

Ing. Bc. Ivan Pravda, Ph.D.

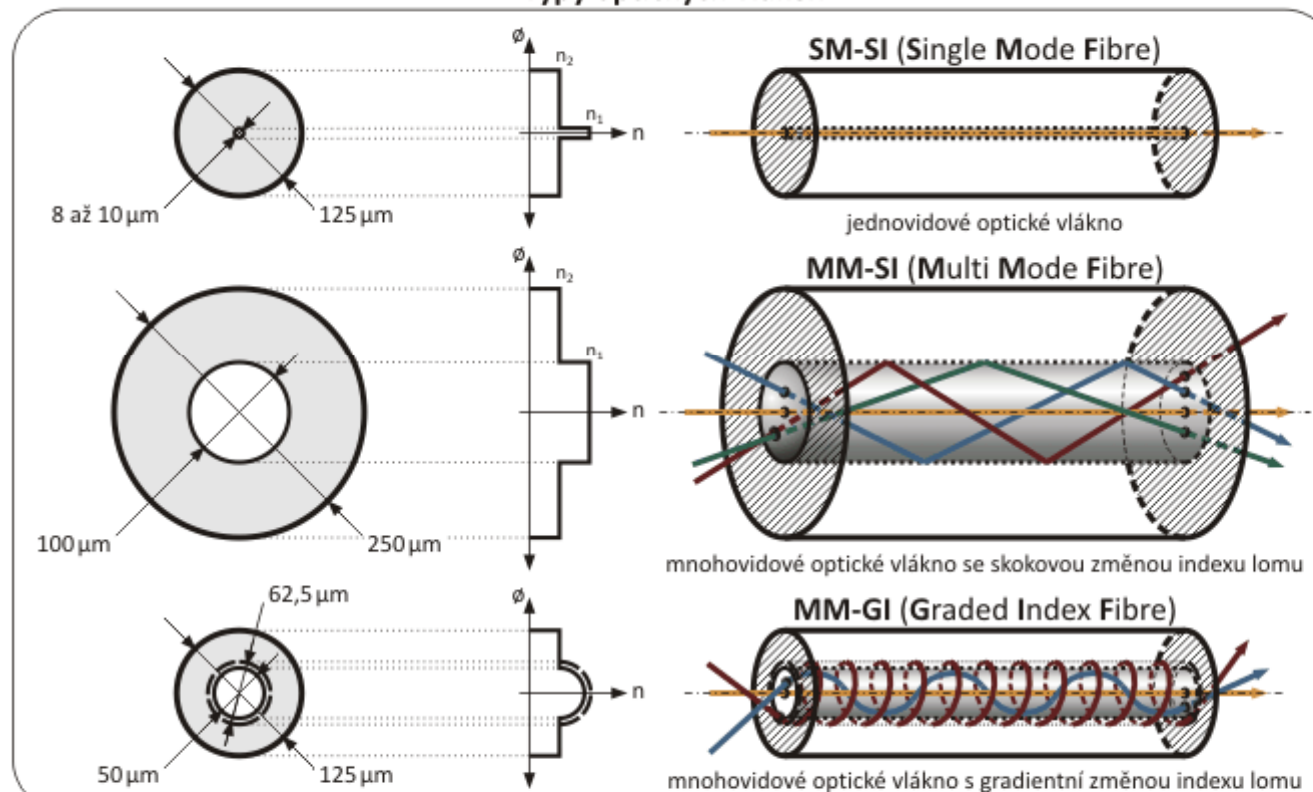
OPTICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDKY A SYSTÉMY WDM

Optické přenosové prostředky

- **Viditelné světlo** → frekvence okolo 10^{14} Hz ⇒ oblast frekvencí využitelná pro vysoce efektivní přenos dat.
- Přenášená data lze vyjádřit ve formě **světelných impulsů** (*přítomnost světelného impulsu reprezentuje např. logickou 1, nepřítomnost pak logickou 0*).
- Pro praktickou realizaci přenosu však potřebujeme **optický přenosový systém**, který se skládá z následujících tří částí:
 - **emitor (zdroj) záření**
 - **přenosové médium** → optické vlákno
 - **detektor (přijímač) záření**
- Emitorem (zdrojem) záření může být **elektroluminiscenční dioda LED** (*Light Emitting Diode*) nebo nákladnější **laserová dioda LD** (*Laser Diode*) → **polovodičové prvky** (*emise světelného záření probíhá na základě přiváděného budícího proudu*).
- Detektorem (přijímačem) záření bývá **fotodioda** (*Photodiode*) → převod světelných impulsů na elektrický signál.

Optické vlákno (přenosové médium)

Typy optických vláken



Přenosové médium má za úkol dopravit světelný paprsek od zdroje záření k detektoru se zohledněním hlediska minimálních ztrát ⇒ **optické vlákno (Optical Fibre)** s tenkým jádrem (Core) obaleným vhodným pláštěm (Cladding).

Nejčastěji používanými materiály jsou různé druhy skla (SiO_2), eventuálně plasty.

Optická vlákna lze rozdělit na jednotlivé typy dle způsobu, jakým dané optické vlákno vede paprsek:

1. jednovidové optické vlákno (SM-SI - Single Mode Fibre)
2. mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu (MM-SI - Multi Mode Fibre)
3. mnohovidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu (MM-GI - Graded Index Fibre)

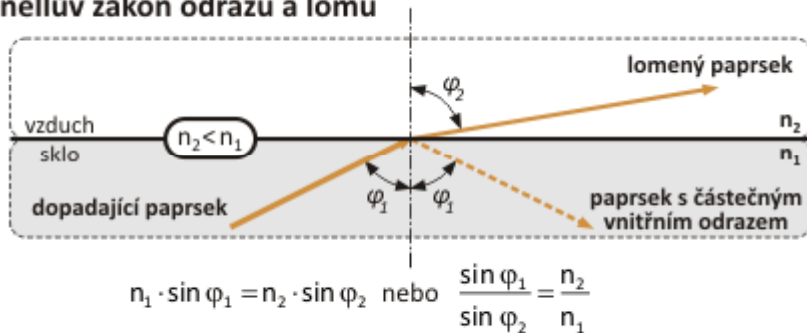
Pro pochopení způsobu, jakým je světelný paprsek optickým vláknem veden, je nutné si uvědomit jeden základní poznatek:

„Dopadá-li světelný paprsek na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi (např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm), pak v obecném případě se část tohoto paprsku odráží zpět do původního prostředí a část prostupuje do druhého prostředí. Záleží však na úhlu, pod jakým paprsek dopadá na rozhraní (které je dáno též optickými vlastnostmi obou prostředí). Je-li tento úhel větší než určitý mezní úhel, dochází k úplnému odrazu paprsku zpět do původního prostředí.“

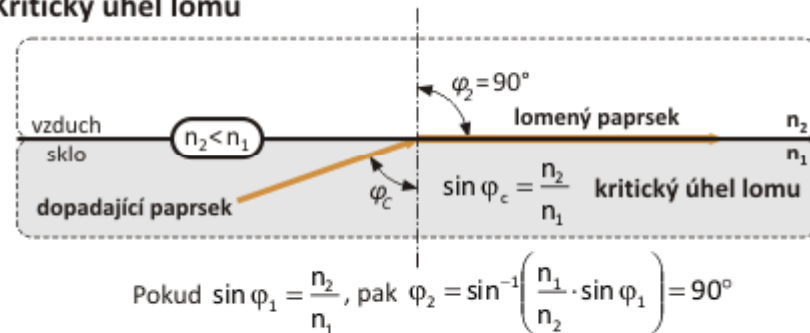
Princip šíření světelného svazku

Pro popis šíření světla v optickém vlákně existují dva postupy. **První postup** je založen na tzv. geometrické optice, kdy je uplatněn **Snellův zákon odrazu a lomu** a **druhý postup** je založen na metodě, která využívá k analýze elektromagnetickou teorii šíření vlnoploch založenou na **řešení Maxwellových rovnic** (k zvládnutí tohoto analytického postupu jsou však nutné hlubší znalosti z oblasti vyšší matematiky). My se v našem kurzu zaměříme na popis pomocí geometrické optiky. **Princip šíření je založen na odrazu paprsku na rozhraní dvou materiálů a podmínkou pro tento odraz je aby index lomu jádra byl větší než index lomu pláště.**

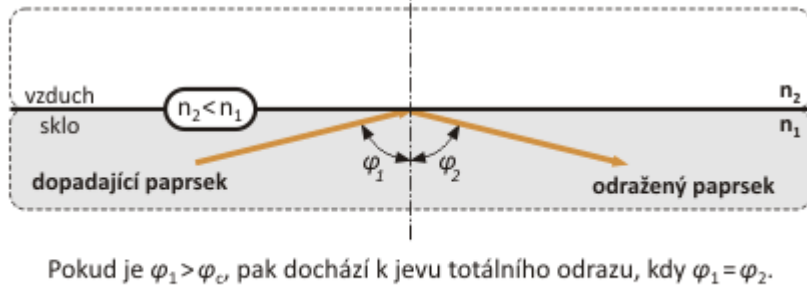
Snellův zákon odrazu a lomu



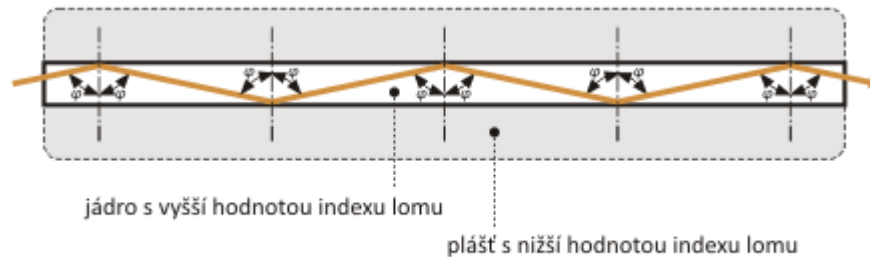
Kritický úhel lomu



Jev totálního vnitřního odrazu



Přenos optického svazku v ideálním optickém vlákně



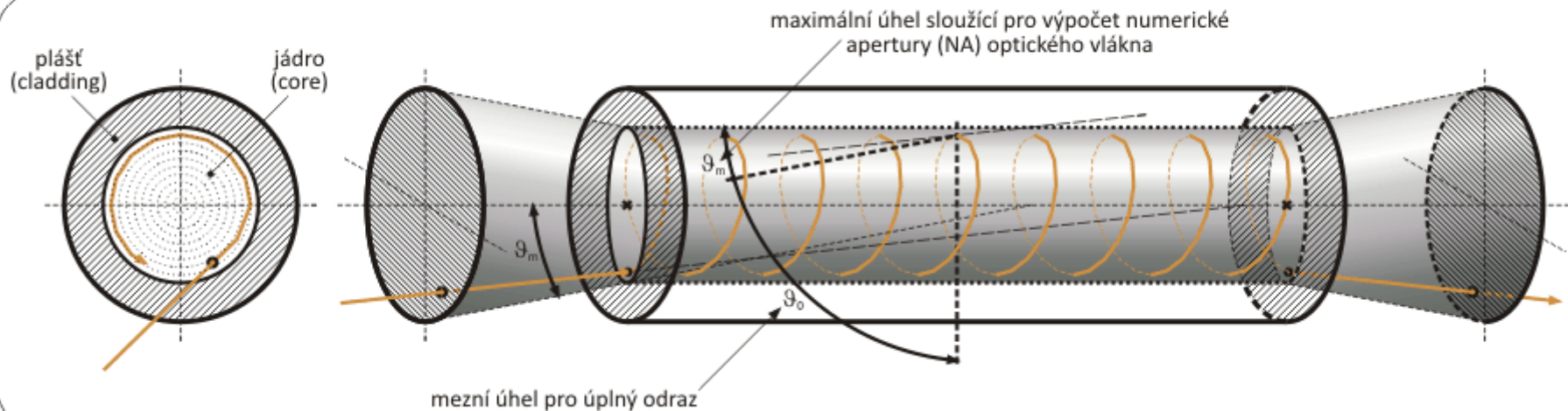
Numerická apertura (NA)

Z předchozí úvahy vyplývá, že v důsledku opakovaných úplných odrazů, které probíhají bez jakýchkoliv ztrát, pak světelný paprsek sleduje dráhu jádra optického vlákna \Rightarrow **světelný paprsek je tímto jádrem veden**.

Rozmezí úhlů, pod kterými může světelný paprsek dopadat na optické vlákno tak, aby byl tento světelný paprsek následně veden, definuje tzv. **numerickou aperturu** (v praxi lze vedení světelného paprsku ztotožnit s množstvím navázané energie do optického vlákna):

$$NA = n_0 \cdot \sin \vartheta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

kde n_0 je index lomu okolí, n_1 je index lomu jádra a n_2 je index lomu pláště



Měření numerické apertury

Numerická apertura (NA) je důležitý parametr pro posuzování účinnosti vazby mezi optickým zdrojem a vláknem, resp. mezi dvěma vlákny nebo mezi vláknem a optickým detektorem.

Měření se numerická apertura zjišťuje z průběhu **vyzařovací charakteristiky**, resp. ze šířky vyzařovací charakteristiky v 5% maximální intenzity (dle IEC i EIA).

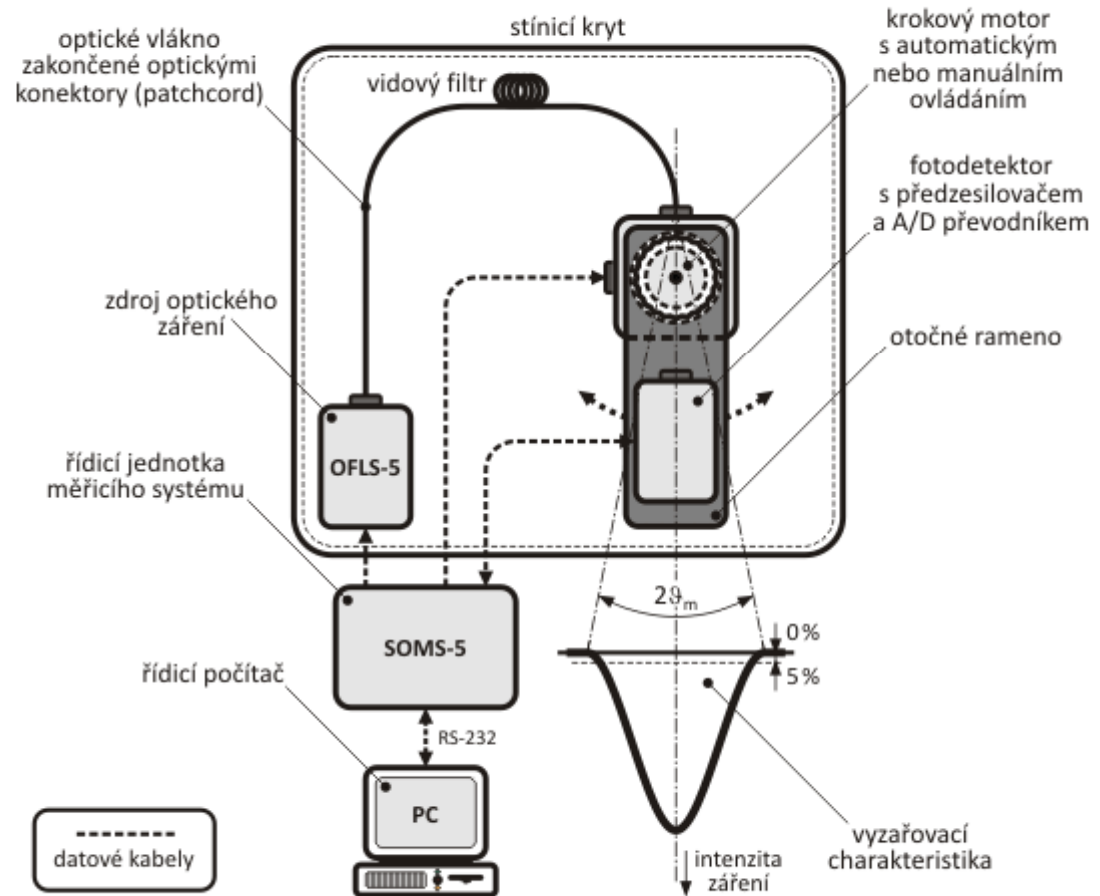
Optické vlákno je navázáno k optickému vysílači (např. **OFLS-5 (LASER)** nebo **LED**) prostřednictvím vhodného vazebního členu. Na výstupu optického vlákna je na otočném rameni pevně upevněn optický přijímač (např. **APD (lavinová fotodioda)**), který snímá intenzitu záření v závislosti na velikosti úhlu, měřeného od osy optického vlákna.

V současnosti se diskutuje, zda odečítat hodnotu numerické apertury ze šířky vyzařovací charakteristiky v 5% maximální intenzity (pokles optického výkonu oproti maximální hodnotě o **-13 dB**) nebo ze šířky v **10%** maximální intenzity (pokles oproti maximu o **-10 dB**).

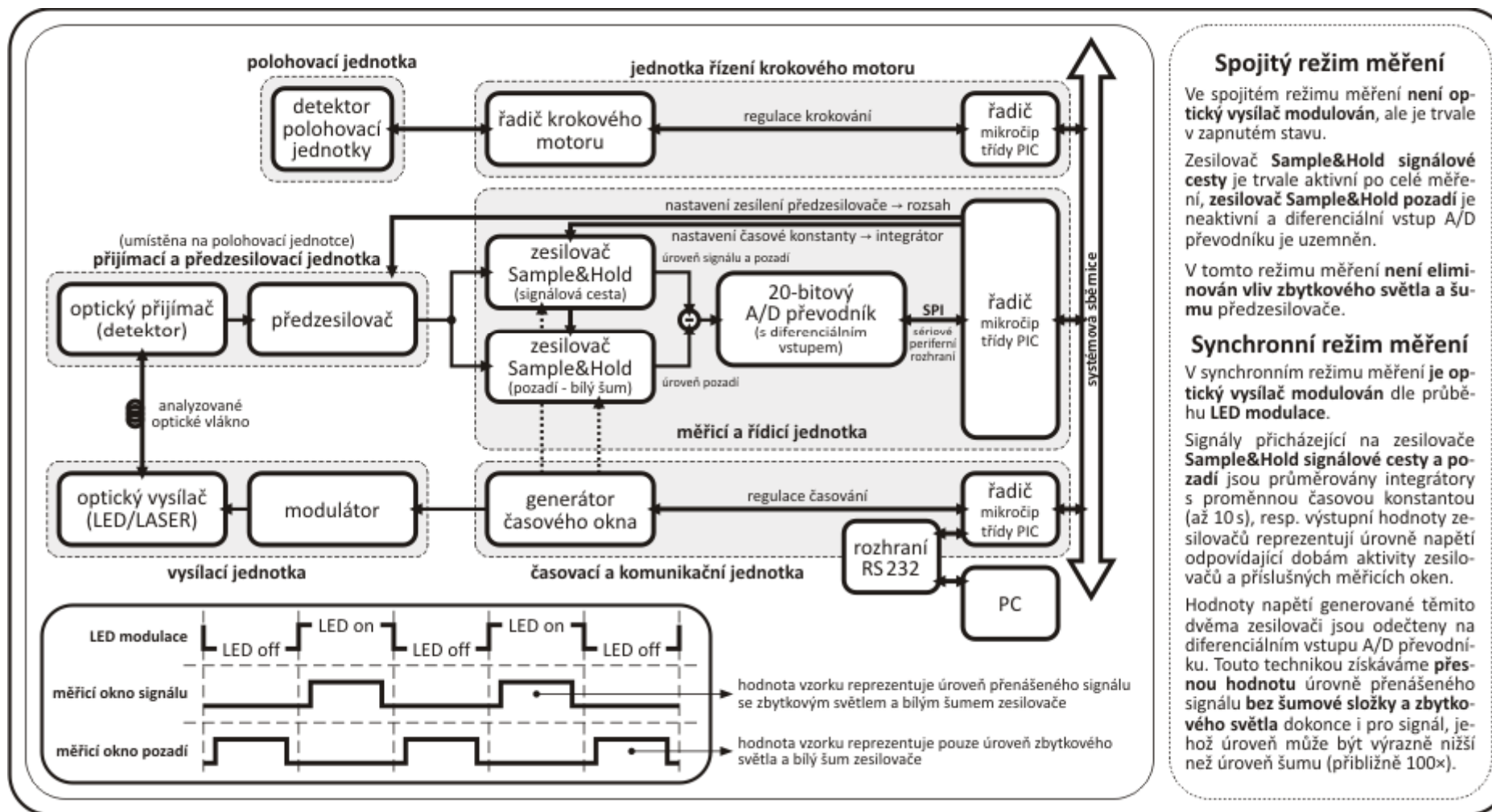
Měření se provádí ve vzdálené oblasti, tj. ve vzdálenosti z značně větší, než je průměr měřeného optického vlákna. Pro vzdálenou oblast z musí platit:

$$z > \frac{d^2}{\lambda} \quad [m]$$

kde **d** [m] je průměr optického vlákna a **λ** [m] je vlnová délka.



Blokové schéma pracoviště pro měření NA



Spojité režim měření

Ve spojitém režimu měření **není optický vysílač modulován**, ale je trvale v zapnutém stavu.

Zesilovač **Sample&Hold signálové cesty** je trvale aktivní po celé měření, **zesilovač Sample&Hold pozadí** je neaktivní a diferenciální vstup A/D převodníku je uzemněn.

V tomto režimu měření **není eliminován vliv zbytkového světla a šumu** předzesilovače.

Synchronní režim měření

V synchronním režimu měření **je optický vysílač modulován** dle průběhu LED modulace.

Signály přicházející na zesilovač **Sample&Hold signálové cesty a pozadí** jsou průměrovány integrátory s proměnnou časovou konstantou (až 10 s), resp. výstupní hodnoty zesilovačů reprezentují úroveň napětí odpovídající dobám aktivity zesilovačů a příslušných měřicích oken.

Hodnoty napětí generované těmito dvěma zesilovači jsou odečteny na diferenciálním vstupu A/D převodníku. Touto technikou získáváme **přesnou hodnotu** úrovně přenášeného signálu **bez šumové složky a zbytkového světla** dokonce i pro signál, jehož úroveň může být výrazně nižší než úroveň šumu (přibližně 100x).

Vyzařovací charakteristika optického vlákna

Měření vyzařovací charakteristiky

Př. pro PCS (Plastic Claded Silica) optické vlákno s jádrem o průměru $d = 200 \mu\text{m}$ a pro vlnovou délku 850 nm platí pro vzdálenou oblast z :

$$z > \frac{(200 \cdot 10^{-6})^2}{850 \cdot 10^{-9}} = 47,06 \text{ mm}$$

Př. pro gradientní (MM-GI) optické vlákno o průměru jádra $d = 50 \mu\text{m}$ a vlnovou délku 850 nm , resp. 1300 nm je:

$$z(850) > \frac{(50 \cdot 10^{-6})^2}{850 \cdot 10^{-9}} = 2,94 \text{ mm},$$

$$z(1300) > \frac{(50 \cdot 10^{-6})^2}{1300 \cdot 10^{-9}} = 1,92 \text{ mm}$$

Př. pro jednovidové (SM-SI) optické vlákno o průměru vidového pole $d = 9 \mu\text{m}$ a vlnovou délku 1300 nm , resp. 1550 nm je:

$$z(1300) > \frac{(9 \cdot 10^{-6})^2}{1300 \cdot 10^{-9}} = 62 \mu\text{m},$$

$$z(1550) > \frac{(9 \cdot 10^{-6})^2}{1550 \cdot 10^{-9}} = 52 \mu\text{m}$$

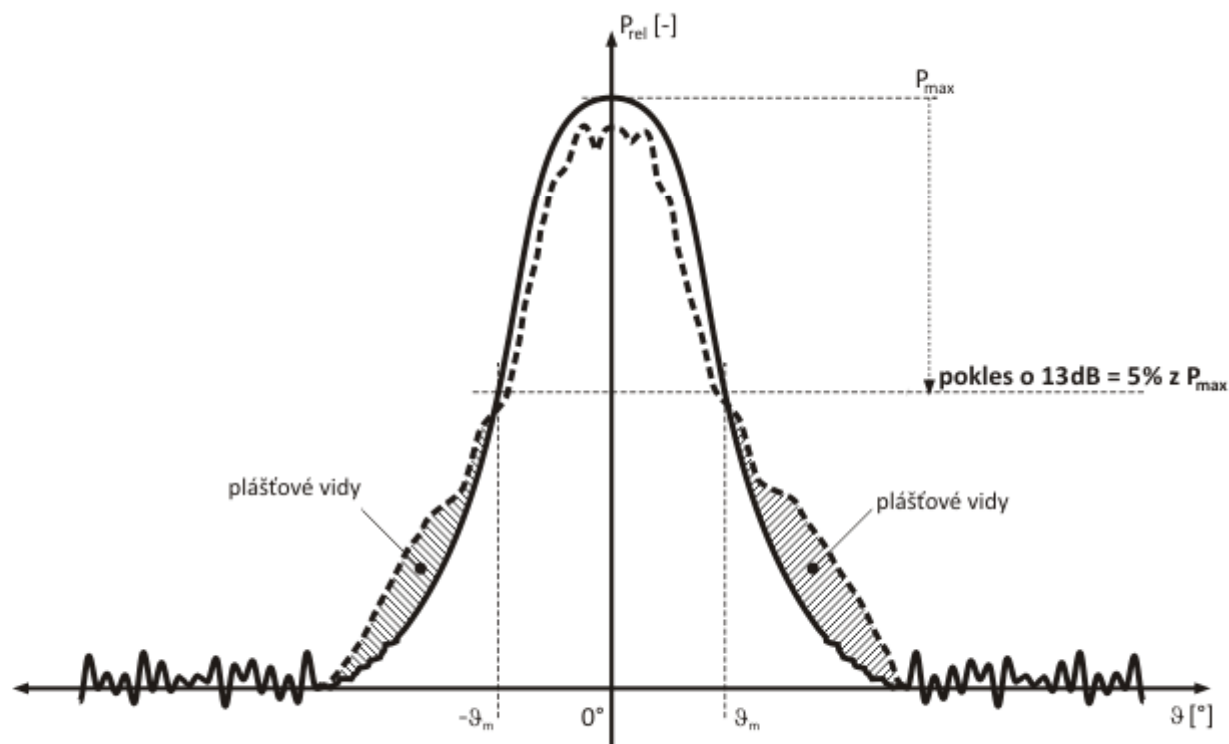
V praxi se pro vzdálenost z volí přibližně desetinasobek vypočtené hodnoty, tj. pro předchozí případy se z pohybuje cca od $0,5 \text{ m}$ do $0,5 \text{ mm}$.

jednovidová optická vlákna (SM-SI): $NA=0,08$ až $0,1$ ($\vartheta_m = 4,6^\circ$ až $5,75^\circ$)

mnohovidová optická vlákna (MM-SI): $NA=0,3$ až $0,4$ ($\vartheta_m = 17,45^\circ$ až $23,6^\circ$)

gradientní mnohovidová optická vlákna (MM-GI) – $50/125 \mu\text{m}$: $NA=0,2$ ($\vartheta_m = 11,5^\circ$)

gradientní mnohovidová optická vlákna (MM-GI) – $62,5/125 \mu\text{m}$: $NA=0,26$ až $0,27$ ($\vartheta_m = 15,1^\circ$ až $15,7^\circ$)



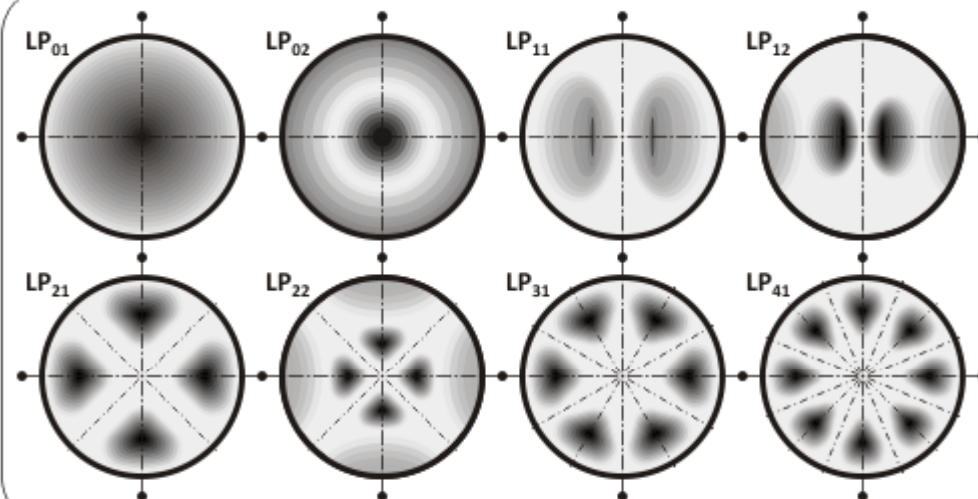
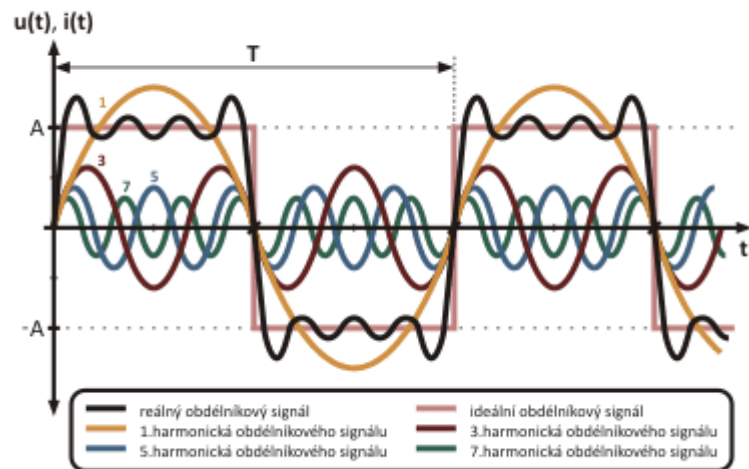
Vysvětlení pojmu „vid“

Každý periodický signál libovolného tvaru lze rozložit na součet nekonečného množství harmonických signálů s charakteristickou frekvencí, resp. počáteční fází a amplitudou. Jakýkoli lichý periodický signál lze matematickými operacemi rozložit na sinusové složky, kterým se říká **harmonické složky**. Vždy platí, že kmitočty těchto harmonických složek jsou celistvými násobky základního kmitočtu signálu.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos kx + b_k \cdot \sin kx)$$

sudá funkce, tzn. ($f(x) = f(-x)$) jsou všechny členy $b_k = 0 \rightarrow$ pouze cosinové členy

lichá funkce, tzn. ($f(x) = -f(-x)$) jsou všechny členy $a_k = 0 \rightarrow$ pouze sinové členy



Vidové vzory jednotlivých vidů optického vlákna

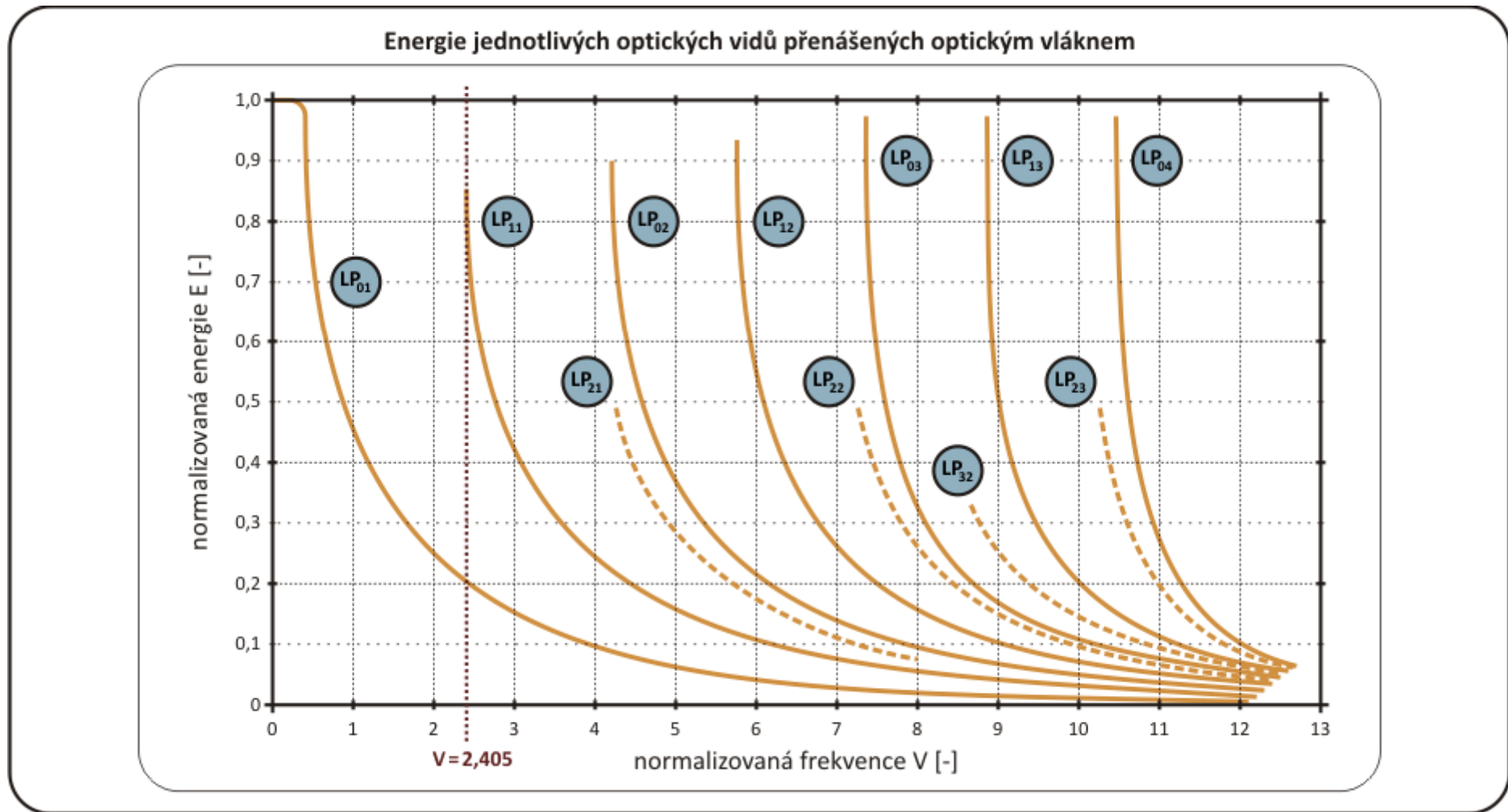
Počet vidů v optickém vlákne můžeme stanovit pomocí tzv. **normalizované frekvence**. Normalizovaná frekvence zohledňuje konkrétní vlnovou délku a materiál, ze kterého je optické vlákno vyrobeno. Právě tato frekvence určuje, zda-li je optické vlákno jednovidové nebo mnohovidové. Pro jednovidová optická vlákna platí $V \leq 2,405$. Normalizovaná frekvence je pak definována jako:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA$$

kde a je průměr jádra optického vlákna
a NA je jeho numerická apertura.

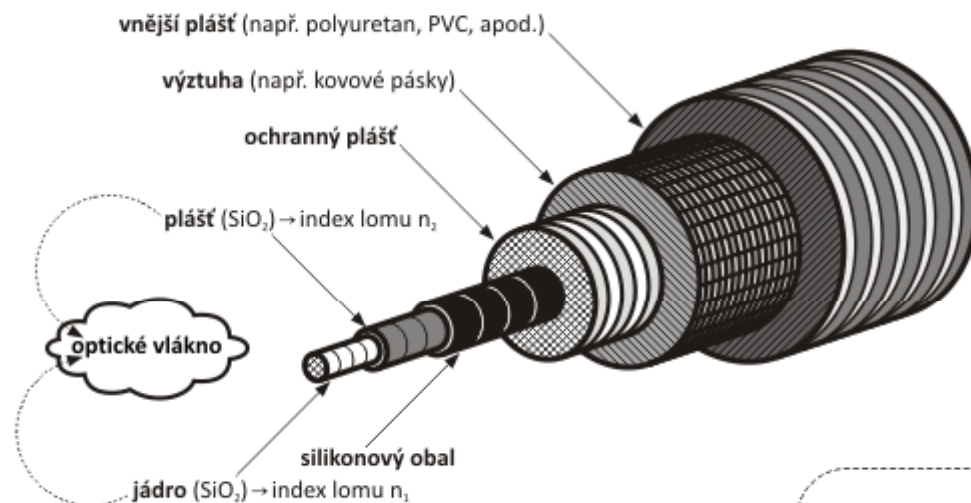
Pokud potřebujeme snížit počet vidů v optickém vlákne, musíme použít optické vlákno s malým průměrem jádra (proto mají jednovidová optická vlákna malý průměr jádra) nebo změnit použitou vlnovou délku nebo snížit NA (zmenšit rozdíl indexů lomu n_1 a n_2).

Vidová energetická bilance



Konstrukční vlastnosti optických vláken

Konstrukce optických vláken



Optické vlákno je vždy **simplexní** (jednosměrný) spoj, tj. na jedné straně je vysílač a na straně protější je přijímač \Rightarrow pro vytvoření duplexního spoje je vždy nutná dvojice optických vláken \rightarrow pro každý směr jedno.

Optická vlákna jsou velmi citlivá na **mechanické namáhání a ohyby** \Rightarrow jejich ochrana je zajištěna konstrukčním řešením optického kabelu, který kromě jednoho či více optických vláken obsahuje i vhodnou výplň, zajišťující potřebnou mechanickou odolnost.

Ochranu optických vláken lze rozdělit do dvou úrovní:

- **primární ochrana** \rightarrow zajišťuje pružnost optického vlákna
- **sekundární ochrana** \rightarrow zvyšuje mechanickou odolnost optického vlákna

Optické kabely s odstraněnou sekundární ochranou jsou běžně využívány u optických propojovacích kabelů (pathcordů) \Rightarrow **optická vlákna s tzv. těsnou sekundární ochranou**, která integruje běžnou primární a sekundární ochranu.

Optická vlákna s tzv. **těsnou sekundární ochranou** – výhody a nevýhody:

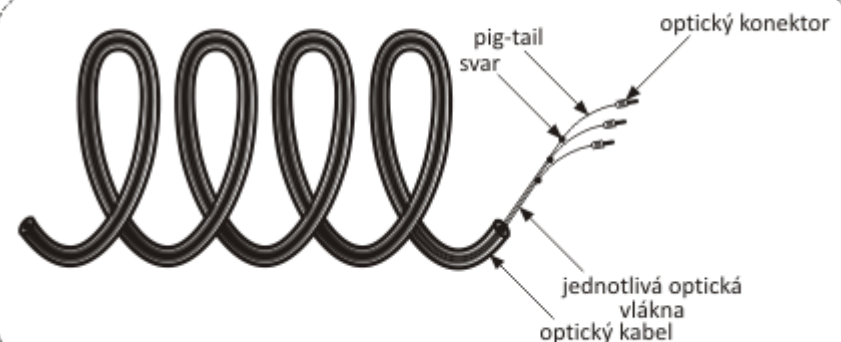
- **vyšší cena** \rightarrow nevhodné pro propojování optických systémů na velké vzdálenosti
- **možnost přímého osazení optickými konektory**

Výhody optických vláken:

- využití pro systémy pracující s vysokými přenosovými rychlostmi
- naprostá **nečitlivost vůči elektromagnetickému rušení** \rightarrow nasazení v průmyslových aplikacích
- **vysoká bezpečnost proti odposlechu**, malý průměr kabelů a nízká hmotnost

Nevýhody optických vláken:

- **vysoké nároky na kvalitu výrobního procesu** \rightarrow výsledná čistota optického vlákna 99,9999%
- poměrně vysoká cena



Znázornění pig-tailu

Vlastnosti jednotlivých typů optických vláken

- **Vlastnosti jednovidových vláken (SM-SI):**
 - **nejvyšší přenosové rychlosti** ze všech typů optických vláken (až Gbit/s na 1 km)
 - **schopnost vést pouze jediný vid** (mód) bez odrazů, resp. ohybů
 - **Pozn.:** dosaženo velmi malým průměrem jádra (řádově jednotky mikrometrů), resp. velmi malým poměrným rozdílem indexů lomu jádra a pláště
 - jednovidová vlákna jsou **výrazně dražší** než vlákna mnohovidová
 - použití pro **přenosy na velké vzdálenosti** (i více než 100 km bez nutnosti využití opakovačů)
 - pro své buzení vyžadují **laserové diody (LD)**
- **Vlastnosti mnohovidových vláken (především gradientních (MM-GI)):**
 - **relativně nízká výrobní cena**
 - **snazší mechanismus spojování** jednotlivých optických vláken
 - **velká hodnota numerické apertury** ⇒ snazší navázání paprsku do aktivní zóny optického vlákna
 - možnost buzení optického vlákna **luminiscenční diodou (LED)**

Spojování optických vláken

Spojování optických vláken

Při projektování optických tras je snahou, aby se v opakovacích úsecích objevovalo **pouze nezbytné množství spojek**, a proto se u výrobců objednávají **velmi dlouhé kabelové délky**. Každé spojení optického vlákna, resp. každá optická spojka totiž zvyšuje **celkový útlum optické trasy** a navíc zvětšuje i **pravděpodobnost vzniku možné poruchy**. Z těchto důvodů se v tvárnicových tratích místních sítí **zatahují nebo zafukují optické kabely** do trubek **HDPE** (High-Density PolyEthylene – vysokohustotní polyetylen s nízkým koeficientem tření) i přes více kabelových komor a v dálkových sítích se ukládají výrobní délky 2 km, 4 km, ale i 6 km dlouhé.

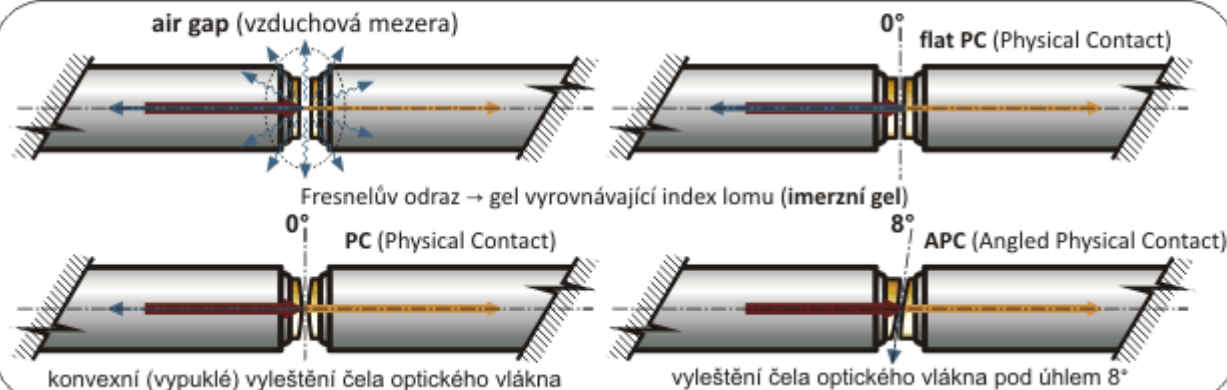
Použitelná řešení pro spojování optických vláken

1. **spojování optickými konektory přes adaptor** (rozebíratelné spojení) – **kvalitní zalomení** (hladké a kolmé na osu optického vlákna), **zasunutí** do V-drážky nebo přesně kalibrované trubičky, **aretace** proti samovolnému uvolnění
2. **spojování mechanickou spojkou** (rozebíratelné i nerozebíratelné spojení) – **imerzní gel** (útlum odrazu ≥ 50 dB), **šroubované mechanické spojky** \times **teplem smržitelné mechanické spojky**
3. **spojování svařováním** (nerozbíratelné spojení) – realizace elektrickým obloukem nebo laserem (plamenem, lepením)

Optické konektory

Hlavní požadavky na optické konektory jsou **malý vložný útlum**, **velký útlum odrazu**, **vyšší životnost a spolehlivost** i při jejich častém rozpojování a spojování v konektorových spojkách (adaptorech).

Odraz na rozhraní, resp. odražená energie vracející se nazpět do zdroje záření, může narušit jeho kmitočtovou stabilitu. Konstrukční úpravy optických konektorů za účelem **dosažení extrémně vysokých hodnot A_{odr}** \rightarrow **zvýšení hodnoty A_{vl}** .



konektor typu FC (Fibre Connector)

- konektor určený pro SM a MM optická vlákna v provedení PC nebo APC, vložný útlum: 0,5 až 1 dB, útlum odrazu > 40 dB

konektor typu ST (bajonetový typ konektoru)

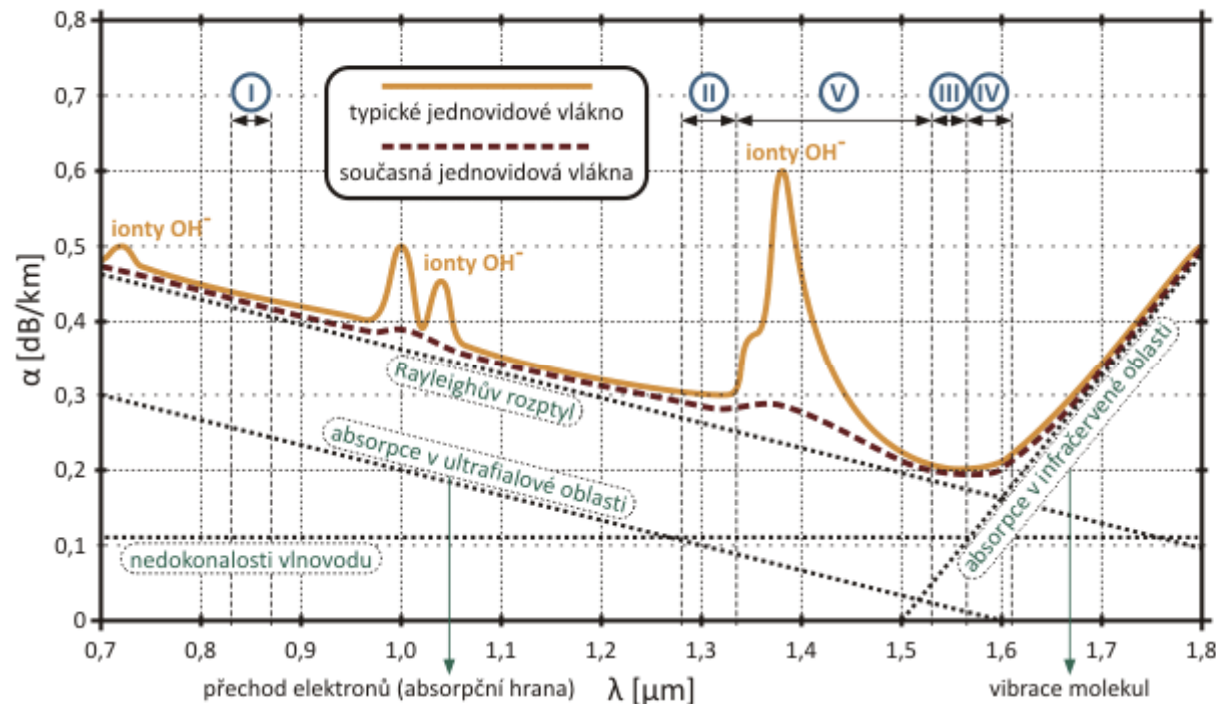
- konektor určený pro SM a MM optická vlákna v provedení PC nebo APC, vložný útlum: 0,4 dB (SM), resp. 0,5 dB (MM)

konektor typu SC (i duplexní provedení)

- konektor určený pro SM a MM optická vlákna v provedení PC (modrý) nebo APC (zelený), vložný útlum: 0,2 až 0,45 dB

- další optické konektory: SMA, E2000, LC, FDDI, ...

Měrný útlum optického vlákna (1.část)



Měrný útlum optického vlákna

Obecně lze u reálných systémů konstatovat, že s narůstající vzdáleností od zdroje postupně klesá výkon přenášeného optického svazku (signálu).

Měrný útlum α je především způsoben následujícími vlivy:

- **vlastní absorpce** – tepelné ztráty na vlastních molekulách optického materiálu → provoz na třech λ (850 nm, 1310 nm, 1550 nm).

- **nevlastní absorpce** – ztráty optického výkonu na nečistotách (molekuly kovů, ionty OH⁻ (optická vlákna založená na SiO₂), resp. CH⁻ (plastová optická vlákna)).

- **lineární rozptyl** – materiál jádra a pláště není ideálně homogenní → hlavní složka útlumu optických vláken, jeho velikost roste se čtvrtou mocninou vlnové délky.

- **nelineární rozptyl** – u části optického záření dochází ke změně jeho vlnové délky → z hlediska pracovní vlnové délky je tato část energie ztracena.

- **ztráty mikroohyby** (řádově mm a menší) – kritické pro jednovláknová optická vlákna.

- **ztráty makroohyby** (řádově desítky mm)

Pro přenos optického signálu se využívá několik přenosových oken, které jsou dány technologickými možnostmi výroby (absorpce, disperze).

I.okno (kolem 850 nm)

Útlumová charakteristika je zde silně klesající a dosahované hodnoty měrného útlumu jsou pro využití zejména v dálkových přenosech příliš vysoké. V prvním přenosovém okně jsou pro buzení používány levné zdroje záření (většinou polovodičové diody typu LED).

II.okno (1280 nm až 1335 nm)

Je nejnižším a historicky prvním přenosovým oknem plně využitelným pro jednovláknový přenos na optickém vlákne 9/125 μm . Dosahovaná hodnota měrného útlumu je pod hranici 0,35 dB/km, a proto je toto okno vhodné pro přenosy na střední vzdálenosti (cca do 60 km).

III.okno (1530 nm až 1565 nm)

Je přenosovým oknem, kde se u křemenného optického vlákna (SM-SI) nachází minimum měrného útlumu, typicky okolo hodnoty 0,2 dB/km. Přenosové okno se používá pro dálkové přenosy s nominální délkou přesahující 60 km.

IV.okno (1565 nm až 1610 nm)

Okno se nachází za absolutním minimem měrného útlumu, je však natolik ploché, že se útlumové parametry od třetího okna liší jen minimálně. Využití např. u systémů WDM při dálkových přenosech spojením III. a IV. přenosového okna. Důsledkem je zdvojnásobení celkové přenosové kapacity.

V.okno (1335 nm až 1530 nm)

Pro přenosy využitelné od konce 90.let, kdy byla technologicky zvládnuta výroba optických vláken eliminující příměsi OH iontů natolik, že se ztrácí hlavní lokální maximum na vlnové délce 1380 nm. Spojená přenosová okna III., IV. a V. pak tvoří souvislý přenosový kanál o šířce pásma 50 THz.

Měrný útlum optického vlákna (2.část)

Materiálová absorpce

Materiálová absorpce představuje ztráty, které souvisí s materiálem vlákna a s procesem jeho výroby. **Materiálová absorpce snižuje optický výkon vlivem přeměny na teplo.** Toto oteplení se velice špatně měří u telekomunikačních vláken, ale u vláken kde se přenáší velká energie tam se oteplení projeví (např. u laserů).

Vlastní absorpce

Je způsobena interakcí procházejícího světla se základními stavebními atomy optického vlákna. Do této skupiny lze zařadit **absorpce v infračervené oblasti, ultrafialové oblasti a absorpce vlastním materiálem SiO₂.** Absorpce skleněným materiálem jsou velmi malé. V ultrafialové oblasti je způsobena **absorpcí s valenčními elektrony** a z technologického hlediska je to zatím neodstranitelný problém. V infračervené oblasti je to pak **kmitání celých molekulových útvarů.** S touto absorpcí se dá částečně manipulovat. Pokud jsou molekulové útvary těžší, tak světlo jej nedokáže rozkmitat a právě toho se využívá k posunutí IR absorpce k nižším vlnovým délkám. Musí se sice opustit velmi dobrý materiál SiO₂, ale u nových materiálů je absorpce zase o něco nižší.

Nevlastní absorpce

Největší nevlastní absorpci mají na svědomí **vodní ionty (OH⁻)**. Průběh útlumu OH⁻ iontů je zajímavý tím, že má **dva základní vibrační módy**, na 2,7 μm a 4,2 μm. Od těchto základních módů vznikají další harmonické, na 1,38 μm, 0,95 μm a 0,72 μm a jejich kombinační složky na 1,24 μm, 1,13 μm a 0,88 μm. **Příměs OH⁻ iontů ve skle vytváří mikrotrhliny.** Díky těmto mikrotrhlinám jsou skleněné materiály náchylné na praskání. Další příměsi, které zvyšují měrný útlum jsou ionty kovů.

poměr nečistot 1:10⁹

ionty	vlnová délka absorpce (nm)	útlum (dB/km)
Cr ³⁺	625	3,6
C ²⁺	685	0,1
Cu ²⁺	850	3,1
Fe ³⁺	1100	0,68
Fe ²⁺	400	0,15
Ni ²⁺	650	0,1

Ztráty ohybem (makroohyby)

Část vidu (paprsku) která se nachází na vnější straně ohybu vlákna by se musela šířit větší rychlostí než je rychlost světla v daném prostředí, aby byla splněna podmínka kolmosti vlnoplochy ke směru šíření. Toto není možné a část energie je tudíž z vlákna vyvázána (vyzářena) z vlákna ven.

!!! kritický poloměr ohybu při montáži !!!

Ztráty ohybem (mikroohyby)

Mikroohybové ztráty jsou způsobené existencí drobných nedokonalostí povrchu vlákna, které vznikají např. ve výrobním procesu optického vlákna. Mikroohybové ztráty jsou závislé na vlnové délce a platí, že čím větší je vlnová délka, tím větší jsou ztráty. Velmi těžko se počítají, většinou se určují experimentálně.

Materiálový lineární rozptyl

Má za důsledek lineární přechod části optického výkonu obsaženého v jednom vidu do vidu nového.

Rayleighův rozptyl

Je to dominující jev v oknech optické komunikace (převážně ve spodní části). **Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky.** Je důsledkem malých náhodných nehomogenit atomové struktury vlákna vztaheno k vlnové délce procházejícího světla. Tento jev se nedá odstranit dokonce ani podchlazením vlákna na absolutní nulu, protože při absolutní nule dojde k "zamrznutí" jednotlivých pozic atomů v krystalické mřížce, ale světlo se pak kolem těchto útvarů ohýbá a vznikají ztráty rozptylem. Lze jej částečně eliminovat posunem pracovní frekvence do IR oblasti. **Rayleighův rozptyl je dle koeficientu γ přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu n a klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky λ .**

Mie rozptyl

Vzniká na nehomogenitách srovnatelných vlnovou délkou. **Je způsoben nedokonalostí válcové struktury vlnovodu, kolísáním průměru jádra, napětím v optickém vlákně, mikroskopickými bublinami a dalšími aspekty srovnatelné s vlnovou délkou.** Rozptýlí se zvyšuje významně pokud se geometrické nepravidelnosti překročí 1/10 vlnové délky. Mieho ztráty lze částečně eliminovat: zdokonalení výrobního procesu vlákna, odstranění nerovnoměrností při výrobě a pečlivé tažení vlákna a nanášení dalších vrstev.

Materiálový nelineární rozptyl

Nelineární rozptyl je interakce procházejícího světla s molekulami materiálu optického vlákna.

Ramanův rozptyl

Je způsoben interakcemi světelné vlny s kmity molekul světlovodného materiálu. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. Frekvenční posuv v dopředném i zpětném směru.

Brillouinův rozptyl

Je způsoben interakcemi akustických vln ve světlovodu a světelné vlny o nadkritickém výkonu. Frekvenční posuv ve zpětném směru.

Stimulovaný rozptyl

Jev při kterém dochází k rozptýlu světelné vlny srážkami s tepelně kmitajícími atomy. Frekvenční posuv v dopředném směru.

Čtvrtvlnné směšování

Jev, při němž interakcí dvou a více signálů různých vlnových délek vznikají signály o nových vlnových délkách.

Disperze optického vlákna (1.část)

Disperze optického vlákna

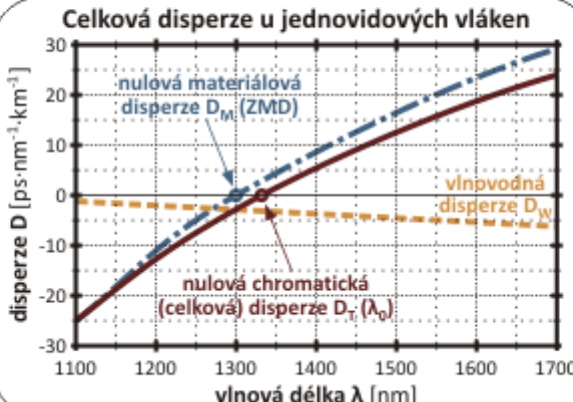
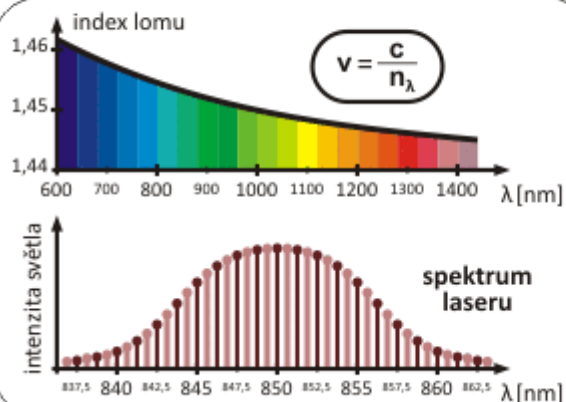
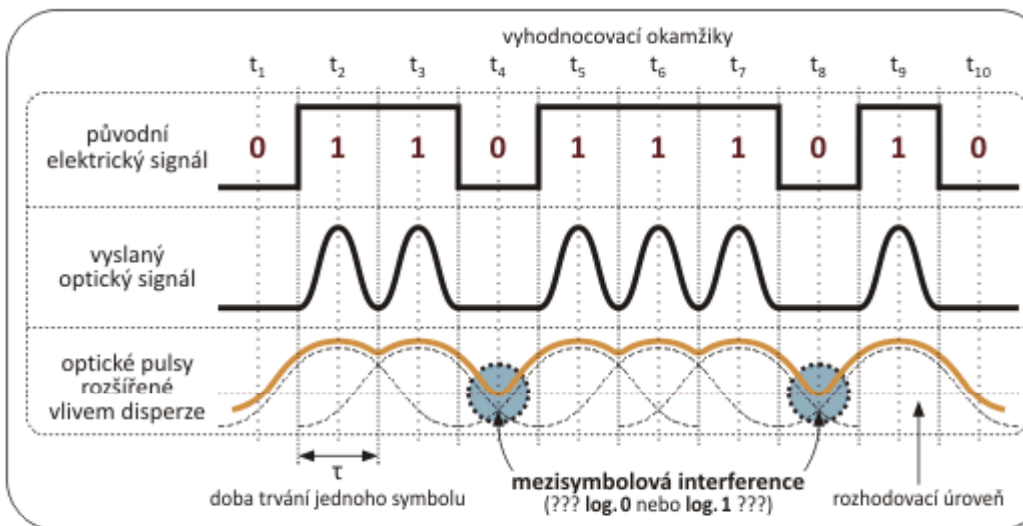
Disperze je jev, který nejvíce ovlivňuje přenosové vlastnosti optických vláken (konkrétně **maximální dosažitelnou přenosovou rychlost v_p**). Disperze má za následek rozšiřování optických pulsů při průchodu vláknem (**zmenšuje se jeho špičková velikost a zvětšuje se jeho šířka**). Tento negativní jev vzájemného ovlivňování jednotlivých optických pulsů se nazývá **mezisymbolová interference**. Pro původní elektrický signál to může mít na konci přenosové cesty neblahé účinky (**prolnutí jednotlivých pulsů – nemožnost správně rozlišit stavy logická 1 a logická 0**).

Chromatická disperze

Chromatická disperze má tři složky a má původ v závislosti optického indexu lomu na vlnové délce, pozorovatelného u většiny pevných látek, křemíkové sklo (SiO_2) nevyjímaje.

Materiálová disperze

Materiálová disperze je zapříčiněna tím, že přenášený světelný svazek je složen z velkého počtu různých vlnových délek a tyto jednotlivé vlnové délky (dílní složky) se šíří různou rychlostí → **na konci optického vlákna se jednotlivé složky spektra skládají s časovými rozdíly, tzn. s jiným časovým průběhem než na jeho začátku**.



Obecně se dá říci, že čím kratší je vlnová délka, tím pomaleji se vlnová délka šíří. **Nenulová šířka spektra je typickou vlastností optických signálů**. Postranní spektrální čáry laserů mají původ ve fyzikální podstatě činnosti laseru.

Vlnovodná disperze

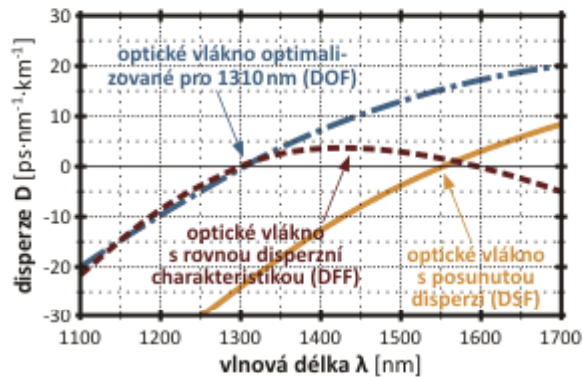
Vzniká v důsledku změny tvaru vidu s vlnovou délkou. Zanedbatelná u MM vláken, důležitá pro SM vlákna. Tento parametr je vždy záporný, umožňuje nám tedy kompenzovat materiálovou disperzi, protože **celková chromatická disperze je součtem materiálové a vlnovodné a profilové disperze**.

Profilová disperze

Je závislost poměrného rozdílu indexu lomu jádra a pláště na vlnové délce. **Je poměrně malá a většinou se zanedbává**.

Disperze optického vlákna (2.část)

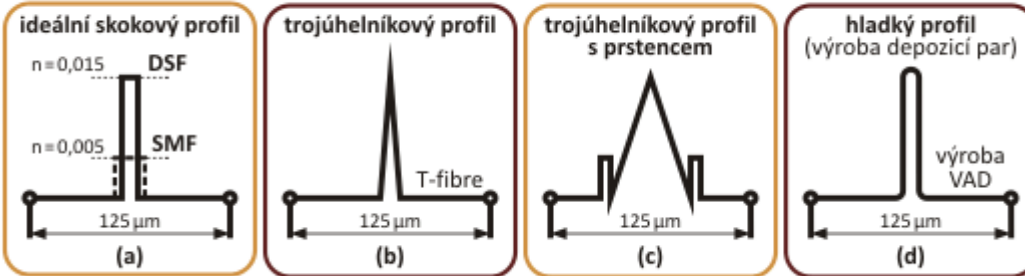
Optická vlákna s modifikovanou disperzní charakteristikou dle ITU-T G.65x



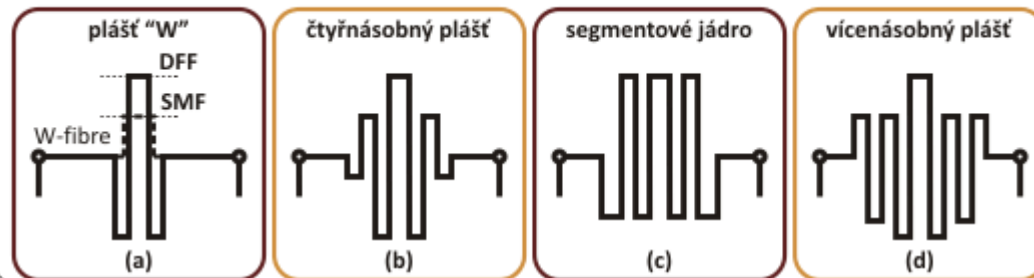
Polarizačně-módová (vidová) disperze

Polarizačně-módová disperze se opět projevuje různou rychlostí šíření, tentokrát však jednotlivých vidových složek přenášeného optického svazku. Příčinou je **anizotropie** (nestejný index lomu v osách x a y příčných ke směru šíření). Polarizačně-módová disperze tvoří mez přenosových vlastností vlákna, protože zatím nelze potlačit. Dá se však částečně eliminovat zavedením speciálních optických vláken, která jsou prostorově (geometricky) orientována.

Optická vlákna s posunutou disperzí DSF (Dispersion Shift Fibre) dle ITU-T G.653



Optická vlákna s rovnou disperzní charakteristikou DFF (Dispersion Flattened Fibre) dle ITU-T G.654



zpoždění Δt jednotlivých vidových složek způsobené vlivem polarizačně-módové (vidové) disperze optického vlákna



Aplikační parametry optických vláken

- **Jednovidová optická vlákna (SM-SI):**
 - **měrný útlum:** 0,35 dB/km (pro $\lambda=1310$ nm), 0,2 dB/km (pro $\lambda=1550$ nm)
 - **šířka pásma:** pro $\lambda=1310$ nm je mnohem větší než 100 GHz·km
 - **použití:** pro dlouhé trasy a vysoké přenosové rychlosti, nutnost buzení polovodičovým laserem pro zmenšení vlivu disperze
- **Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu (MM-SI):**
 - **měrný útlum:** 2,6 až 50 dB/km (pro $\lambda=850$ nm)
 - **šířka pásma:** 6 až 50 MHz·km
 - **použití:** krátké trasy (mezi místnostmi, budovami, ...) s malým nárokem na šířku pásma, nespornou výhodou je jejich nízká cena
- **Mnohovidová optická vlákna s gradientní změnou indexu lomu (MM-GI):**
 - **měrný útlum:** 2 až 10 dB/km (pro $\lambda=850$ nm), 0,5 dB/km (pro $\lambda=1310$ nm), 0,25 dB/km (pro $\lambda=1550$ nm)
 - **šířka pásma:** 300 MHz·km až 1,5 GHz·km
 - **použití:** aplikace v lokálních počítačových sítích (LAN)

Optické přenosové systémy (WDM)

Optické přenosové systémy - systémy WDM

Princip systémů WDM je založen na myšlence sdružit několik optických kanálů, které byly dříve přenášeny každý jedním vláknem zvlášť, do jednoho vlákna na základě vlnového (wavelength) čili v podstatě frekvenčního dělení.

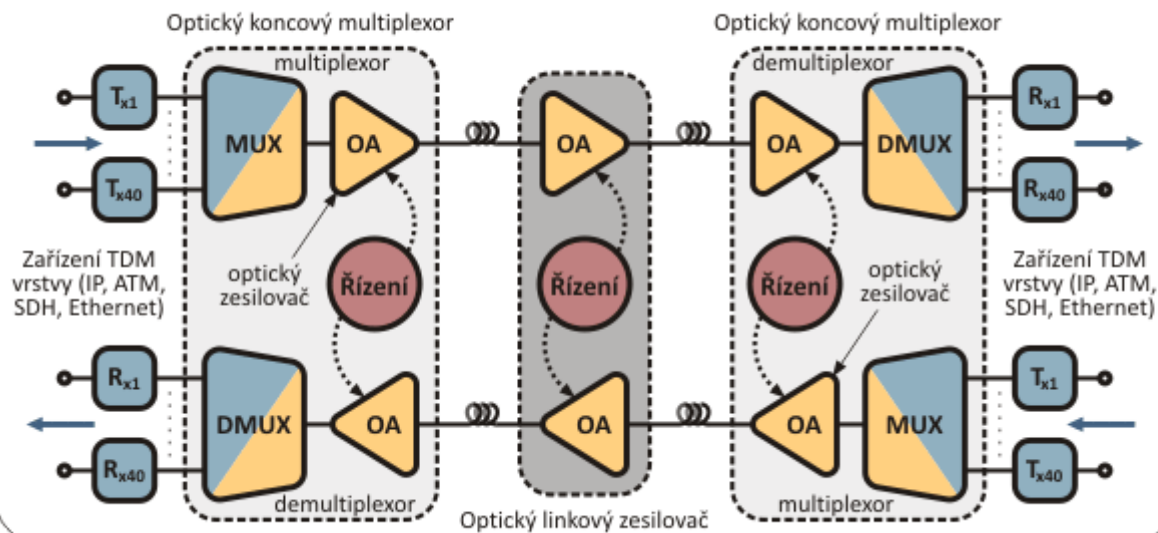
Hustý vlnový multiplex DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) - dle ITU-T G.692

Množinou přípustných nosných frekvencí jsou celočíselné násobky 50 GHz (resp. 100 GHz) ve frekvenčním pásmu od 192,1 THz do 196,1 THz, tzn. celkem 80 (resp. 40) různých kanálů v pásmu od 1528,77 nm do 1560,61 nm, vzdálených od sebe přibližně 0,4 nm (resp. 0,8 nm) ⇒ **hustý vlnový multiplex DWDM** (III. přenosové okno).

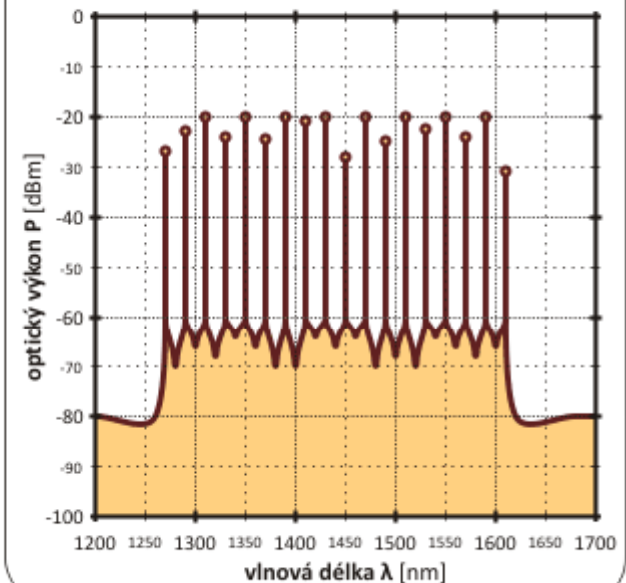
Přenosové rychlosti od 40 až do 80 Gbit/s (dnes laboratorně až jednotky Tbit/s).

Přenos na velké vzdálenosti (až 500 km) **bez nutnosti zesílení** (pouze u jednovláknových (SM) optických vláken).

Obecné blokové schéma systému WDM



Spektrum systému CWDM



Řídký vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) - dle ITU-T G.694 a ITU-T G.695

Pro jednovláknová optická vlákna je množinou vlnových délek pásmo od 1270 nm do 1610 nm, kde je umístěno 18 různých kanálů vzdálených od sebe přibližně 20 nm ⇒ **řídký vlnový multiplex CWDM**.

Přenosové rychlosti do 2,5 Gbit/s.

Přenos na velké vzdálenosti (až 500 km) **bez nutnosti zesílení** (pouze u jednovláknových (SM) optických vláken).

WDM – zdroje záření pro optické vysílače

Zdroje záření pro systémy WDM

Zdroje optického signálu lze charakterizovat jako systémové prvky, přeměňují elektrický signál na signál optický. V oblasti telekomunikační techniky se však téměř výhradně, především díky svým výhodným vlastnostem, používají **zdroje polovodičové**. Ty využívají ke generaci optického záření **rekombinaci injektovaných děr a elektronů** do oblasti polovodičového přechodu typu P-N. Volné nosiče jsou do oblasti přechodu injektovány přiložením napětí v propustném směru. Obecně se dají rozdělit do dvou skupin podle stupně spektrální čistoty (koherence svazku) generovaného světla:

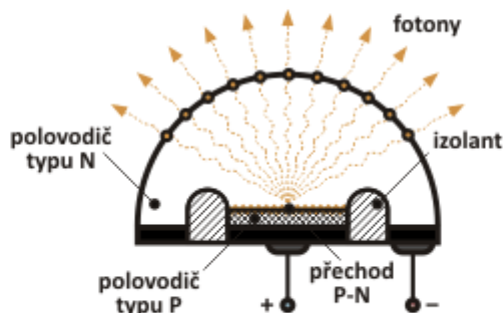
1. **Elektroluminiscenční diody LED** (Light Emitting Diode) - př. homostrukturní hemisférická LED
2. **Polovodičové laserové diody LD** (Laser Diode) - př. heterostrukturní LD

Diody, jak laserové, tak elektroluminiscenční, se budí **vždy v propustném směru**. **Světelná energie** (tok fotonů) se generuje **u diod LED** prostřednictvím **spontánní emise** (v důsledku **rekombinace**), což znamená, že se fotony generují v oblasti přechodu P-N jeden na druhém nezávisle, oproti tomu **u diod LD** je využíváno jevu **koherentního zesilování světla** pomocí **stimulované emise záření** v otevřeném přechodu P-N degenerovaného polovodiče. Stimulovaná emise zde vzniká na úkor spontánní emise a absorpce při inverzním obsazení valenčního a vodivostního pásu injekcí minorů z přechodu.

Elektroluminiscenční diody využívají pro buzení elektroluminiscence injekci minoritních nosičů do přechodu P-N. Světelná energie, uvolněná formou fotonů, vykazuje vlnové délky **od 0,45 až 1,6 μm** . V jejich konstrukcích se využívá nejčastěji binárních a ternárních sloučenin přímozónových a nepřímózónových materiálů A^mB^n , jako jsou GaAs, GaP, GaN, InP, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, apod.

Polovodičové injekční lasery generují koherentní záření s **účinností až 65 %** na vlnových délkách **od 0,8 do 1,6 μm** s kontinuálním výkonem **od 0,1 do 10 mW**, resp. s impulsními výkony **od 10 do 100 W**.

Struktura homostrukturní hemisférické LED



Základní požadavky na zdroje záření

1. Výkon

Výkon zdroje musí být alespoň takový, aby signál prošlý optickým vláknem a přijímaný detektorem byl s požadovanou přesností detekovatelný.

2. Přenosová rychlost

Pro dosažení požadované přenosové rychlosti musí zdroj umožnit odpovídající modulaci (generovat potřebné nosné frekvence).

3. Nominální poloha středu spektrální čáry a její šířka

Oproti běžným jednokanálovým systémům jsou přenosové systémy WDM velmi náročné na stabilitu jednotlivých nosných frekvencí. Spektrální čára zdrojů záření se nesmí vlivem změn teploty ani jiných okolností posunout do polohy příslušející jiným kanálům. Musí být také dostatečně úzká, aby nezasahovala do sousedních kanálů a pro minimalizaci chromatické disperze při šíření signálu podél optického vlákna.

4. Šum

Optický zdroj nesmí vykazovat žádné náhodné fluktuační, resp. náhodné změny charakteru vysílaného optického signálu.

Dále se vyžaduje **mechanická odolnost, necitlivost na změny okolního prostředí** (např. na teplotu), **spolehlivost, nízká cena a dlouhá životnost**.

Hlavní rozdíl mezi LED a LD je v tom, že LD vykazuje na svém výstupu podstatně vyšší optické výkony než LED a její spektrální čistota (koherence) je také o několik řádů vyšší. Spektrální čistotou máme na mysli jaké vlnové délky LED nebo LD obsazují ve spektru. LED zabírají širší pásmo od své jmenovité vlnové délky na rozdíl od LD diod.

WDM – optické zesilovače (1.část)

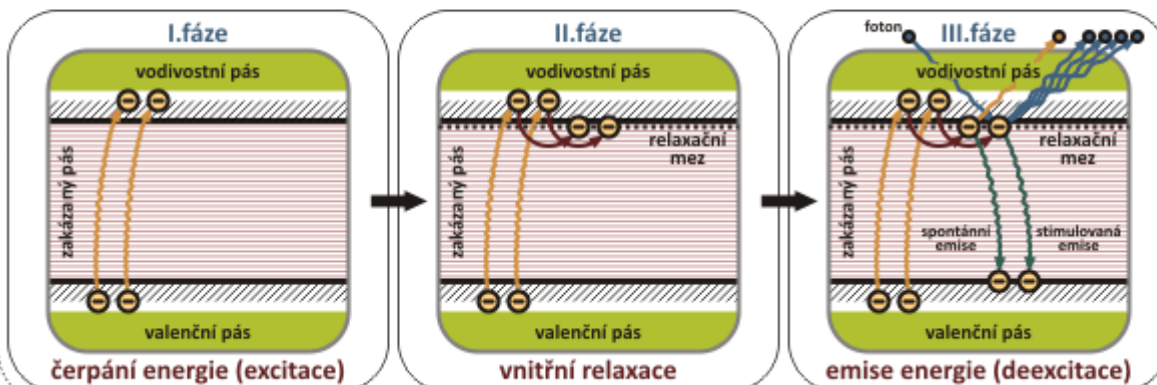
Optické zesilovače pro systémy WDM

Optický zesilovač je jednou z klíčových komponent WDM technologie, protože umožňuje zesílit všechny příspěvkové optické kanály v signálu WDM najednou a umí to bez mezipřevodu optického signálu na elektrický a zpět, což znamená **bitovou a protokolovou nezávislost**. Dále bude uveden princip funkce vláknového zesilovače (EDFA), který je v současnosti nejjvhodnějším a také nejužívanějším optickým zesilovačem užívaným pro WDM.

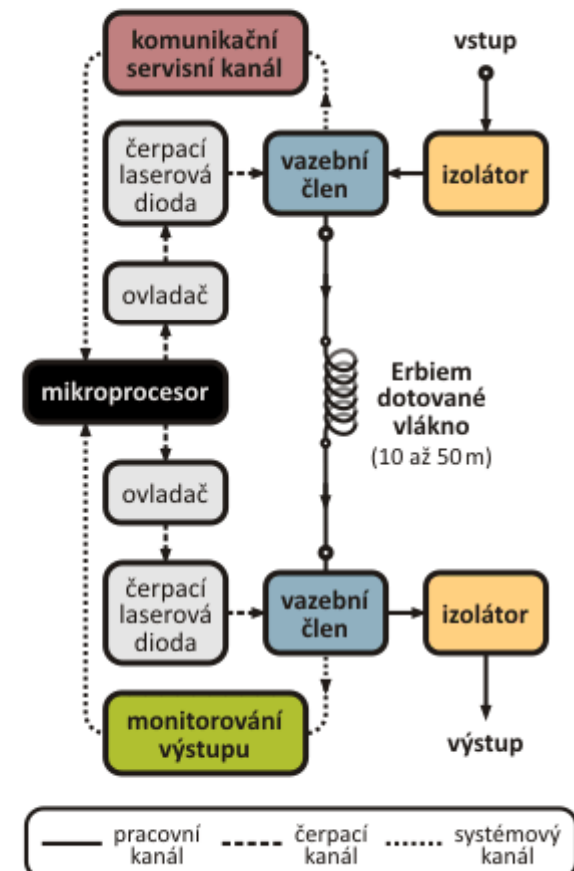
Zesilovač EDFA je založen na principu laseru, tzn. na zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Zjednodušené blokové schéma EDFA zesilovače je uvedeno na vedlejším obrázku. EDFA zesilovač tvoří laserový zdroj záření, tzv. **laserovou pumpou** (čerpací laserová dioda (čerpací kanál) a speciálním optickým vláknem, které je dotované prvky vzácných zemin (Er/Yt).

Vlivem navázaného záření z laserové pumpy (o vlnové délce **980 nm** nebo **1480 nm**, kterou ionty erbia velmi efektivně absorbují) do speciálního optického vlákna o délce několika metrů, **dochází k excitaci atomů** dopovaného prvku na vyšší energetické hladiny. Procesem **vnitřní relaxace** se vzápětí dostanou do poněkud nižší energetické hladiny, která odpovídá energii fotonů na vlnové délce v okolí 1550 nm. Tak vznikne aktivní prostředí s pozitivní inverzí, nezbytné pro laserovou akci. **Ionty erbia** nyní **deexcitují** jednak **spontánně**, tzv. **spontánní emisí**, a jednak **stimulovanou emisí**, kterou stimuluje přítomný užitečný signál WDM. **Spontánní emise je parazitním jevem** a za normálních podmínek ji stimulovaná emise vysoce převyšuje a naprostá většina energie, načerpaná do iontů erbia, která nebyla ztracena relaxací, se tak spotřebuje na **zesílení užitečného signálu** se shodnou vlnovou délkou a fází jako měl původní přenášený signál.



Blokové schéma zesilovače EDFA



WDM – optické zesilovače (2.část)

Optické zesilovače pro systémy WDM

Tím dochází k zesílení přenášeného optického signálu. Optovláknové EDFA zesilovače umožňují zvýšení úrovně signálu až o 50 dB (na jeden kanál, C-pásmo). Vnitřním uspořádáním zesilovače lze dosáhnout velkého rozsahu zesilovaného pásma a tak zesilovat současně signál v C i L-pásmu.

Zesilovač EDFA založený na principu vysvětleném na předchozí slidě může dobře sloužit pro zesilování světla jednoho optického kanálu. Aby však byl úspěšně použitelný i ve WDM aplikacích, musí mít ještě další vylepšení. Předně zisk vlnového zesilovače není stejný pro všechny vlnové délky, ale tvoří spektrální pás. Pro aplikace WDM je nutné, aby zisk zesilovače byl přibližně konstantní na celém spektrálním oboru signálu WDM, tj. aby se každý z optických kanálů zesiloval stejně. Během přenosu dálkovou trasou obvykle signál postupně prochází několika zesilovači, a tedy jejich přenosová funkce se násobí a případné rozdíly ve spektrálním profilu zisku by se stávaly ještě významnějšími, až by to mohlo vést k příliš malému poměru signál/šum pro některé kanály.

Další požadavky na zesilovače pro WDM jsou už shodné s požadavky na běžné zesilovače: dostatečný zisk při nízkém šumovém čísle, teplotní stabilita, spolehlivost, co nejnižší cena. Tyto požadavky mohou být řešeny uspořádáním EDFA podle vedlejšího obrázku. Čerpání, které je nejslabším článkem EDFA zesilovače, je zdvojené, a je tak dosaženo dostatečné spolehlivosti. Nezávislosti na teplotě lze dosáhnout teplotní stabilizací čerpacích diod. Výstupní výkon zesilovače je monitorován, a to v celé spektrální oblasti, kde se nacházejí jednotlivé kanály. Naměřené hodnoty jsou analyzovány mikroprocesorem, který řídí ovladače čerpacích diod. Touto zpětnou vazbou lze dosáhnout nezávislosti výstupního výkonu na každém kanále na spektrální pozici kanálu, na vstupním výkonu každého kanálu i na celkovém počtu kanálů.

Z principu funkce EDFA zesilovače vyplývají různé možnosti nasazení v optickém přenosovém systému. Zesilovače EDFA mohou být aplikovány v zásadě čtyřmi způsoby:

1. Výkonový zesilovač (Booster)

Umísťuje se hned za optický vysílač a slouží k zesílení jeho signálu na maximální úroveň, kterou lze do vlákna navázat. Musí být schopen pojmout poměrně velký vstupní signál z optického vysílače.

2. Průběžný zesilovač (In-line amplifier)

Tento zesilovač je umístěn na trase optického vlákna, zesiluje malý vstupní signál na co největší výstupní signál.

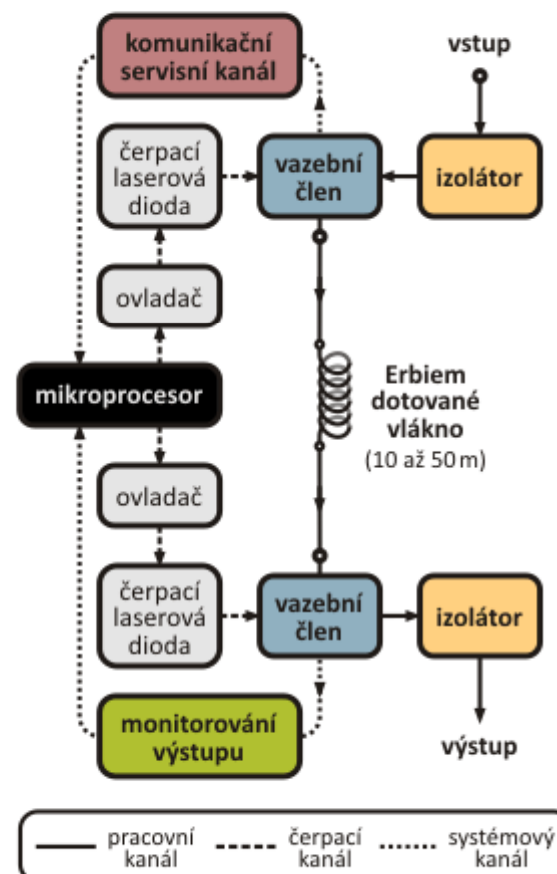
3. Předzesilovač (Pre-amplifier)

Slouží k zesílení velice nízkých úrovní signálu na úroveň dostatečnou pro správnou funkci optického přijímače na konci přenosové trasy. U předzesilovače je kladen požadavek na jeho minimální vnitřní šum.

4. Kompenzátor ztrát v optických sítích (např. CATV)

U optických rozvodů kabelových televizí je snížení úrovně signálu způsobeno především požadavkem rozdělení optického signálu do více vláken. Pomocí EDFA zesilovače je signál zesílen ještě před jeho rozdělením tak, aby byla dosažena stejná úroveň signálu ve výstupních vláknech jako u vlákna původního.

Blokové schéma zesilovače EDFA



WDM – multiplexory a demultiplexory

Soustava dielektrických filtrů

Vlnovody uspořádané do mřížky AWG (Arrayed Waveguide Grating)

Vláknová Braggova mřížka FBG (Fibre Bragg Grating)

V uspořádání demultiplexoru jako **soustavy dielektrických filtrů** dopadá signál WDM na první filtr. Ten propustí první optický kanál na příslušný přijímač, zbylé kanály se odrazí na další filtr, atd. až poslední optický kanál z původního signálu WDM dopadne na poslední přijímač.

Při **uspořádání AWG** je na vlákno navařen vlnovod, který se hodně rozšiřuje, a po krátké vzdálenosti pokračuje dále několika paralelními úzkými vlnovody. Tyto vlnovody se stáčí, takže vytvářejí přibližně soustředné oblouky, které jsou však nestejně dlouhé. Posléze se opět spojují do širokého vlnovodu, který po krátké vzdálenosti ústí opět do úzkých vlnovodů. Těchto výstupních větví je stejně jako příspěvkových optických kanálů ve vstupním signálu WDM. Přesné **geometrické parametry** a **index lomu struktury AWG** je spočítán tak, že **výkon světla**, vstupujícího do prvního širokého místa, **se rovnoměrně rozdělí** do všech úzkých větví. **Různá délka** těchto větví **způsobuje**, že dílčí části vstupního signálu vstupují do druhého širokého místa s **různým fázovým zpožděním** (větší pro složky signálu o kratší vlnové délce). Ve druhém širokém místě tak dochází k **vzájemné interferenci** dílčích částí signálu a celý signál WDM se pak rozdělí tak, že celková intenzita prvního příspěvkového kanálu bude v první výstupní větvi, celková intenzita druhého příspěvkového kanálu bude v druhé výstupní větvi, atd. až celková intenzita posledního příspěvkového kanálu bude v poslední výstupní větvi.

Ve třetím případě je základem demultiplexoru **Braggova mřížka**, vytvořená např. iontovou výměnou nebo molekulární epitaxi ve vlnovodné struktuře, která má být napojena na vlákno. Potom se výkon signálu WDM z vlákna vyzářuje v několika diskrétních směrech, přičemž každý směr odpovídá určitému frekvenčnímu pásmu. Pak už je pouze třeba zajistit, aby detektory jednotlivých příspěvkových kanálů byly situovány tak, aby na ně dopadal signál na té správné nosné frekvenci.

WDM – fotodetektory pro optické přijímače

- **Dopadem optického signálu na fotodetektor a jeho přeměnou na elektrický signál končí optická vrstva** → → k detekci dochází po demultiplexování signálu WDM na jednotlivé elektrické signály.
- **Detektor optického signálu** je součástka, která převádí optický výkon na výkon elektrický. Opět se setkáváme s polovodičovými součástkami těchto typů:
 - **fotodioda PIN**
 - fotodioda bez vnitřního zisku, do jejíž struktury je přidána speciální vrstva intrinsického (vlastního) polovodiče zvětšující její citlivost a účinnost
 - **lavinová fotodioda s vnitřním ziskem APD (*Avalanche Photo Diode*)**
 - uvnitř této diody dochází vlivem silného elektrického pole (velké závěrné napětí) k lavinovému vzniku volných elektronů (primárně uvolněné elektrony díky dopadu fotonů na přechod P-N se tím účinně násobí), čímž se zvětšuje citlivost v porovnání s diodou PIN.
- **Šířka zakázaného pásu je u křemíku (Si) větší než energie fotonu** ⇒ užívají se **germaniové fotodiody PIN** a **fotodiody PIN** na bázi **InGaAs** → **vyšší citlivost** a **tepelná stabilita** (časová odezva desítky pikosekund ⇒ ⇒ šířka pásma až 60 GHz (diody APD se Schottkyho bariérou (vlnovodné struktury) až 100 GHz)).
- **Přednosti technologie WDM:**
 - možnost **transparentního přenosu optických kanálů** o rychlostech od 40 Gbit/s až po jednotky Tbit/s.
 - s použitím technologie **WDM** je tedy možné **budovat páteřní sítě**, ve kterých jsou jednotlivé uzly propojeny vyššími rychlostmi než nabízí současná technologie **SDH**.
 - technologie **WDM** umožňuje **šetřit počet vláken**, potřebných na přenesení určité kapacity nebo přenést tuto kapacitu úzkým hrdlem sítě, kde už volná vlákna nejsou.

Optická transportní hierarchie (OTH)

Vývoj přenosových sítí

Digitální přenosové sítě vznikly na základě telefonních systémů využívajících **pulsně-kódové modulace PCM**. Na postupný nárůst provozu reagovaly multiplexní systémy **plesiochronní digitální hierarchie PDH**. Přenosové rychlosti pro Evropu se pohybují přibližně **od 2 do 140 Mbit/s (E1 až E4)**.

Další nárůst přenosových rychlostí i odlišné pohledy na koncepci přenosových sítí přinesla **synchronní digitální hierarchie SDH**. Přenosové rychlosti se mohou pohybovat přibližně **od 155 Mbit/s do 40 Gbit/s (STM-1 až STM-256)**. Ne vždy je však možné přenášet signály rychlostmi v desítkách Gbit/s optickými vlákny. Proto se využívá pro zvýšení propustnosti vlnové multiplexování **WDM (Wavelength Division Multiplex)**.

Vývoj dospěl k páteřním sítím **OTN (Optical Transport Network)** budovaným na čistě optickém principu na základě hierarchie **OTH (Optical Transport Hierarchy)**, která **definuje jednotnou strukturu a parametry rozhraní pro systémy WDM**.

Cílem je dosáhnout plně transparentní optické vrstvy nezávislé na přenášených signálech (např. **SDH, ATM, IP, Ethernet**) s vlastními mechanismy pro monitorování, sledování výkonnosti přenosu, služební komunikaci, zálohování (ochranné přepínání na optické úrovni). Smyslem je **náhrada funkčnosti sítí SDH tam, kde již kapacitně nestačí, funkcemi optické transportní hierarchie OTH (viz doporučení ITU-T G.709 a ITU-T G.798)**.

Hierarchické stupně OTH

Základní signály optické hierarchie se nazývají **optické transportní moduly OTM (Optical Transport Modul)**. Nejjednodušší varianta signálu (nultý hierarchický stupeň) nepočítá s vlnovým multiplexováním a vysílá digitální tok na jediné vlnové délce s přenosovou rychlostí odvozené z STM-16 až STM-256.

Dále existuje **varianta využívající vlnové multiplexování DWDM** s n vlnovými délkami v redukované formě s označením **OTM-nr** („r“ v označení signálu), tj. bez optického dohledového kanálu.

Plnohodnotné optické transportní moduly mají obecně označení **OTM-n.m**, kde n je počet vlnových délek (optických kanálů) a m vyjadřuje, jaké typy digitálních toků se přenášejí. Základní stupně, pro které je charakteristické, že na všech vlnových délkách se přenášejí digitální toky stejnou přenosovou rychlostí, ukazuje **tabulka stupňů optické hierarchie s vlnovým multiplexováním**.

Vedle základních stupňů OTM se mohou ovšem vyskytnout i vlnové multiplexory s různými kombinacemi přenosových rychlostí na různých vlnových délkách. Všechny tři možné rychlosti podporuje **OTM-n.123** (2,5; 10; 40 Gbit/s), kombinace dvou z nich pak **OTM n.12** a **OTM-n.23**.

Stupně optické hierarchie bez vlnového multiplexování

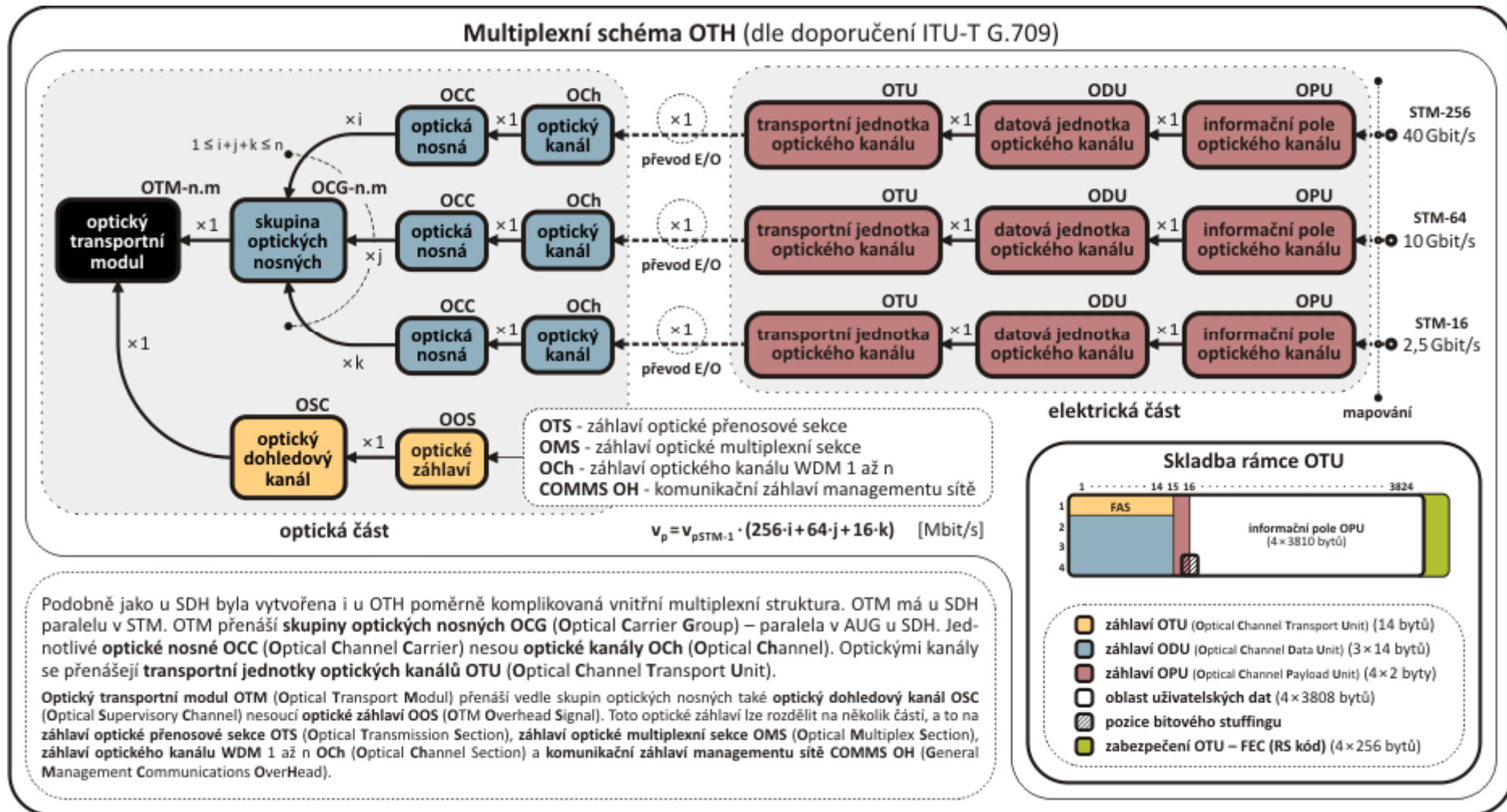
Hierarchický stupeň	Přenosová rychlost v_p [Mbit/s]	Přenášený typ signálu	Užitečná přenosová rychlost v_p [Mbit/s]	Možnost přenosu signálu
OTM-0.1	2666,057	CBR2G5	2488,32	STM-16
OTM-0.2	10709,225	CBR10G	9953,28	STM-64
OTM-0.3	43018,414	CBR40G	39813,12	STM-256

Stupně optické hierarchie s vlnovým multiplexováním

Hierarchický stupeň	Přenosová rychlost v_p [Mbit/s]	Přenášený typ signálu	Užitečná přenosová rychlost v_p [Mbit/s]	Možnost přenosu signálu
OTM-n.1	$n \times 2666,057$	$n \times \text{CBR2G5}$	$n \times 2488,32$	$n \times \text{STM-16}$
OTM-n.2	$n \times 10709,225$	$n \times \text{CBR10G}$	$n \times 9953,28$	$n \times \text{STM-64}$
OTM-n.3	$n \times 43018,414$	$n \times \text{CBR40G}$	$n \times 39813,12$	$n \times \text{STM-256}$

CBR (Constant Bit Rate) ... signál s konstantní přenosovou rychlostí, n ... počet vlnových délek **WDM**

Multiplexní schéma OTH



Konec prezentace

... Děkuji za pozornost ...