychlosti



- polovodičová fotodioda
 - širokopásmový detektor
- převodník proud-napětí
- omezující zesilovač
 - vyrovnaní různého výkonu vstupního optického signálu
 - rozsah až 30dB
 - výstupem je digitální elektrický signál



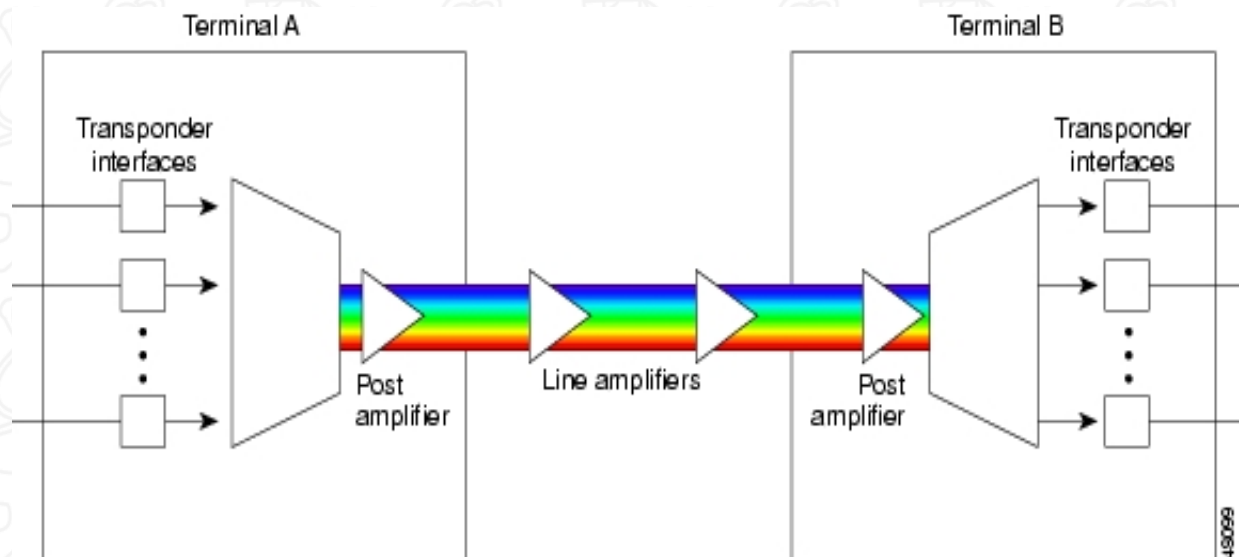
- opto-elektrické zesilovače
 - optický signál převeden na elektrický signál
 - znovu vyzářen
 - kombinace se síťovými prvky (switch)
 - výhody:
 - plné obnovení signálu
 - téměř neomezené opakování
 - snadné rozbočení nebo změna vlnové délky
 - nevýhody
 - není protokolově transparentní (musí porozumět fyzické resp. i linkové vrstvě)
 - pracuje jen s jedním signálem



- přímé zesílení optického signálu
- transparentní
 - libovolná modulace a tedy i protokol vyšší vrstvy
 - různá rychlost (bit-rate)
 - zesiluje celé pásmo
- dosah lze zvýšit na 1000-2000 km
- příklady
 - Ramanův zesilovač
 - Erbiový (Erbium-doped Fibre Amplifier - EDFA)
 - pásmo C a L
 - polovodičový zesilovač (Semiconductor optical amplifier - SOA)

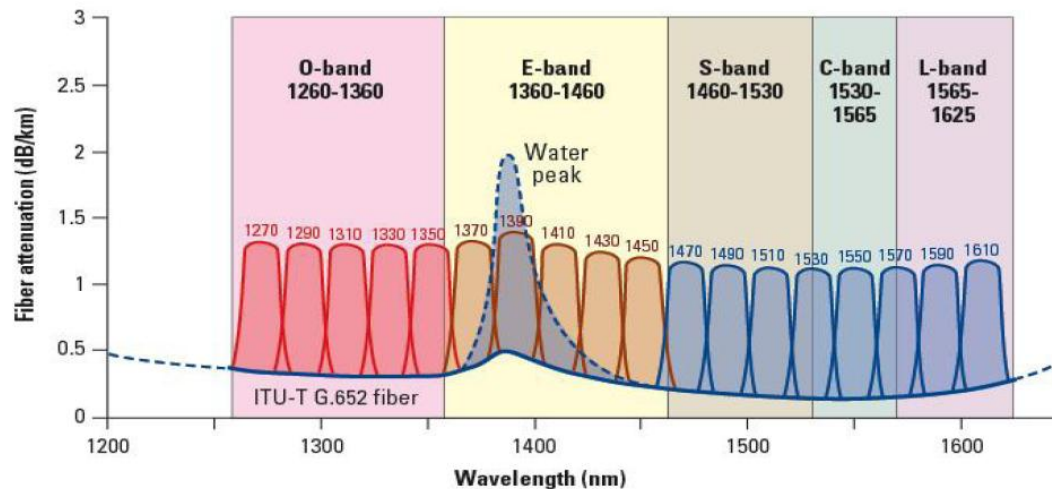
WDM - Wavelength-division multiplexing

- jedno vlákno přenáší více signálů s různými vlnovými délkami



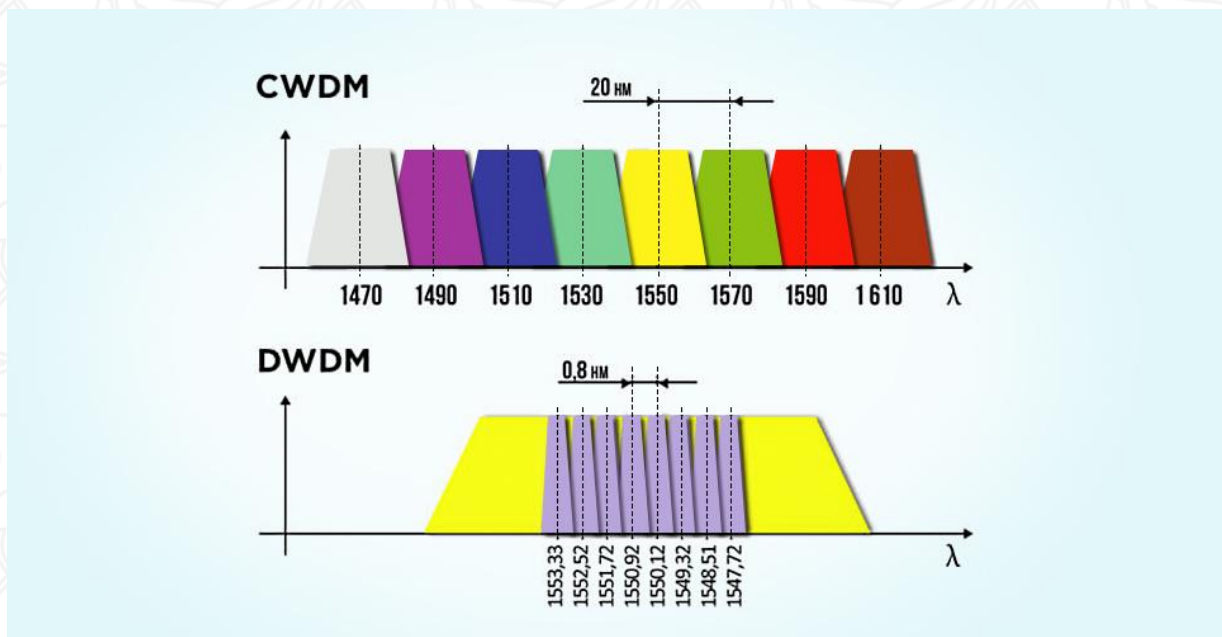
CWDM – Coarse WDM

- 18 kanálů v rozsahu 1270 - 1610 nm (pásma O – C)
- různé specifikace, rozestup kanálů cca 20 nm
- nevhodné pro zesílení – použití zejména pro LAN / WAN
- levná implementace, vhodné např. pro „fiber-to-home“



DWDM – Dense WDM

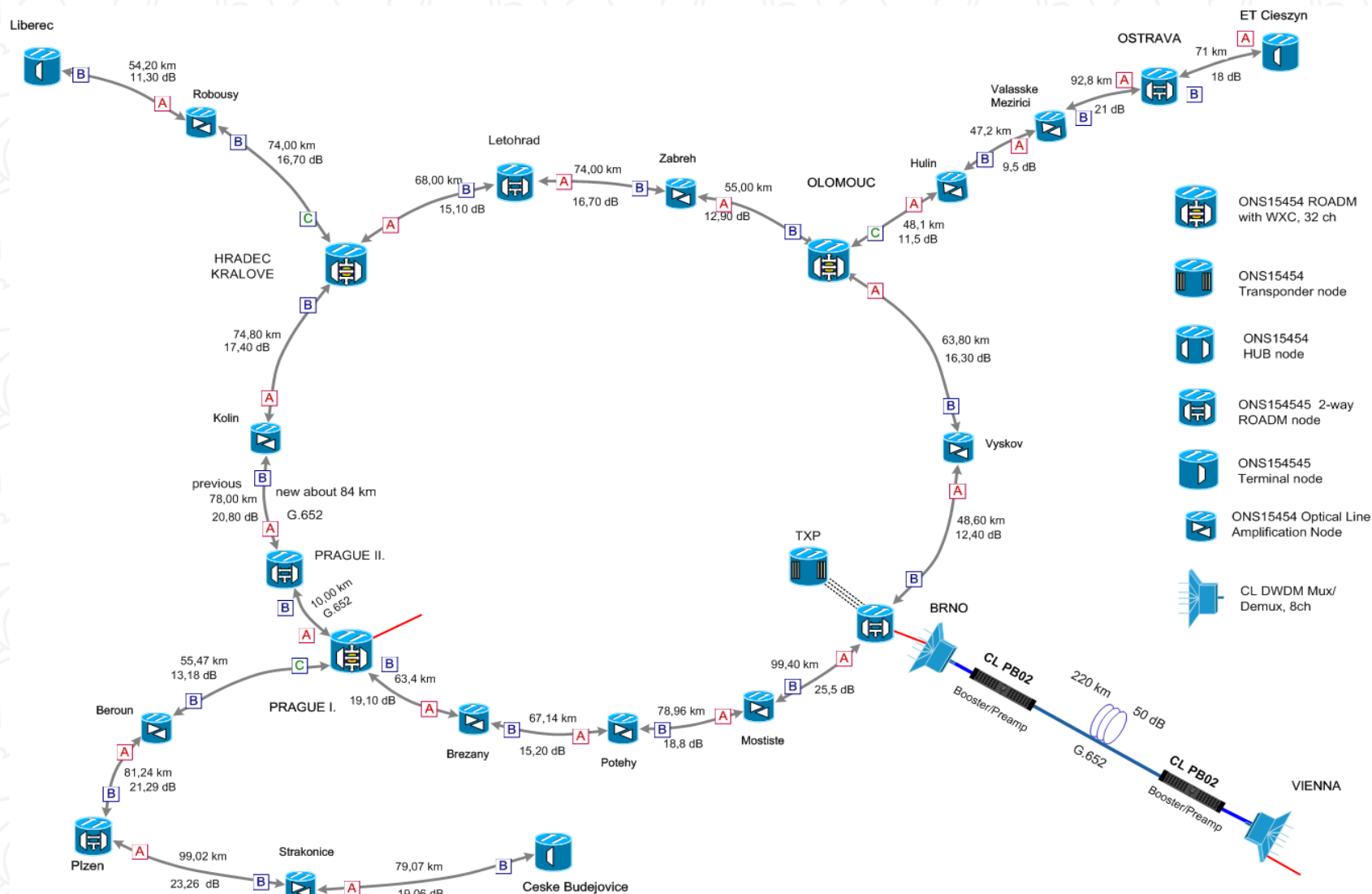
- pásmo 1525–1565 nm (C band) a 1570–1610 nm (L band)
 - původně rozestup 100 GHz (0.8 nm), později 50 GHz (0.4 nm)
 - 40, resp. 80 kanálů
 - ref. bod 193.10 THz (1552.52 nm)



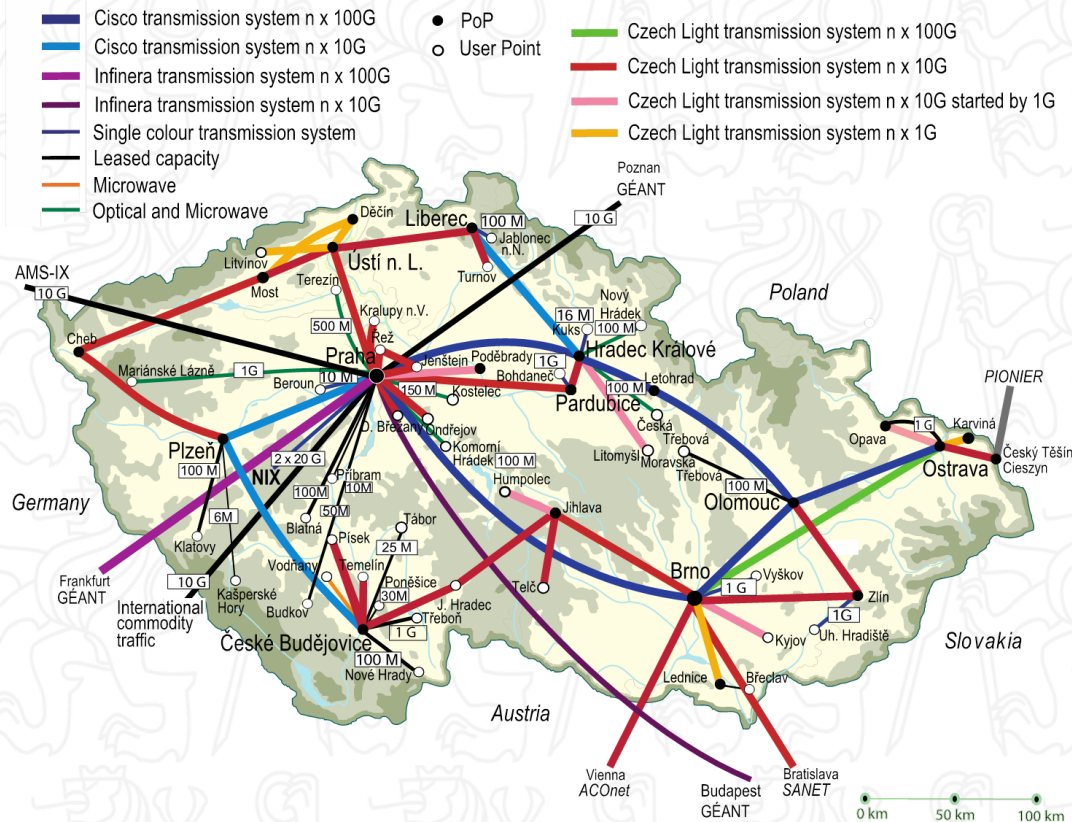
zdroj: <http://www.fiber-optic-components.com>



- koncový multiplexer (terminal multiplexer)
 - vstupní obvod
- linkový zesilovač (intermediate line repeater)
 - EDFA
 - rozestup 80-100 km
- linkový terminál (intermediate optical terminal)
 - OADM
 - zesílený výstupní signál
 - dosah až 140 km
- koncový demultiplexer (terminal demultiplexer)
 - výstup



CESNET2 Topology (March 2017)



Členové

- veřejné vysoké školy (26)
- Akademie věd ČR

Infrastruktura:

- 6000 km „temných vláken“ (dark fiber)
- téměř 2000 km jednovláknových tras
- Transportní systémy:
 - proprietární 1500 km
 - otevřený 4000 km



Děkuji za pozornost

V přednášce byly částečně využity slajdy
autorů Jan Kubr z FEL ČVUT, Josef Vojtěch z
Cesnetu a Vladimír Horák z Rektorátu UK