

Optická vlákna - přehled

- ❑ Úvod
- ❑ Teorie vláknové optiky
- ❑ Výroba optických vláken
- ❑ Spojování



❑ Co jsou optická vlákna?

Optická vlákna jsou skleněná (plastová) vlákna o průměru kolem 120 μm , která se používají pro přenos signálů ve formě světelných pulsů na vzdálenost až do 50 km (bez použití zesilovačů, převaděčů). Těmito signály může být např. kódovaná lidská řeč nebo počítačová data.



❑ Historie

Zájem o světlo jako nosiče informací se objevuje až v 60. letech s objevem laseru jako zdroje koherentního světla. Zpočátku byly přenosové vzdálenosti velmi krátké, avšak s příchodem technologií výroby velmi čistého skla v roce 1970 se stalo využití optických vláken pro komunikační účely reálným. Výzkum a vývoj polovodičových zdrojů a detektorů světla kolem roku 1980 znamená „boom“ pro celosvětové rozšíření optických komunikačních systémů.

□ Výhody

Přenosová kapacita

Optická vlákna mohou přenášet signály s mnohem menšími ztrátami než mají měděné kabely (koaxiál), při mnohem širším přenosovém pásmu. V praxi to znamená, že vlákna mohou přenášet více informačních kanálů s menším počtem zesilovačů.

Rozměry a hmotnost

Optická vlákna jsou při stejně velkém přenosovém pásmu mnohem lehčí a tenčí ve srovnání s měděnými kabely. Vyžadují tedy mnohem méně prostoru v podzemních kabelovodech s jednodušší manipulací.

Bezpečnost

Signály přenášené v optických vláknech je nesnadné „odposlouchávat“ – výhoda např. pro bankovní nebo zabezpečovací systémy. Jsou odolné proti elektromagnetickému rušení z rádiových signálů (elektricky neutrální fotony), atmosférických poruch, apod. Kabely s optickými vlákny je možné vést i v nebezpečných (hořlavých, výbušných) prostředích, např. v petrochemickém průmyslu, bez nebezpečí vzniku požáru.

Běžné náklady

Důležitou roli při volbě optických vláken při instalaci kabelové televize hraje účet za elektrickou energii. Přestože měděné kabely je možné pro tyto účely bez problémů použít (krátké vzdálenosti, šířka pásma), vyžadují daleko větší elektrický příkon ve srovnání s vlákny.

□ Nevýhody

Pořizovací náklady

Přestože surovina pro výrobu optických vláken – písek – se vyskytuje v nadbytečné míře a za minimální ceny, jsou optická vlákna stále dražší než měděné kabely. Je však třeba poznamenat, že jedno optické vlákno může přenášet mnohem více signálů než jeden měděný kabel a při velkých vzdálenostech je třeba méně finančně náročných zesilovačů.

Speciální kvalifikace

Optická vlákna nelze spojovat tak jednoduše, jak je tomu u měděných kabelů. Je k tomu třeba speciálně vyškolený personál, se speciálními spojovacími a měřicími přístroji.

□ Oblasti využití

Telekomunikace

Optická vlákna se dnes běžně používají k propojení telefonních ústředen.

Počítačové sítě (LAN)

Vícemodová vlákna se běžně používají jako „páteř“ pro přenos signálů mezi huby (rozbočovači) lokálních sítí. Odtud se pak signál přivádí k počítači měděnými kabely.

Kabelová televize

Optická vlákna mají malou spotřebu elektrické energie.

Uzavřené televizní okruhy

Optická vlákna zajišťují „bezpečný“ signál.

Optické vláknové senzory

Měření řady fyzikálních veličin. Koncentrace plynů, chemické koncentrace, tlak, teplota, otáčky, apod.

Teorie optických vláken

- ❑ Totální odraz
- ❑ Optická vlákna
- ❑ Typy optických vláken
- ❑ Přenos pulsů
- ❑ Útlum
- ❑ Numerická apertura



Lom a odraz světla

Pokud světlo procházející transparentním prostředím dopadne na rozhraní s jiným transparentním materiálem, mohou nastat dva jevy:

- 1. Část světla se odrazí**
- 2. Část světla projde do sousedního prostředí**

Propouštěné světlo obvykle mění směr šíření při průchodu rozhraním. Tento jev nazýváme lom světla. Dochází k němu proto, že světlo se šíří různými rychlostmi v materiálech s odlišnými vlastnostmi. Každý materiál je charakterizován vlastním indexem lomu (*refractive index*), který určuje jakým způsobem se světlo láme. Index lomu je definován jako

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

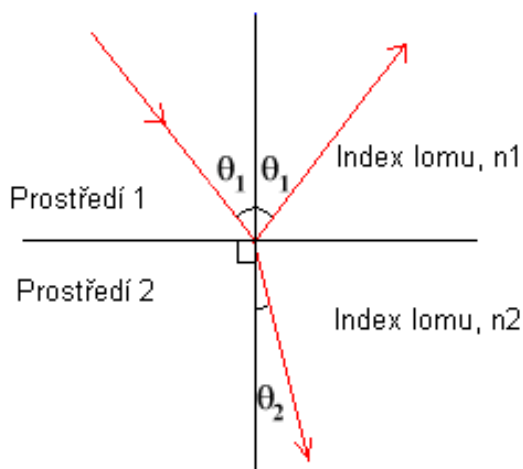
n - index lomu

c - rychlost světla ve vakuu

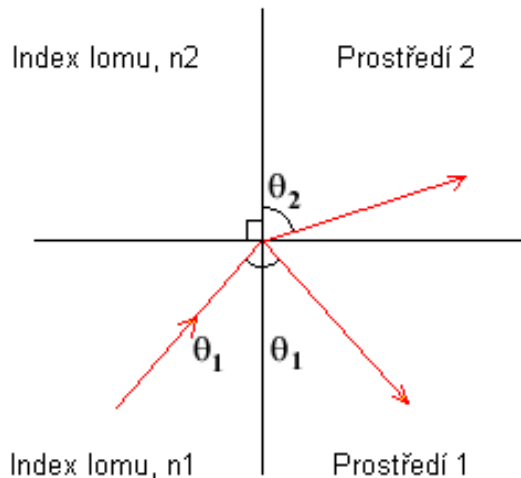
v – rychlost světla v daném materiálu

Mohou nastat dva různé případy:

- 1. Světlo přichází z prostředí s menším indexem lomu**
- 2. Světlo přichází z prostředí s větším indexem lomu**



$$n_1 < n_2$$



$$n_1 > n_2$$

Totální odraz

Pro druhý případ z obrázků nahoře platí, že θ_2 je vždy větší než θ_1 . Budeme-li tedy zvyšovat θ_1 , θ_2 nabude hodnoty 90° při kritickém úhlu $\theta_1 = \theta_c$ (mezní úhel, úhel totálního odrazu). Při úhlu $\theta_1 \geq \theta_c$ dochází k totálnímu odrazu (*Total Internal Reflection*) – žádné světlo se neláme, všechno se odrazí. Můžeme tedy definovat dvě nezbytné podmínky pro vznik totálního odrazu:

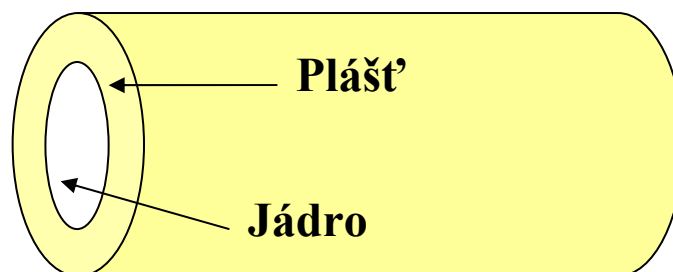
1. Index lomu prvního prostředí musí být větší než index lomu druhého.
2. Úhel dopadu θ_1 musí být větší nebo roven kritickému úhlu θ_c

Při totálním odrazu se odráží 100% dopadajícího světla (100% odraz nelze zajistit žádným jiným způsobem). Totální odraz se využívá při přenosu signálu v optických vláknech.

Optická vlákna

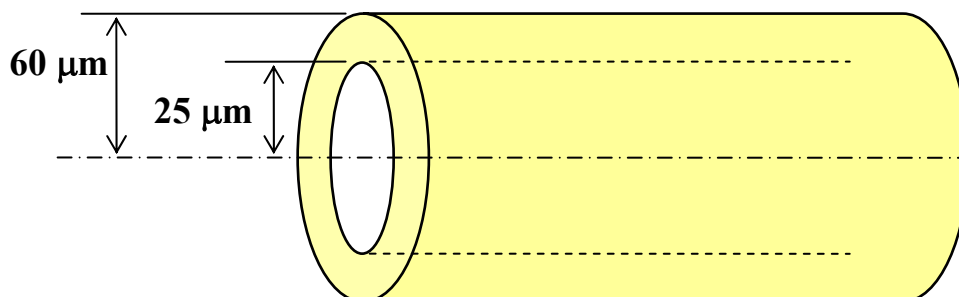
Struktura optických vláken

Optická vlákna jsou velmi jemná skleněná vlákna. Obsahují skleněné jádro o průměru přibližně $50\text{ }\mu\text{m}$, obklopené pláštěm s vnějším průměrem asi $120\text{ }\mu\text{m}$. Uspořádání vláken zajišťuje soustředění světla uvnitř jádra (totální odraz).



Struktura optického vlákna

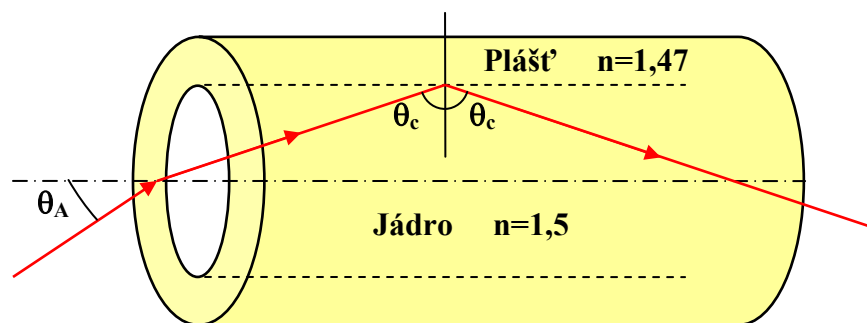
Jádro má větší index lomu než plášť. Přestože plášť světlo nevede, je nedílnou součástí optického vlákna. Není to pouhý kryt. Plášť zajišťuje konstantní hodnotu kritického úhlu po celé délce vlákna.



Optická vlákna jsou optickými vlnovody. To znamená, že kam jde vlákno – tam jde světlo. Optické vlákno nám tedy umožňuje ohnout světlo za roh.

Šíření světla ve vláknech

Úhel θ_A na následujícím obrázku se nazývá vstupní úhel (numerická apertura, viz dále). Všechny paprsky vstupující do vlákna pod úhlem menším než je vstupní úhel budou dopadat na plášť pod úhlem větším než θ_c . Pokud bude paprsek dopadat na vnitřní povrch pláště (rozhraní jádro – plášť) pod úhlem větším nebo rovném θ_c , dojde k totálnímu odrazu. Veškerá energie paprsku se tedy odrazí zpět do jádra, žádná nevstoupí do pláště. Paprsek pak dopadá na opačnou stěnu jádra, a protože jádro je více méně rovné, dopadne na plášť na opačné straně pod úhlem, který rovněž zajistí totální odraz. To se neustále opakuje, takže paprsek absolvuje klikatou dráhu podél vlákna, až se dostane na jeho konec.



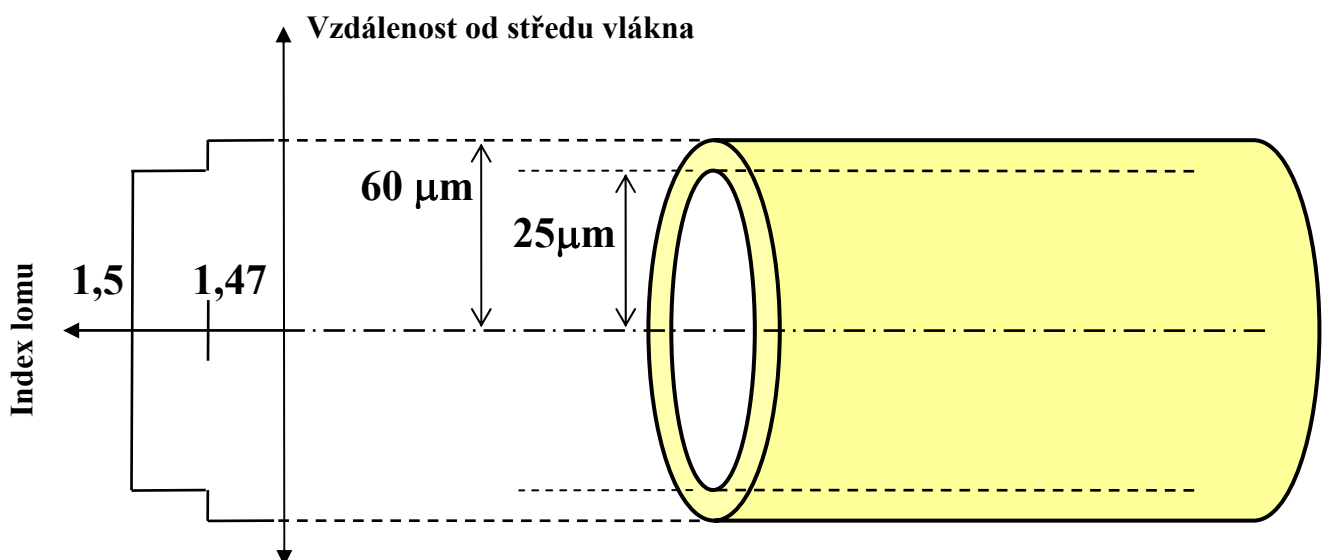
Ve skutečnosti světlo, které vstupuje do vlákna je fokusovaný svazek mnoha paprsků, které se chovají podobně. Všechny prostupují klikatě jádrem, vzájemně se kříží a vyplňují celé jádro. Světelný puls postupující jádrem je jakýsi „balík“ těchto paprsků.

Typy optických vláken

Dva hlavní typy vláken:

- 1) Step index (SI) – (vícemodová, jednomodová)
- 2) Graded index (GI) – (vícemodová)

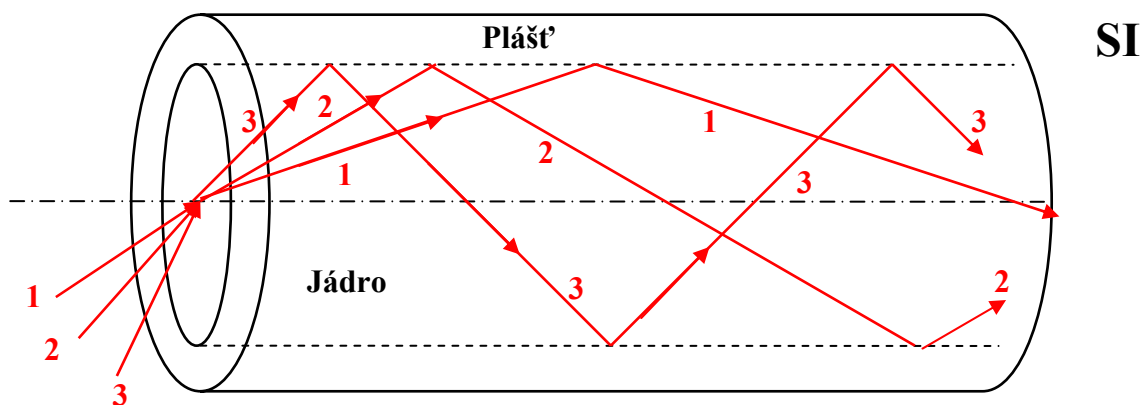
Vlákna – Step Index (*stupňovitý index lomu*)



Step index – schodovitý průběh index lomu podél průřezu jádra. Index lomu je konstantní uvnitř jádra i pláště.

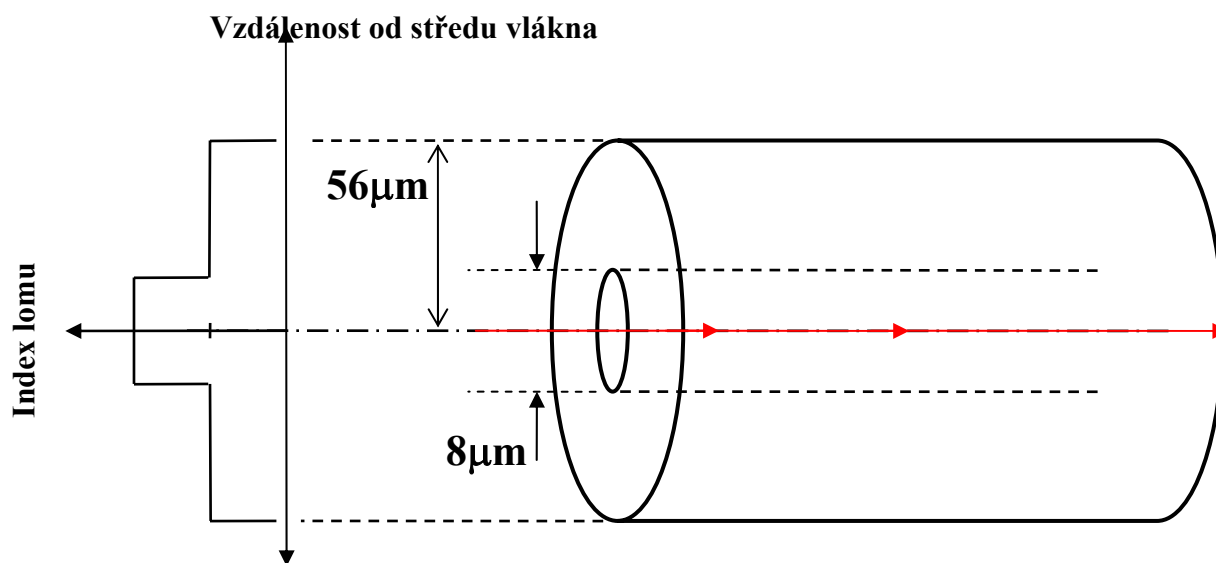
Vícemodová vlákna

Z výše uvedeného vyplývá, že vláknem mohou procházet libovolné paprsky světla. Ve skutečnosti však, díky povaze světla, mohou procházet pouze určité typy paprsků, tzv. módy (vidy). Ve vícemodovém vlákně se může šířit několik modů.



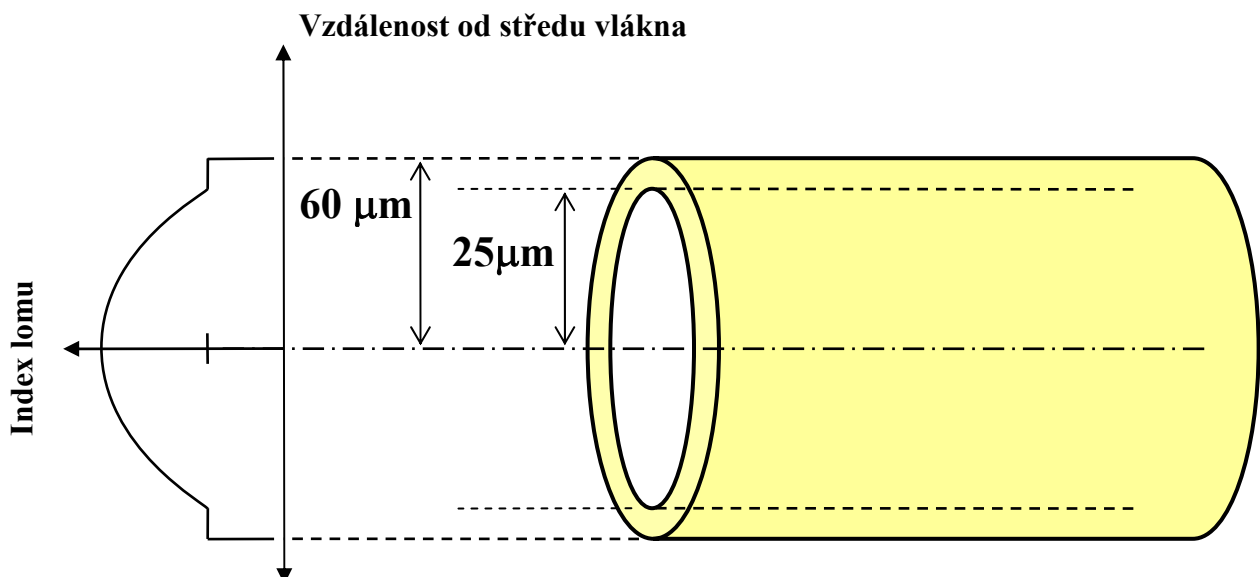
Jednomodová vlákna

V důsledku příliš úzkého jádra, může být přenášen pouze jeden mód, tzv. mód nejnižšího řádu. Jednomodová vlákna mají jisté výhody proti vícemodovým, viz dále.



Vlákna Graded Index (gradientní)

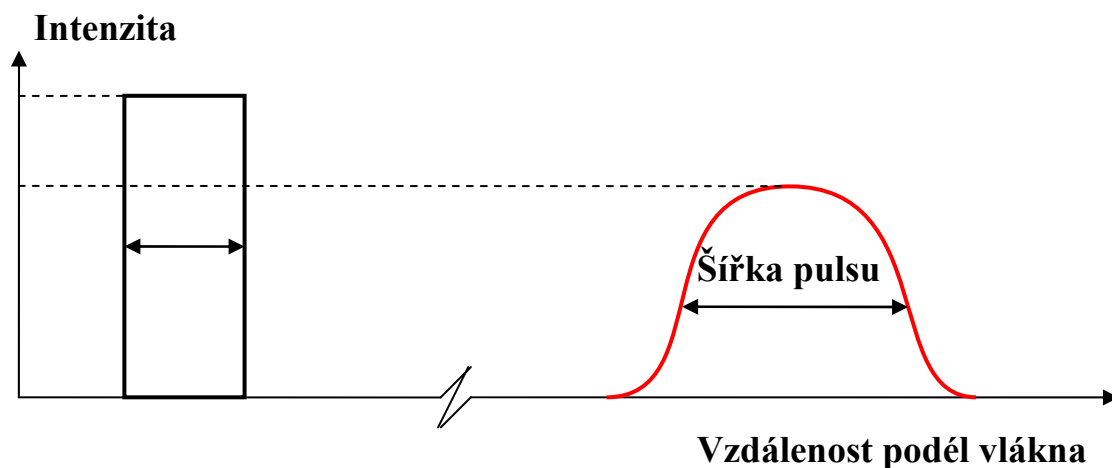
Vlákna Graded Index mají odlišnou strukturu jádra od jednomodových a vícemodových vláken. Zatímco v Step Index vláknech je index lomu v jádru konstantní, v Graded Index se mění podél průřezu jádra. V praxi se jedná například o parabolický průběh – hodnota indexu lomu závisí na druhé mocnině vzdálenosti od středu jádra.



Vlákna Graded Index jsou ve skutečnosti vícemodová, protože mohou přenášet několik modů. Pokud však budeme hovořit o „vícemodovém“ vlákně, budeme rozumět vícemodové vlákno Step Index.

Přenos pulsů

Data přenášená optickým vláknem mají formu světelných pulsů, které po sobě rychle následují. Nejvyšší frekvence, tj. počet pulsů za sekundu prošlých vláknem, je omezená. Omezení je dáno zkreslením tvaru přenášených pulsů, které omezuje přenosovou šířku vlákna.



Šíření pulsu optickým vláknem

Pravoúhlý puls vstupující do vlákna se na dráze ve vlákně postupně rozšiřuje a snižuje se jeho maximální intenzita.

Příčiny zkreslení pulsů

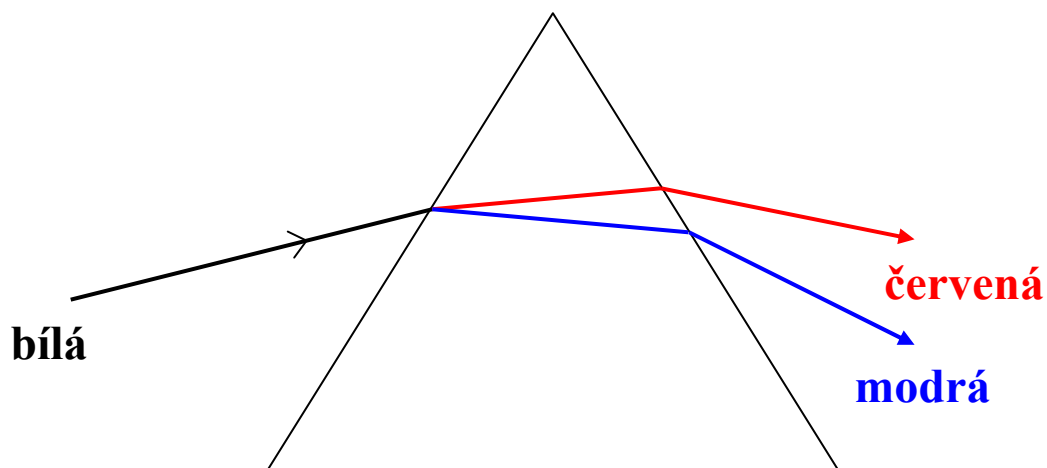
Příčinou zkreslení pulsů je disperze. Zjednodušeně to znamená, že různé části pulsu cestují vláknem různými rychlostmi.

1. Chromatická disperze
2. Modální (vidová) disperze

Chromatická disperze

Chromatická disperze je závislost indexu lomu na vlnové délce (frekvenci) světla. Jinými slovy: každá vlnová délka má v témže materiálu svou vlastní rychlost šíření, která je odlišná od ostatních vlnových délek.

Příklad: Pokud prochází bílé světlo hranolem, některé vlnové délky světla se lámou více, protože jejich index lomu je větší (rychlost je menší) – vzniká spektrum.
„Červené“ a „oranžové“ světlo jsou nejrychlejší (index lomu je nejmenší) – lámou se nejméně.
„Fialové“ a „modré“ světlo jsou nejpomalejší (index lomu je větší) – lámou se nejvíce.



Disperze světla při průchodu hranolem

Modální (vidová) disperze

Každé optické vlákno vykazuje tzv. Modální disperzi.

Paprsky nižších modů (méně kosé) cestují vláknem na kratších vzdálenostech a dosáhnou konce vlákna dříve. Jedná se o paprsky, které jsou téměř rovnoběžné s osou vlákna.

Paprsky vyšších vidů jsou „klikatější“, jejich dráha vláknem je delší a na konec se dostanou tedy později.

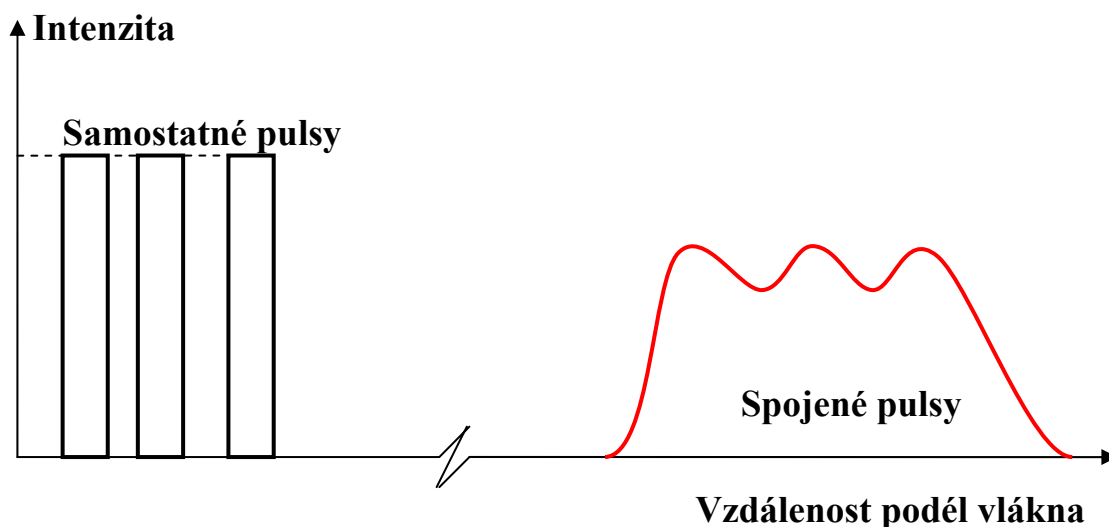
Celková disperze = chromatická disperze + modální disperze

Shrnutí: Z různých příčin se některé části světelného pulsu ve vlákně šíří rychleji a jiné pomaleji. Počáteční úzký puls se během pohybu vláknem rozšíří, protože některé jeho komponenty předbíhají, jiné se zpožďují.

DŮSLEDKY ZKRESLOVÁNÍ PULSŮ

Frekvenční limit (šířka pásma)

Čím dále puls vláknem cestuje, tím větší zkreslení můžeme očekávat.



Zkreslování pulsů omezuje maximální kmitočet signálu přenášeného optickým vláknem. Pokud jednotlivé pulsy signálu následují po sobě příliš rychle, po průchodu vláknem dojde k jejich „slití“, takže je nemožné je na výstupu rozlišit. Toto není přijatelné pro digitální systémy, které vyžadují přesné rozlišení pulsů pro kódování informace. Šířkou pásma (*bandwidth*) rozumíme nejvyšší počet pulsů za sekundu, které je možné vláknem přenášet bez ztráty informace v důsledku zkreslení.

Délkový limit

Optické vlákno dané délky je charakterizováno maximální frekvencí (šířkou pásma), kterou lze přenášet. Pokud požadujeme zvětšit šířku pásma pro daný typ vlákna, je možné zkrátit délku vlákna. Jinými slovy: pro danou rychlost přenosu dat existuje maximální délka vlákna, zajišťující ještě bezchybný přenos.

BDP – šířka pásma × vzdálenost

Dvě předchozí vlastnosti můžeme kombinovat do jedné – BDP (*BandwithDistance Produkt*) – součin šířky pásma a vzdálenosti. Většinou se vztahuje na kilometr délky a jedná se o parametr konkrétního typu vlákna. Předpokládejme například, že vícemodové optické vlákno má BDP 20 MHz km. Potom:

1 km vlákna má šířku pásma 20 MHz

2 km vlákna mají šířku pásma 10 MHz

5 km vlákna má šířku pásma 4 MHz

20 km vlákna má šířku pásma 1 MHz

Typické hodnoty BDP:

Vícemodová vlákna: 6 – 25 MHz km

Jednomodová vlákna 500 – 1500 MHz km

Gradientní vlákna 100 – 1000 MHz km

Poznámka: rozlišovat MHz km a MHz/km

VOLBA TYPU OPTICKÉHO VLÁKNA

Vícemodová vlákna

Vícemodová vlákna jsou vhodná pro lokální počítačové sítě (LAN), protože mohou přenášet dostatečnou energii pro všechny účastníky sítě. V sítích LAN jsou vzdálenosti většinou malé, takže efekt zkreslení pulsů je zanedbatelný.

Jednomodová vlákna

Modální disperzi lze eliminovat použitím jednomodového vlákna. Jádru je tak úzké, že může přenášet pouze jeden mód. Disperzní rozšíření pulsů je menší ve srovnání s vícemodovými vlákny. Zůstává zde však chromatická disperze, která může způsobovat zkreslení pulsů. Lze ji však omezit správnou přípravou materiálu (skla) vlákna.

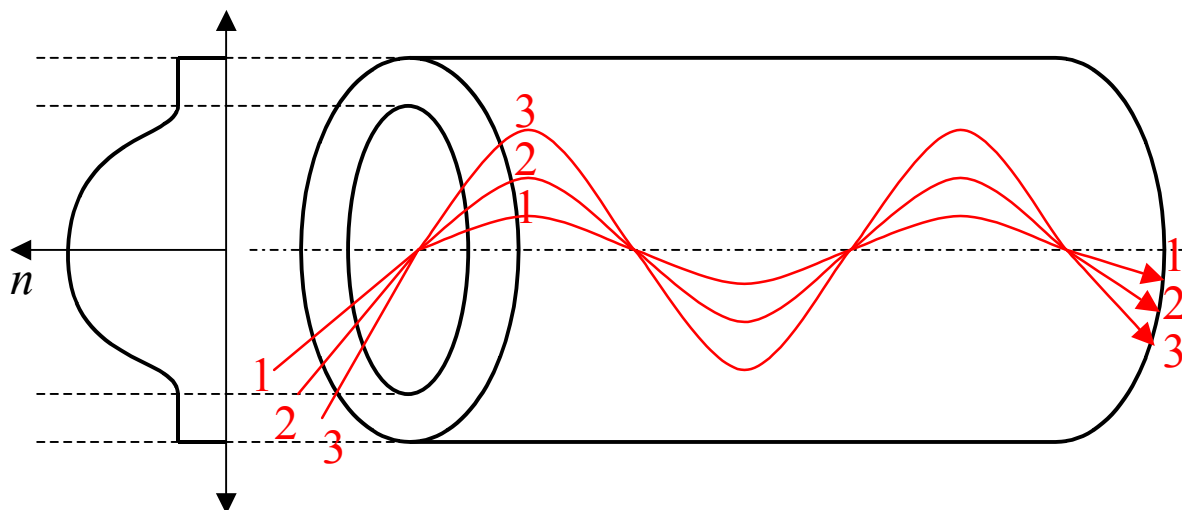
Energie přenášené jednomodovými vlákny jsou mnohem menší než u vícemodových vláken. Z toho důvodu se tato vlákna vyrábí z velmi čistého skla, s extrémně nízkými ztrátami.

Jednomodová vlákna s malou absorpcí jsou ideální pro telekomunikační účely díky malému zkreslení signálů.

Graded Index (GI) vlákna

V gradientních vláknech má dráha paprsku sinusoidální charakter. Paprsky nižších vidů se drží blíže středu jádra, zatímco vyšší vidy dosahují až k jeho okraji. Ve středu jádra je vyšší index lomu, paprsky jsou zpomalovány. U okraje jádra je nižší index lomu, paprsky jsou urychlovány. Tak je zajištěno, že všechny módy dorazí na konec vlákna ve stejnou dobu (přestože mají různě dlouhé dráhy). Eliminuje se tak modální disperze a tedy i zkreslení pulsů.

Výhodou gradientních vláken je, že mohou přenášet stejné energie jako SI vícemodová vlákna. Nevýhodou na druhé straně je, že princip GI funguje jen při jedné vlnové délce. Je tedy vyžadován monochromatický zdroj záření (laserové diody).



Šíření paprsků v GI (gradientním) optickém vlákně

Útlum (*attenuation*) se charakterizuje v dB/km.

$$\text{Útlum} = 10 \log \left(\frac{I_{\text{výst}}}{I_{\text{vst}}} \right)$$

kde I_{vst} = intenzita na vstupu (Wm^{-2})

$I_{\text{výst}}$ = intenzita na výstupu (Wm^{-2})

Útlum vláken se měří optickým reflektometrem (OTDR – *Optical Time-Domain Reflectometer*), který vysílá světelný puls podél vlákna a snímá odražený od jeho konce. Jiný způsob je použití zdroj kontinuálního světla a snímat výkon vycházející z druhého konce vlákna.



Optical Time Domain Reflectometer

Intenzita světla procházejícího optickým vláknem se snižuje.

K útlumu dochází ze 3 hlavních příčin:

- Absorpce fotonů atomy a ionty
- Rozptyl světla na příměsích a vadách materiálu
- Odraz světla na spojích a konektorech.

Absorpce záření

Atomy (ionty) jakéhokoli materiálu mají schopnost absorbovat světlo specifické vlnové délky (podle struktury energetických hladin).

Příklad: Pokud se podíváme na hranu okenní tabule, vidíme nazelenalou barvu. Červená a modrá byly ve skle absorbovány.

Podobně se světlo absorbuje i v optických vláknech.

Rozptyl záření

Někdy též nazývaný Rayleighův rozptyl. Rozptyl závisí na relativní velikosti rozptylujících částic a vlnové délce světla. Pokud je vlnová délka menší než velikost částic, rozptyl je větší než když je vlnová délka větší ve srovnání s rozměrem částic. V optických vláknech jsou tedy preferovány větší vlnové délky (1500 nm je lepší než 1300 nm).

Odraz na spojích a konektorech

Dlouhé optické kabely vyžadují spoje. V LAN sítích je mnoho konektorů. Na každém konektoru/spoji dochází k odrazu určité části světla. Odražené světlo bude postupovat v opačném směru a pro přenos informace je dále neúčinné.

K parazitnímu odrazu dochází i na „dokonalých“ spoích nebo konektorech.

Numerická apertura

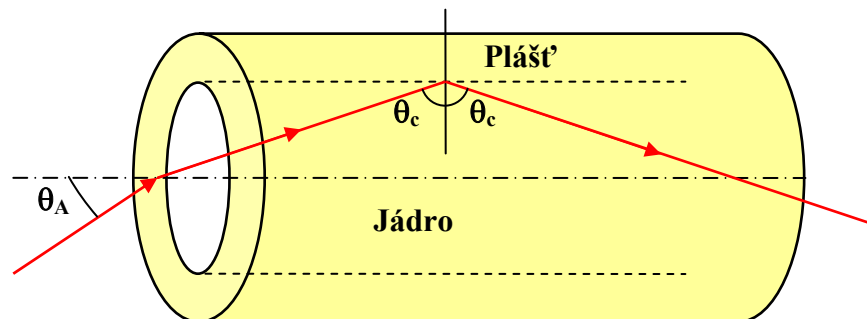
je jednou z důležitých vlastností optických vláken. Definuje se jako

$$NA = n_0 \sin \theta_A \div \sin \theta_A$$

Určuje úhel, pod kterým je ještě vlnovod schopen přijímat na vstupní straně energii zdroje (je možné navázat paprsky do vlákna maximálně pod úhlem θ_A). Typické hodnoty numerické apertury jsou 0,15 až 0,5.

$NA = 0$ do vlákna se nenaváže žádné světlo

$NA = 1$ do vlákna se naváže veškeré dopadající světlo
($\theta_A = 90^\circ$)



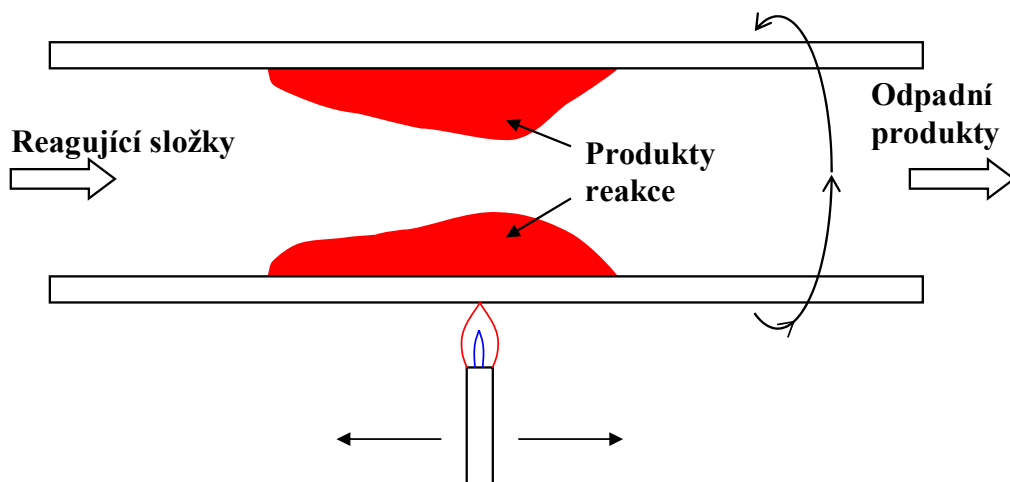
Výroba optických vláken

Při výrobě optických vláken můžeme rozlišit dvě základní etapy:

1. Výroba předlisku (*preform*)
2. Vytahování (*extrusion*) předlisku

Výroba předlisku

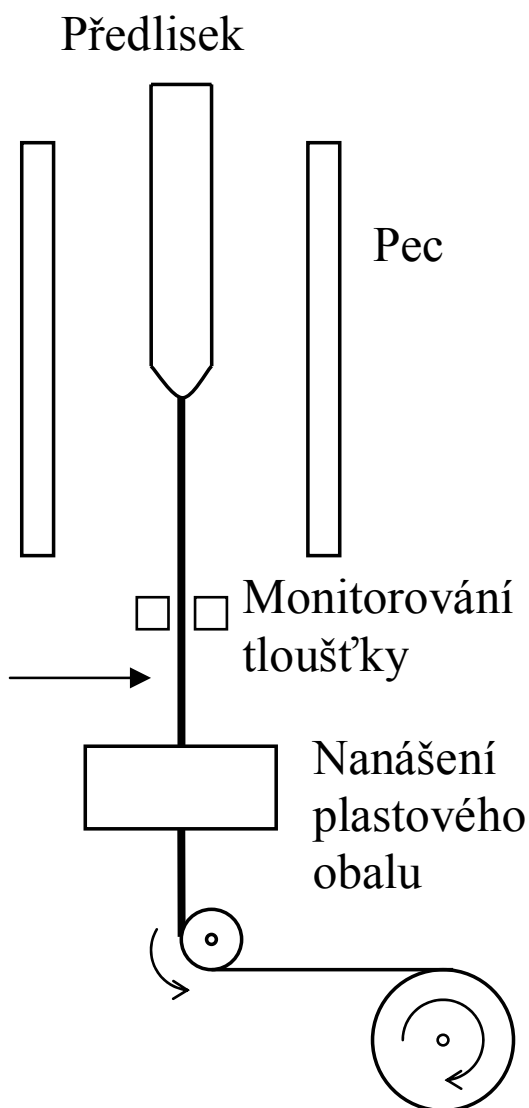
Nejvíce používaná metoda výroby vláknových předlisků se nazývá *Modified Chemical Vapour Dispersion (MCVD)*.



Princip MCVD

Skleněná „tažná“ trubice se zahřeje posuvným hořákem. Trubkou proudí definovaná směs plynů, ve které po zahřátí probíhají chemické reakce. Směs plynů obsahuje sloučeniny křemíku, kovových halogenidů, kyslíku a dopujících materiálů, které určují hodnotu indexu lomu skleněného jádra. Pevné produkty reakce se usazují na vnitřní straně skleněné tažné trubky. Tyto produkty budou základem pro tvorbu jádra vlákna, zatímco vnější skleněná trubka bude tvořit plášť. Pokud se vytvoří dostatečné množství pevných produktů chemické reakce, zastaví se vhánění plynu do trubky a vnějším ohřevem dojde k roztavení produktů, takže se vytvoří slinuté sklo. Pokud se trubka zahřeje tak, že dojde ke změknutí jak vnější trubky, tak i vnitřku, vytvoří se po zchlazení přesná struktura optického vlákna (jádro + plášť).

Protahování předlisku



Předlisek má po předchozích úpravách stejnou vnitřní strukturu jako budoucí optické vlákno. Předlisek se vertikálně protahuje pecí, která změkčí jeho materiál. Struktura vlákna zůstává stejná jako u předlisku, mění se pouze relativní rozměry. Vláknو prochází zařízením, které monitoruje a řídí jeho tloušťku.

V další fázi se nanáší ochranný (plastový) obal vlákna. Tato fáze je velmi důležitá – ochranný povlak se musí nanést dříve než se povrch vlákna znečistí kontaminacemi (došlo by ke změně indexu lomu).

Nakonec se vlákno navíjí na buben, který se používá pro přepravu a skladování.

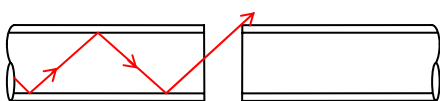
Spojování optických vláken

Optická vlákna se spojují za účelem zvětšení jejich délky, případně opravy přetržených vláken. Kromě toho je třeba konce vláken vybavit vhodnými konektory (konečkovkami), aby bylo možné je připojit k různým zařízením jako např. datové vysílače, přijímače, měřicí přístroje, apod. Na rozdíl od kovových kabelů, které je možné spojovat jednoduchým pájením, spojování optických vláken je daleko složitější a vyžaduje speciální přístroje.

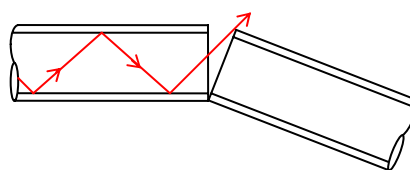
Styčné plochy spojovaných vláken musí být dokonale rovné, aby nedocházelo ke ztrátám na případných mezerách.

Můžeme rozlišit celkem 4 hlavní poruchy při spojování vláken, které je třeba eliminovat:

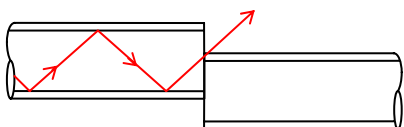
- podélné vychýlení
- mimosové vychýlení
- úhlové vychýlení
- nerovnost styčné plochy



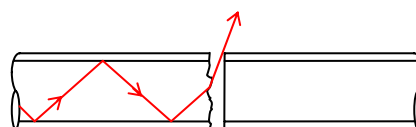
Podélné vychýlení



Úhlové vychýlení



Mimosové vychýlení



Nerovnost styčné plochy

Tavné spojování vláken

Konce vláken se vzájemně zarovnají buď manuálně (mikromanipulátory a mikroskopy) nebo automaticky (kamery, měření prošlého světla a nastavení polohy konců vláken pro zajištění optimálního přenosu. Konce vláken se svaří plamenem nebo elektrickým obloukem.

Spoje jsou téměř dokonalé - se ztrátami méně než 0,02 dB (nejlepší mechanický spoj dosahuje útlumu 0,2 dB).



Mechanické spojování vláken

Speciální spojky pro mechanické spoje. Spojka zajistí přesné zarovnání obou konců vláken. Uvnitř spojky je speciální lepidlo s indexem lomu stejným jako má jádro vlákna.

Jakmile jsou vlákna ve spojce zarovnána (zaklapování systém), spoj se vystaví u.v. záření, které vytvrdí lepidlo.

Mechanické spoje jsou nejvhodnější pro vícemodová vlákna. Útlum dosahuje řádově 0,1 dB – 5× více než u sváření.

