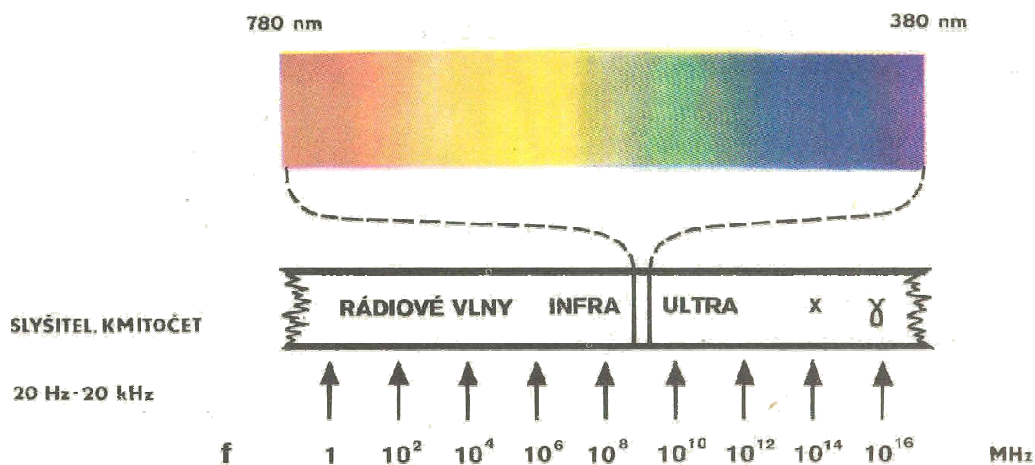


# OPTOELEKTRONIKA

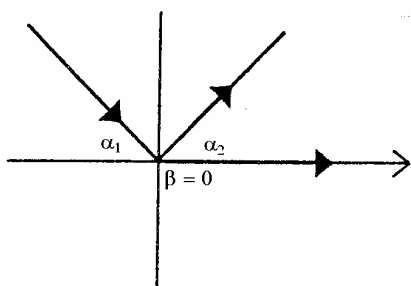
Světlo je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 380nm až 780nm. Světlo si lze představit také jako určité množství částic světla, tzv. fotonů.



## SNELLOVY ZÁKONY

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou opticky různých prostředí, částečně se láme a částečně se odráží.

1. Zákon odrazu: úhel odrazu se rovná úhlu dopadu  $\alpha_1 = \alpha_2$



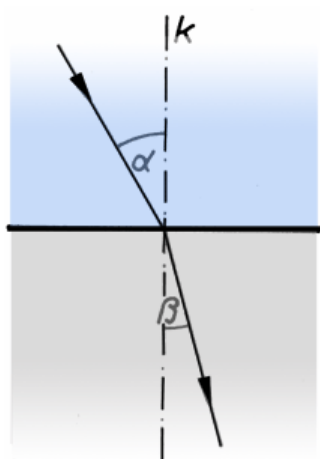
Totální odraz – pokud bude platit  $n_1 > n_2$ , může nastat okamžik, kdy  $\beta=0$ . Procházející vlna se bude šířit podél rozhraní. Úhel  $\alpha$ , odpovídající tomuto stavu se nazývá

$$\text{mezní úhel: } \cos \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

2. Zákon lomu:  $\frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

$n_1, n_2$  – index lomu prostředí

$v_1, v_2$  – rychlosti vlnění



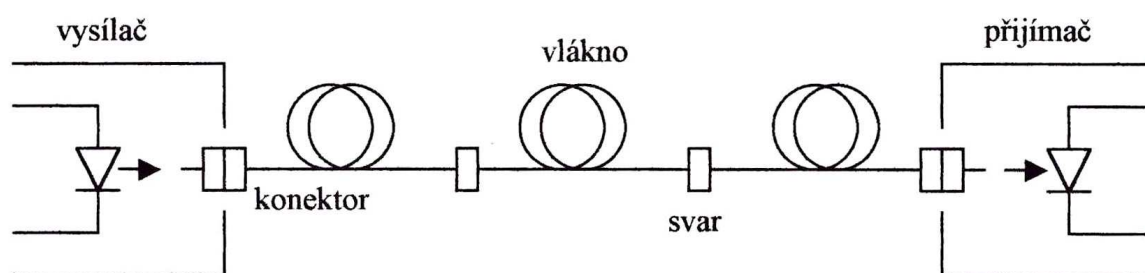
Ze Snellova zákona lomu plyne, že pokud světlo dopadá z opticky hustšího prostředí do řidšího ( $n_1 > n_2$ ), láme se od kolmice, v opačném případě ke kolmici.

Přechází-li světlo z jednoho prostředí do jiného, mění se jeho vlnová délka. Proto můžeme díky lomu na rozhraních bílé světlo rozkládat na jeho barevné složky, např. pomocí hranolu.

## OPTICKÁ KOMUNIKAČNÍ SOUSTAVA

Přenášenou informaci v digitální podobě můžeme reprezentovat pomocí světelných impulsů - přítomnost impulsu může zjednodušeně představovat např. logickou 1, zatímco jeho nepřítomnost logickou 0. Pro praktickou realizaci potřebujeme ucelenou optickou komunikační soustavu, která je tvořena především:

- optoelektronickým vysílačem (LED, infra-LED, laser)
- optoelektronickým přijímačem (fotorezistor, fotodioda, fototranzistor)
- optický kabel obsahující optická vlákna
- optočleny (galvanické oddělení elektrických obvodů)
- optické konektory
- optovláknové zesilovače, vlnové multiplexery WDM, atd.



### Výhody optické komunikační soustavy:

- galvanické oddělení obvodů
- velká přenosová rychlost (zvýšená použitím WDM technologie)
- světelný signál není ovlivňován elektromagnetickým rušením a atmosférickými bouřemi
- optické signály nevyzařují z kabelů, nedochází tedy k indukci na sousední linky a informace nemůže být odposlouchávána
- optické systémy vylučují nebezpečí ve výbušných a hořlavých prostředích (je vyloučeno jiskření a zkraty)

### Nevýhody optické komunikační soustavy:

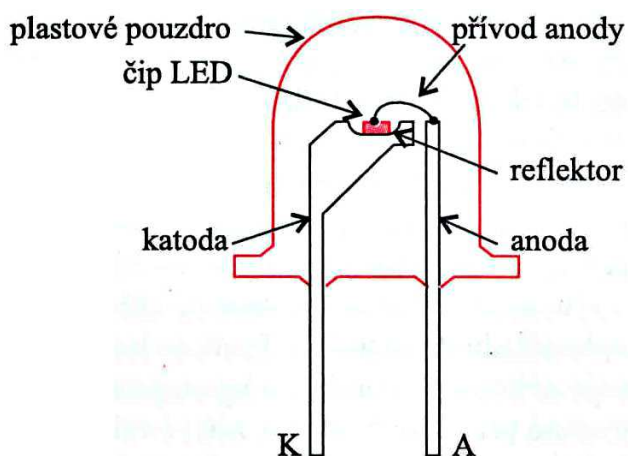
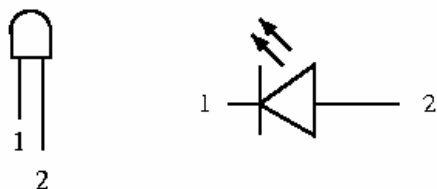
- útlum a zkreslení přenášené informace (pokles amplitudy a deformace tvaru optických impulsů)
- náročné spojování optických vláken
- cena optických kabelů
- konstrukční pevnost optických vláken

## **OPTOELEKTRONICKÉ VYSÍLAČE**

Jejich úkolem je transformovat elektrický signál (elektrickou energii) představující přenášenou informaci do podoby světelných impulsů. Využívají fyzikální jev zvaný *luminiscence*. Luminiscence vzniká vybuzením atomu působením jiného záření, elektronů apod., a následným návratem atomu do základního stavu, čímž dojde k vyzáření fotonu. Je-li vybuzení dosaženo elektricky (působením elektronů), mluvíme o *elektroluminiscenci*.

## LED dioda

Světlo-vyzařující dioda (LED, elektroluminiscenční dioda) je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Prochází-li přechodem P-N elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) světlo o určité vlnové délce (ve viditelné části spektra určuje barvu světelného záření).



Vlnová délka světelného záření diody je závislá na chemickém složení použitého polovodiče. LED jsou vyráběny pro vlnové délky blízké UV záření, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené záření (InfraLED).

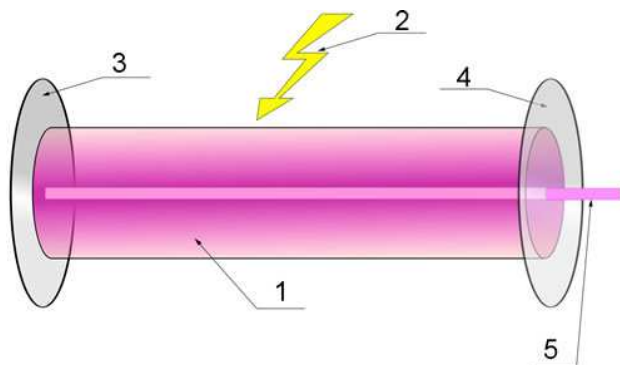
Se zmenšující se vlnovou délkou emitovaného světla roste napětí (prahové napětí), při kterém začíná diodou procházet proud v propustném směru. Prahové napětí LED se pohybuje v hodnotách od 1,6V až skoro 3V. Oproti jiným elektrickým zdrojům světla (žárovka, výbojka, doutnavka) mají LED tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. Mezi další výhody řadíme především velkou životnost nebo malou provozní teplotu. Nevýhodou je malá svítivost.

**Tabulka 1: Materiály pro LED-diody**

materiál a dotace	barva světla	vlnová délka v nm	napětí $U_F$
GaAs/Si	infračervená	930	1,2 V
GaAs/P	červená	655	1,6 V
GaAsP/N	oranžová	625	1,6 V
GaAsP/N	žlutá	590	1,8 V
GaP/N	zelená	555	1,8 V
GaN	modrá	465	3 V

## LASER

Laser (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tj. zesilování světla pomocí stimulované emise záření) je optický zdroj elektromagnetického záření tj. světla v širším smyslu. Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku; na rozdíl od světla přirozených zdrojů je koherentní, což zjednodušeně řečeno znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují jedním směrem a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrně, nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny. Laserový paprsek světelného záření je monochromatický, tedy jednobarevný (jedna vlnová délka).



### Konstrukce Laseru:

1. Aktivní prostředí
2. Zdroj záření
3. Odrazné zrcadlo
4. Polopropustné zrcadlo
5. Laserový paprsek

Princip fungování laseru není složitý. Jde o to vybudit v atomech aktivního prostředí pomocí externě dodané energie elektrony na dráhy s vyšší energetickou hladinou. Elektrony tam však vydrží pouze omezenou dobu (nestabilní stav) a při následném návratu na nižší energetickou hladinu vyzáří přebytečnou energii ve formě fotonů. Ty mohou za určitých podmínek podpořit působení externí energie, což postupně v aktivním prostředí zvyšuje počet fotonů. Abychom získali souvislý světelný paprsek, musíme ještě prostředí vhodně vytvarovat. Díky umístění aktivní části laseru do tzv. rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu svazku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. Tento proces dále podporuje stimulovanou emisi (uvolňování) fotonů, a tím dochází k zesilování toku fotonů. Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo.

Podle aktivního prostředí rozlišujeme tři základní typy laserů - plynové, pevnolátkové a polovodičové, známější jako laserové diody.

U plynových laserů vzniká paprsek v plynném prostředí, kterým je nejčastěji argon, helium nebo neon. Světelná emise vzniká po přivedení dostatečně vysokého napětí na elektrody, umístěné uvnitř trubice s plynem. Plynové lasery pro průmyslové využití mohou dosahovat i velmi vysokých výkonů, jejich nevýhodou je nutnost složitějšího chlazení i relativní nákladnost.

Druhou skupinu laserů tvoří pevnolátkové lasery. Zde je aktivním prostředím pečlivě vypěstovaný homogenní krystal s příměsí cizorodé látky (např. rubínové lasery). Světelná emise vzniká vystavením krystalu silnému stálému externímu světelnému výboji.

Poslední a nejnovější skupinou laserů jsou polovodičové lasery, obecně známé jako laserové diody. Zde světelná emise vzniká v tenké přechodové vrstvě na hranici mezi polovodiči typu P a N. Atomy v přechodové vrstvě jsou schopny absorbovat energii z elektrického proudu procházejícího diodou a přecházet tak do vyšších energetických hladin. Při sestupu na své původní hladiny nadbytečnou energii vyzáří, obecně v podobě tepla a světla. Použitelnost a kvalita laserové diody závisí na správném výběru materiálů obou polovodičů a na udržení přesné tloušťky přechodové vrstvy. Ta musí být totiž velmi tenká, abychom dosáhli monochromatickosti záření.

U laserů rozeznáváme tyto základní parametry:

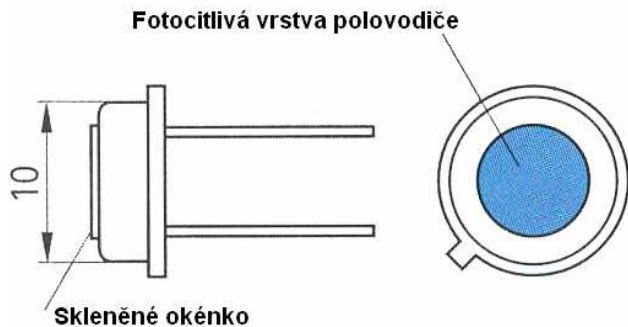
1. vlnová délka [nm] - určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru.
2. výkon laseru [W]

## OPTOELEKTRONICKÉ PŘIJÍMAČE (DETEKTORY)

Detektory optického záření lze rozdělit na:

- **fotovodivostní**, kde dopadající záření zvyšuje měrnou vodivost polovodiče
- **fotovoltaické**, kde dopadající záření generuje napětí na elektrodách

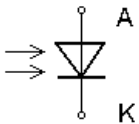
### Fotorezistor



Mění svůj odpor v závislosti na osvětlení. Pracují na principu vnitřního fotoefektu, kdy světelné záření uvolní v polovodiči nosiče náboje (elektrony a díry). Po skončení osvětlení dojde k rekombinaci elektronů s dírami. S rostoucím osvětlením roste elektrická vodivost, tedy klesá odpor.

### Fotodioda

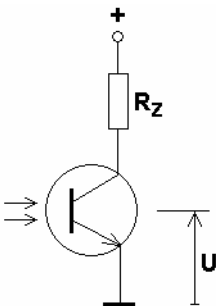
Fotodioda je nejpoužívanější fotodetektor pro měřicí a komunikační účely, což je způsobeno především výbornou linearitou, nízkým šumem a větší citlivostí k delším vlnovým délkám (infra). Využívá fotoelektrický jev k přeměně světelné energie na elektrickou energii. Základem je polovodičový přechod, na který dopadá světlo. V obou polovodičích se dopadem fotonů uvolní dvojice elektron – díra a proudí přechodem, přičemž náboje se na obou stranách hromadí – vzniká rozdíl potenciálů, tzv. fotoelektrické napětí.



Fotodioda je provozována v závěrném směru. Bez osvětlení protéká nepatrný proud, který lineárně narůstá s narůstajícím osvětlením.

### Fototranzistor

Vnitřní struktura je podobná klasickému tranzistoru, neexistuje však napětí báze přivedené z vnějšku. O činnosti rozhoduje intenzita světla, směřující do oblasti báze. osvětlením se uvolňují dvojice nosičů náboje, které se na bázi hromadí. Důsledkem je proud tekoucí přechodem B-E.



Fototranzistor v zapojení SE. Při osvětlení se tranzistor otevírá až do saturace, zátěží  $R_z$  teče kolektorový proud, čímž na kolektoru klesá napětí. Za tmy proud neteče, na kolektoru je plné napětí zdroje.

- Vlastnosti:
- mnohem citlivější než fotodioda
  - větší teplotní závislost
  - malý kmitočtový rozsah

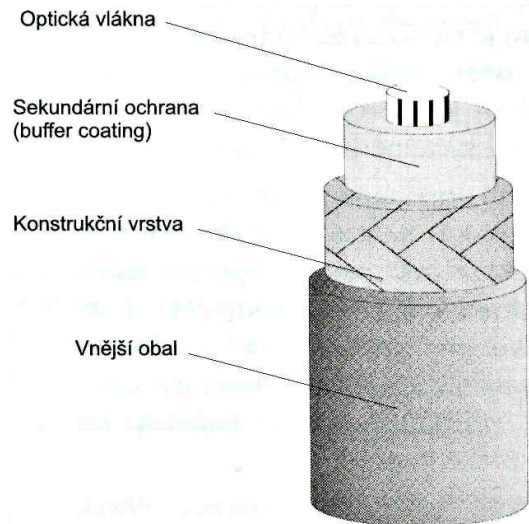
Dalšími detektory světelného záření mohou být např. fototryistor či solární články.



## OPTICKÝ KABEL (fiber optic cable)

Data nejsou přenášena elektricky (pomocí kovových vodičů, kterými protéká vysokofrekvenční el. proud), ale světelnými impulsy ve velmi tenkých optických vláknech (optical fiber). Optická vlákna zde představují přenosové médium, spojující vysílací a přijímací část komunikační soustavy.

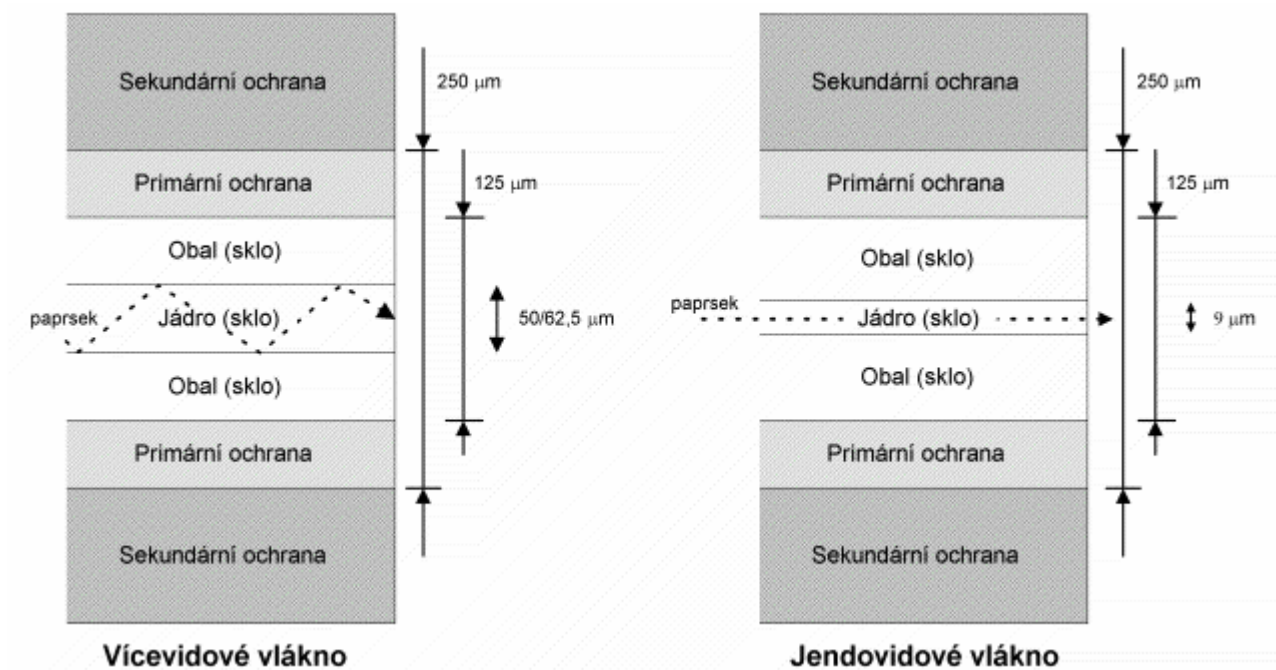
Počet optických vláken uvnitř optického kabelu představuje jeden ze základních katalogových parametrů.



Řez optickým kabelem

Úkolem přenosového média je dopravit světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co možná nejmenšími ztrátami. K tomuto účelu se používá **optické vlákno (optical fiber)**, s tenkým **jádrem (core)** obaleným vhodným **pláštěm (cladding)**. Jádru má průměr v řádu jednotek až desítek mikrometrů (8-10, 50, 62,5 nebo 100), a je vyrobené nejčastěji z různých druhů skla, eventuelně i z plastu.

Optická vlákna jsou velmi citlivá na mechanické namáhání a ohyby. Jejich ochranu proto musí zabezpečovat svým konstrukčním řešením optický kabel, který kromě jednoho či více optických vláken obvykle obsahuje i vhodnou výplň, zajišťující potřebnou mechanickou odolnost.

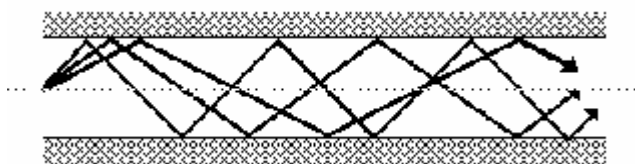


Na obrázku je znázorněna ochrana optických vláken. Optická vlákna jsou nejprve obalena tzv. primární ochranou, která zajišťuje pružnost vlákna. Bez primární ochrany je vlákno velice křehké. Sekundární ochrana, pak zvyšuje ochranu vlákna. S odstraněnou sekundární ochranou se běžně setkáváme u optických propojovacích kabelů.

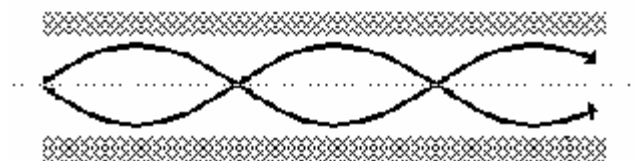
S optickými kabely, které mají odstraněnu sekundární ochranu se v běžných podmínkách obtížně pracuje, proto jsou populární optická vlákna s tzv. těsnou sekundární ochranou (průměr 900mm = 0,9mm), která integruje primární i sekundární ochranu. Takové kabely jsou o něco dražší (proto se nehodí na propojování velkých vzdáleností), ale na druhou stranu je možné na tyto kabely přímo nasadit optické konektory.

### Mnohovidová vlákna

Způsob, jakým optické vlákno paprsek vede, záleží také na tom, jak se mění optické vlastnosti (konkrétně tzv. **index lomu - refraction index**) na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm. Mění-li se skokem a je-li průměr jádra dostatečně velký (50-100 mikrometrů), jde o vlákno, schopné vést různé vlny světelných paprsků - tzv. **vidy (modes)**. Jde tedy o **mnohovidové vlákno (multimode fiber)**, v tomto případě se stupňovitým indexem lomu (step index fiber).



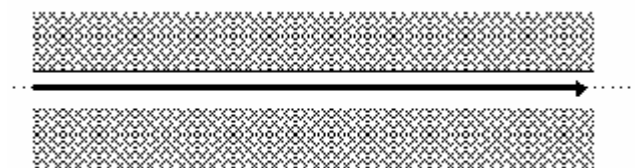
Pokud se index lomu na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm nemění skokem, ale plynule, jde o mnohovidové vlákno s tzv. **gradientním indexem lomu (graded index fiber)**, které přenášené vidy ohýbá.



Výhodou mnohovidových vláken je relativně nízká cena, snazší spojování a možnost buzení elektroluminiscenční diodou.

### Jednovidová vlákna

Nejvyšších přenosových rychlostí lze dosáhnout na tzv. **jednovidových vláknech (single mode fiber)**, které přenáší jen jediný vid (jeden světelný paprsek).



Schopnosti vést jediný vid bez odrazů i ohybů se dosahuje buďto velmi malým průměrem jádra (řádově jednotky mikrometrů), nebo velmi malým poměrným rozdílem indexů lomu jádra a jeho pláště. V každém případě jsou jednovidová vlákna dražší než mnohovidová, lze je použít pro přenosy na delší vzdálenosti (až 100 km bez opakovače). Pro své buzení však již vyžadují polovodičový laser (laserové diody).

## Klíčové přenosové parametry optických vláken

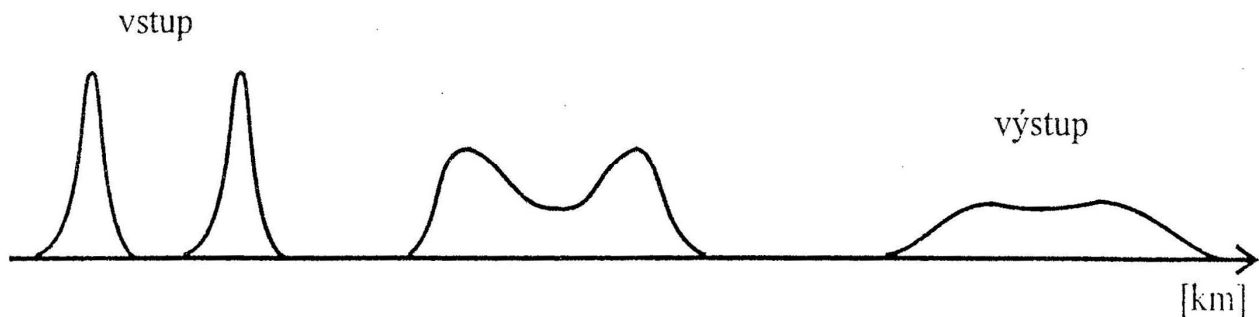
### Měrný útlum vlákna

S přibývajícím vzdáleností od zdroje postupně klesá výkon přenášeného signálu (podobně jako u metalických vedení). Vyjadřuje se v dB/km. Je způsoben následujícími vlivy:

- Absorbce** (pohlcení) světla materiálem optického vlákna.
- Rozptyl** - materiál jádra a pláště není ideálně homogenní. V důsledku lomů a odrazů se "tříští" paprsky do všech směrů a tato část energie se ztrácí.
- Ztráty ohybem** - řádově jednotky až desítky [mm]. Jsou kritické pro jednovláknová vlákna, eliminují se vhodnou konstrukcí optického kabelu.

### Disperze optického vlákna

Tento parametr charakterizuje vlákno z hlediska maximální přenosové rychlosti. Je možné ho demonstrovat na průběhu světelného impulsu. Podél trasy se mění tvar tohoto impulsu tak, že se zmenšuje jeho amplituda a zvětšuje se jeho šířka. Tzn., že na konci trasy může být signál znehodnocen do takové míry, že nelze zrekonstruovat přenášenou informaci. Na konci se jednotlivé impulsy mohou prolínat, tzn., že není možné rozlišit přesně stav  $\log 1$  a  $\log 0$ .



*Vidová disperze* - každý paprsek dorazí díky rozdílnosti délek drah na konec vlákna v rozdílných časových okamžicích (mnohovidová vlákna)

*Chromatická disperze* - je způsobena rozdílnou rychlostí šíření dílčích složek zdroje světla (rozdílné vlnové délky). Na konci vlákna se jednotlivé složky spektra skládají s časovými rozdíly, tzn. s jiným časovým průběhem než na začátku vlákna.

### WDM technologie

V případě, kdy potřebujeme zvýšit přenosovou kapacitu optického vlákna, případně když potřebujeme sdílet přenos více nezávislých aplikací v jednom optickém vlákně, je možné využít principu vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplexing). V zásadě to znamená, že do optického vlákna je vyslán optický signál o několika různých vlnových délkách, přičemž každá z vlnových délek poskytuje šířku pásma dosud poskytovanou celým jedním optickým vláknem. Pomocí filtrů, které tyto vlnové délky umí sloučit a zase na konci linky rozdělit, tak můžeme přenášet podle typu multiplexeru až několik desítek jednotlivých optických kanálů.

Podle způsobu použití a množství přenášených vlnových délek znamená v zásadě tyto typy vlnových multiplexů:

### **Technologie WDM**

Původní vlnový multiplex, který používá pro přenos informací pouze dvě vlnové délky většinou v obousměrném provozu na jednom optickém vlákně. Pasivní vlnový multiplexer WDM (Wavelength Division Multiplexing) je jednoduché a levné pasivní zařízení, které je schopné spojit nebo rozdělit dvě vlnové délky do jediného vlákna.



### **Technologie WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing)**

Vlnový multiplexer umožňuje souběžně přenášet většinou čtyři vlnové délky v oblasti 850nm (mnohovidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300nm (mnohovidová nebo jednovidová optická vlákna). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typicky odstup 25nm.

### **Technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**

Používá se především pro páteřní optické spoje. Vlnový multiplexer je v současnosti schopen rozlišit desítky vlnových délek (např. 32, 64) přenášených paralelně v jednom optickém vlákně. Tím se zvýší přenosová kapacita jednoho vlákna až na jednotky TB/s. Tato technologie však vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje, optické zesilovače, citlivé optoelektronické detektory, atd.

### Výhody optických vláken

Kromě velké přenosové rychlosti je další velkou výhodou optických vláken jejich naprostá necitlivost vůči elektromagnetickému rušení (což je velmi důležité např. v průmyslových aplikacích). Výhodou je také velká bezpečnost proti odposlechu, malý průměr a malá hmotnost optických kabelů.