

Obsah:

Úvod	1
1. Prenos informácií pomocou svetla	1
1.1 Vo voľnom priestore	1
1.2 V uzavretom priestore	2
1.3 Výhody prenosu informácií pomocou svetla v uzavretom priestore (optovodov)	2
2. Základné prvky optokomunikačných prenosových systémov	6
2.1 Optické vlákna a optické káble	6
2.11 Typy optických vlákien	6
2.12 Prenos energie optickým vláknom	10
2.13 Časové oneskorenie signálu pri prenose optovodmi	15
2.14 Disperzia	17
2.141 Módová disperzia	19
2.142 Materiálová disperzia	21
2.143 Vlnovodová disperzia	22
2.15 Prenos energie gradientným optickým vláknom	24
3. Tlmenie optických vlákien	27
3.1 Presluch medzi súbežnými optickými vláknami	29
3.2 Paralelný prenos súbežnými optickými vláknami	30
4. Káble s optickými vláknami	31
5. Optoelektronická prenosové systémy	33
5.1 Linkový opakovač	38
5.2 Vzdialenosť medzi linkovými opakovačmi	38

Úvod

Klasická oznamovacia technika, ktorá v 30. rokoch celkom úspešne zvládla techniku Prenosu informácií na dlhých, stredných a krátkych vlnách, bola v ďalšom období vystavená veľkému a trvalému tlaku, charakterizovanému menovite prudkým nárastom požiadaviek na vývoj stále nových prenosových prostriedkov. V priebehu ďalších troch desaťročí sa do značnej miery vyčerpali možnosti techniky prenosu na metrových, decimetrových, centimetrových a milimetrových vlnách, menovite vzhľadom k potrebám smerových rádiových spojov, televízie a rádiolokácie. Tiež telekomunikačná technika, do tej doby pomerne stabilizovaná a bezproblémová, začala uplatňovať požiadavky na vyššiu rýchlosť prenosu, spoľahlivosť a prenosovú kapacitu vzhľadom k prenikaniu číslicovej techniky a potreby budúceho zavádzania združených telekomunikačných služieb v širokom merítku. V záujme vyriešenia tejto zložitej situácie sa začalo uvažovať o presune a rozšírení prenosových pásiem do optickej oblasti. V druhej polovici šesťdesiatych rokov začína búrlivý rozvoj nového vedného odboru interdisciplinárneho charakteru - optoelektronika. V súvislosti s tým začínajú sa objavovať v širšej miere snahy o prenos informácií pomocou svetla - optokomunikácie.

1. Prenos informácií pomocou svetla

1.1 Vo voľnom priestore

Tento spôsob prenosu informácií využíva na prenos viditeľnú oblasť svetla, je známy už z dávnych dôb (ohne, zrkadlá...) a používa sa až doteraz (semaforey, signalizácia v leteckej technike...). Už, prvých štádiách prenosu informácií týmto spôsobom bol využitý dômyselný spôsob kódovania.

Tento spôsob prenosu informácií nie je vhodný pre tele komunikačné účely (rýchly a spoľahlivý diaľkový prenos) z týchto dôvodov:

- a) malý dosah - obmedzený priamou viditeľnosťou
- b) malá kapacita - vzájomné rušenie
- c) nemožnosť utajenia
- d) malá spoľahlivosť

Napriek týmto nevýhodám sa tento spôsob prenosu využíva doteraz vzhľadom na to, že takýto systém je: jednoduchý relatívne lacný ľahko zriaditeľný pohotový.

1.2 V uzavretom priestore

Prvé pokusy o prenos informácií pomocou svetla sú známe už z minulého storočia, napr. Bellov fotofón (1889) - nenašiel širšie uplatnenie, pretože neboli vhodná zdroje žiarenia, vhodné detektory a prenosové médium malo príliš veľké tlmenie.

Vďaka pokroku v technologickej oblasti (prenosové média s malým tlmením, kvalitné zdroje - LED, lasery a citlivé detektory - LFD, pin) asi od r. 1976 nastupuje búrlivý rozvoj optoelektroniky. Je to vedná oblasť ako už bolo spomenuté predtým interdisciplinárneho charakteru, zahŕňa také odbory ako technológia (chémia), mikroelektronika (integrované obvody) teoretická elektrotechnika a VKV technika (vlnovody), fyzika (optika, kvantová fyzika), telekomunikačná technika.

1.3 Výhody prenosu informácií pomocou svetla v uzavretom priestore (optovodov)

a) Veľká prenosová kapacita

Svetlo je vo svojej podstate vysokofrekvenčné elektromagnetické pole. Je vlnového charakteru. Nositeľom energie sú fotóny (sú elektricky neutrálne oproti elektrónom, ktoré sú q^-). Energiu fotónu podľa Plancka môžeme vyjadriť.

$$W = e_{ph} = h \cdot f \text{ [eV]}$$

kde $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ [Js] – Je Planckova konštanta, f - je frekvencia

Vo vákuu (približne aj vo voľnom prostredí - vzduchu)

$$f = \frac{c}{l}$$

kde $c = 3 \cdot 10^8$ [ms⁻¹] je rýchlosť šírenia svetla vo voľnom prostredí

λ - je vlnová dĺžka $n = \frac{1}{l}$ [m⁻¹] je vlnopočet . Podľa Einsteina je kinetická energia fotónu

$$W = m_{ph} \cdot c^2$$

m_{ph} – je hmotnosť fotónu. Na základe hore uvedeného platí

$$m_{ph} \cdot c^2 = h \cdot f \Rightarrow l = l_0 = \frac{h}{m_{ph} \cdot c}$$

λ_0 nazývame de Broglieho vlnovou dĺžkou. Rýchlosť šírenia svetla môžeme všeobecne v prostredí vyjadriť pomocou materiálových konštánt ako

$$v = \frac{1}{\sqrt{e \cdot m}}$$

pričom platí $e = e_0 e_r$, $\epsilon_0 = 8,853 \cdot 10^{-12} [\text{Fm}^{-1}]$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Hm}^{-1}]$, $\epsilon > \epsilon_0$; $\mu > \mu_0$.

Fázovú rýchlosť šírenia svetla v hmotnom prostredí môžeme vyjadriť

$$v = \frac{1}{\sqrt{e_0 \cdot e_r \cdot m_0 \cdot m_r}} = \frac{c}{n}$$

kde $c = \frac{1}{\sqrt{e_0 \cdot m_0}}$ je rýchlosť svetla vo vákuu (alebo približne vo vzduchu), $n = \sqrt{e_r \cdot m_r}$ je

nazývaný index lomu, alebo optická hustota daného prostredia.

Optické spektrum sa rozprestiera v oblasti

$$\begin{array}{ccc} f = 3 \cdot 10^{12} \div 3 \cdot 10^{16} [\text{Hz}] & & \\ \lambda = 100' \div 0,01 [\mu\text{m}] & & \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{infračervené} & & \text{ultrafialové} \end{array}$$

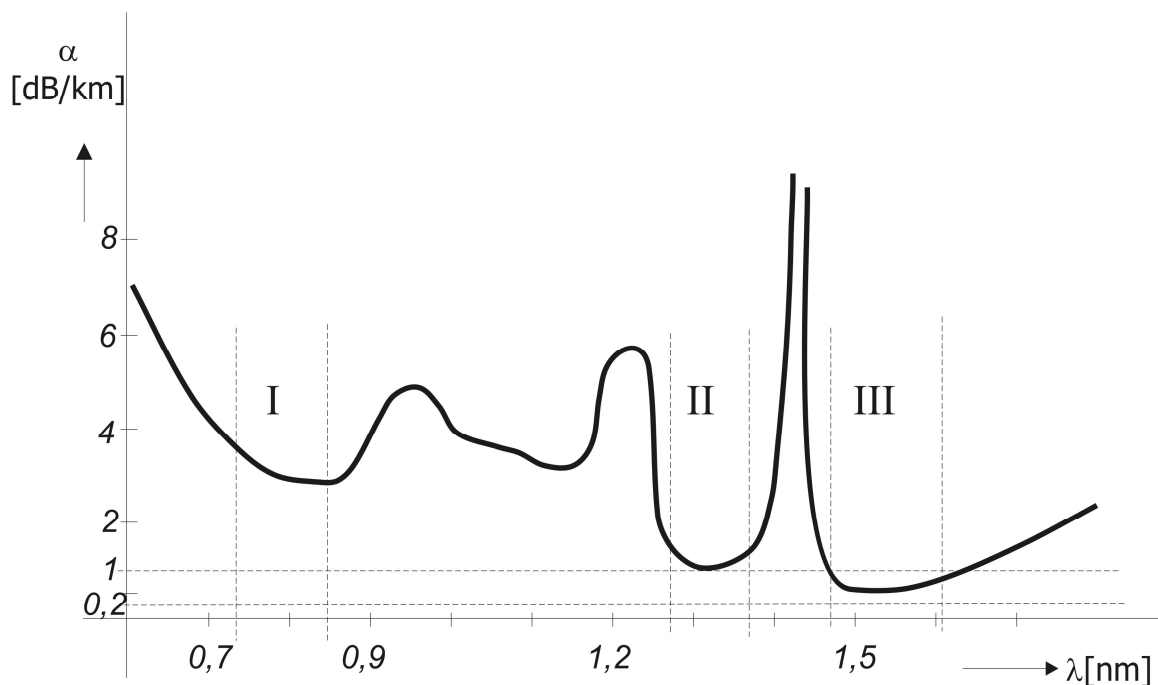
Viditeľná oblasť optického spektra

$$\begin{array}{ccc} f = 3,84 \cdot 10^{14} \div 7,87 \cdot 10^{14} [\text{Hz}] & & \\ \lambda = 0,78 \div 0,38 [\mu\text{m}] & & \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{červená} & & \text{fialová} \end{array}$$

Pre optoelektroniku (s prihliadnutím na výhodné vlastnosti materiálov používaných na výrobu optovodov) sa využíva krátkovlnná oblasť infračerveného žiarenia t.j. oblasť okolo

$$\begin{array}{ccc} \lambda = 1 [\text{mm}] & & \text{cca } 0,75 \div 2 [\mu\text{m}] \\ \downarrow & & \downarrow \\ f = 3 \cdot 10^{14} [\text{Hz}] = 300 [\text{THz}] & & 400 \div 150 [\text{THz}] \end{array}$$

V tejto oblasti ako je vidno na obr.1 sa využívajú v súčasnosti tri okná, kde optovody vyrobené napr. zo SiO_2 vykazujú najmenšie tlmenie, zdroje žiarenia (modulátory) LED, lasery majú dostatočný výkon a detektory (fotodiódy -pin, lavínové) dostatočnú citlivosť.



obr. 1 Závislosť špecifickej konštanty tlmenia α na vlnovej dĺžke λ pre optovod zo SiO_2

Keďže v tejto oblasti nosná frekvencia f je rádovo 10^{14} Hz, šírka pásma napr. aj niekoľko GHz je vzhľadom k nosnej vysoko úzkopásmová záležitosť

Vzhľadom na vlastnosti zdrojov (modulátory) žiarenia a optických detektorov, v súčasnosti je šírka využívateľného pásma v optokomunikačných prenosových systémov stovky MHz až niekoľko GHz.

b) Vysoká odolnosť proti rušeniu

Pri prenose informácii pomocou svetla, nosičmi energie sú fotóny, ktoré sú elektricky neutrálne a teda imúnne voči cudzím elektromagnetickým poliam.

Poznámka: Dôležité hľadisko je tiež galvanické oddelenie vysielača od prijímača. Vysielač a prijímač sú od seba dokonale izolované a problémy vyplývajúce zo zemnenia a rozdielu potenciálov, ktoré sa pri použití spojenia s elektricky vodivými vodičmi vyskytovali, odpadnú. Horeuvedené vlastnosti majú veľký význam pri budovaní energetického dispečingu

c) Utajenie prenášanej informácie

Optokomunikačné systémy poskytujú vysokú odolnosť proti ti odpočúvaniu (prakticky nemožné). V týchto systémoch sa využíva PCM technika (číslícový prenos)

d) Malé skreslenie charakteristiky tlmenia

Ako vidno z obr. 1 vo využívaných pásmach (všetky tri okná) je odchýlka tlmenia od konštantnej hodnoty niekoľko desiatin decibelov, čo je v porovnaní s priebehmi na metalických vedeniach (napr. koaxiálne káble) neporovnateľne lepšie. Teplotná závislosť charakteristiky tlmenia je veľmi malá.

e) Väčšie vzdialenosti opakovacích úsekov

Oproti klasickým metalickým vedeniam majú optovody nepatrné tlmenie. Preto vzdialenosti medzi opakovacími zosilňovačmi napríklad v porovnaní s PCM systémami s metalickými vedeniami sú omnoho väčšie.

f) Úspora materiálu, malý objem a hmotnosť

Vzhľadom na nepatrné rozmery optovodov (rádovo μm) káble s optickými vláknami majú oproti klasickým káblom s metalickými vedeniami podstate menší objem a hmotnosť (jednoduchšia manipulácia, montáž, menej priestoru -význam najmä v mestách).

Veľmi významným hľadiskom je obrovská úspora deficitných materiálov (Cu, Al, Pb).

Napríklad : 1 koaxiálny pár 4,4(1,2 [mm] spotreba 50kg Cu/km

1 opt. vlákno 25 [mm] spotreba 8,2g SiO₂/km

Popri jednoznačných výhodách je treba uviesť aj niektoré problémy v súvislosti so zavádzaním optokomunikácií pri prenose informácií. Sú to : Nároky na technológiu výroby optických vlákien (čistota materiálu, presnosť vzhľadom na malé rozmery), spájanie vlákien, odbočovanie, väzobné členy, konektory, navязovanie zdrojov (modulátorov) a detektorov na vlákno, regenerácia, nároky na presnosť pri montáži, prístrojová technika, atď.

Vzhľadom na horeuvedené výhody a podľa súčasných poznatkov je možné predpokladať, že prakticky všetky pozemské telekomunikačné služby budú realizované sieťami s optickými vláknovými spojmi, doplnené rádioreleovými a družicovými systémami. Družicové systémy sa uplatnia predovšetkým pre prenos informácií na veľmi veľké vzdialenosti v jednotlivých štátoch, kontinentoch a medzi kontinentami.

Radioreleové systémy budú využívané predovšetkým v oblastiach, kde prakticky nie je možné klást' optické káble, či už do zeme, alebo ako nadzemné vedenia.

Na prekážku týchto optokomunikačných systémov nie sú ani veľké vodné plochy, jazerá či moria. Projektujú sa a prakticky nasadzujú i podmorské optické káble, ktoré umožňujú prenos veľmi veľkého množstva informácií už cez oceány (napr. medzi Európou a Sev. Amerikou).

Pri nasadení týchto systémov dochádza k podstatnému redukovaniu počtu medziľahlých zosilňovačov (opakovačov), prípadne aj k ich úplnému vylúčeniu, čo má samozrejme za následok významné zvýšenie spoľahlivosti týchto systémov a zároveň podstatnú úsporu energie.

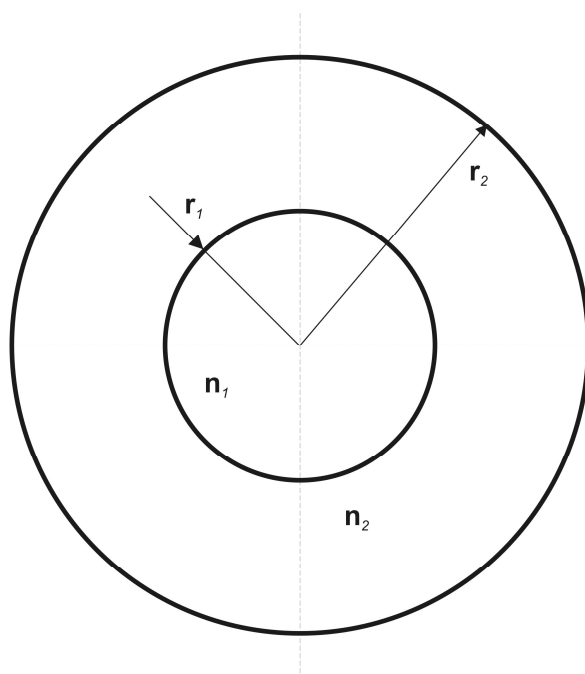
Zavedenie integrovanej optiky do Optokomunikačných systémov bude znamenať ďalšie zlepšenie ich funkcie, zvýšenie spoľahlivosti a ďalšiu úsporu energie.

2. Základné prvky optokomunikačných prenosových systémov.

2.1 Optické vlákna a optické káble

2.11 Typy optických vlákien

Optické vlákno je najčastejšie zložené z dielektrického valcového vlákna s indexom lomu n_1 (tzv., jadro), na ktorom je koncentricky nanosená dielektrická vrstva s indexom lomu n_2 , pozri obr. 2. Tieto indexy lomu musia spĺňať podmienku $n_1 > n_2$, pričom ich pomer sa musí blížiť k jednotke



Obr. 2 Rez jadrom optovodu

Elektromagnetická energia šíriaca sa svetlom je koncentrovaná do jadra, malá časť sa však šíri plášťom, kde je tlmená podľa zákona e^{-r^2} . Rozloženie elektromagnetického poľa v svetlovode je závislé od rozmerov vlákna r_1 a r_2 a pomeru indexu lomu n_1/n_2 . V prípade, že

priemer jadra $2r_1$ je podstatne väčší ako dĺžka vlny budiaceho žiarenia, vytvára sa vo vlákne veľké množstvo módov elektromagnetického poľa (niekoľko sto až niekoľko tisíc), ktoré sa šíria súčasne. V tomto prípade ide o tzv. mnohomódový prenos.

Keď chceme, aby bol prenášaný len jeden mód elektromagnetického poľa, musí byť priemer jadra $2r_1$ rádovo rovnaký ako je dĺžka vlny prenášaného elektromagnetického poľa (prakticky $r_1 \cdot 0,5 - 5 \text{ nm}$) a hodnota pomeru indexu lomu jadra a plášťa n_1/n_2 sa musí blížiť k jednotke. V tomto prípade hovoríme o jednomódovom prenose.

Okrem už uvedených typov svetlovodov bolo vyvinuté vlákno a jadrom, ktorého hodnota indexu lomu n_x sa znižuje od pozdĺžnej osi vlákna (od stredu) radiálnym smerom ku okraju jadra podľa vzťahu

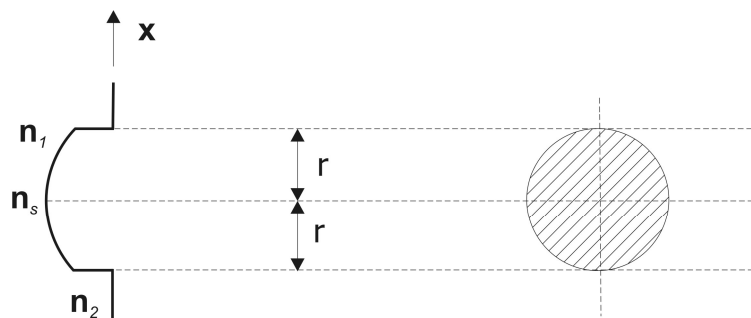
$$n_x = n_s \left[1 - k \Delta \left(\frac{x}{r} \right)^x \right] \quad (2.1)$$

ktorý platí pre $0 \leq x \leq r$ a pre plášť s konštantným indexom lomu. Pre $x > r$ platí:

$$n_x = n_s [1 - \Delta] \quad (2.2)$$

$$\text{kde} \quad \Delta = \frac{n_s - n_2}{n_s} = 1 - \frac{n_2}{n_s} = 0,01 \div 0,02$$

x je vzdialenosť od stredu jadra (pozri obr. 2a), r - polomer jadra, f - prirodzené číslo (optimálne je $\xi = 2$, vtedy je priebeh indexu lomu parabolický),



Obr. 2a

Priebeh indexu lomu na gradientnom vlákne

n_2 - index lomu pre $x > r$ (plášť),

n_s - index lomu pre $x = 0$ (stred jadra),

n_1 - index lomu pre $x = r$ (povrch jadra),

k - určuje minimálnu hodnotu indexu lomu pre $x = r$.

Výhoda tohto konštrukčného usporiadania, tzv. gradientného mnohomódového vlákna, spočíva v podstatnom znížení šíriacich sa módov oproti mnohomódovému vláknu s konštantnou hodnotou indexu lomu v jadre, a tým v podstatnom znížení vplyvu rozdielných skupinových časov šírenia jednotlivých módov.

Z už uvedeného vyplýva, že sú vyvinuté tri základné typy svetlovodov:

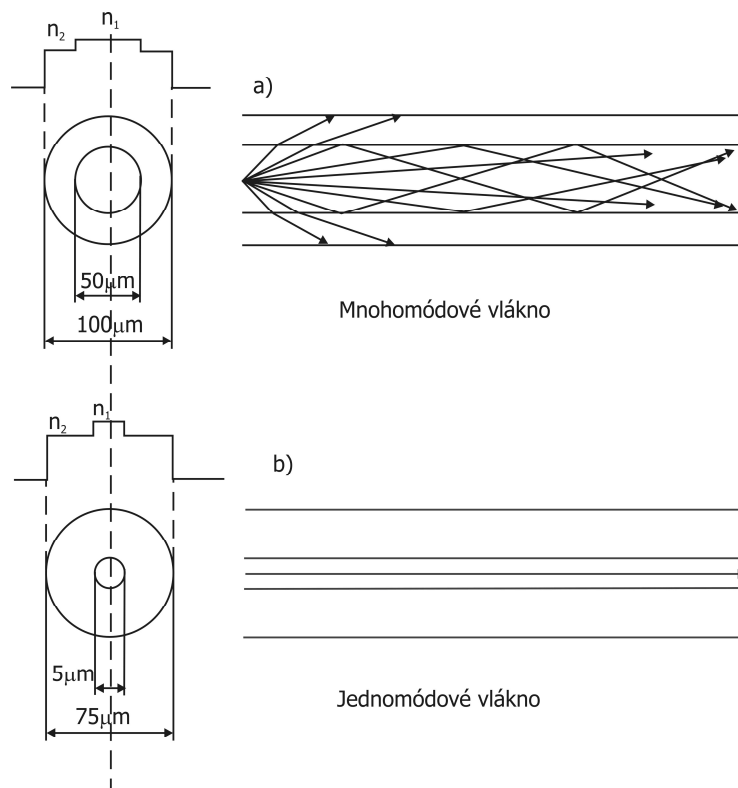
- a) mnohomódový s konštantným indexom lomu v radiálnom smere jadra
- b) jednomódový s konštantným indexom lomu v radiálnom smere jadra,
- c) mnohomódový gradientný s premenným indexom lomu v radiálnom smere jadra.

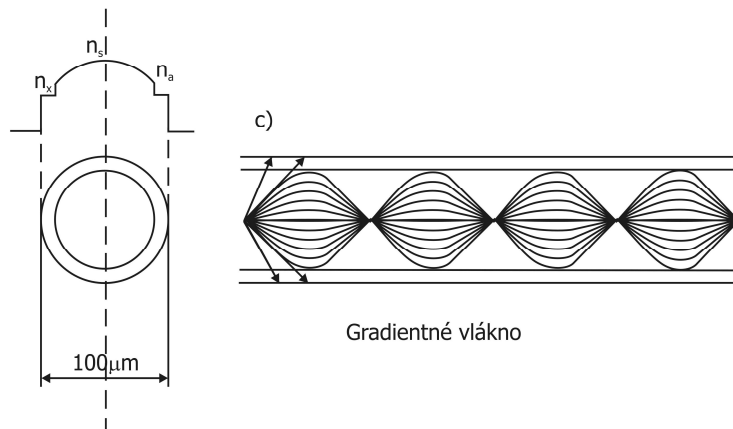
Na obr. 3 sú princípy konštrukcie jednotlivých typov svetlovodov naznačené vrátane priebehov ich indexov lomu v radiálnom smere a spôsobu šírenia svetlovodného žiarenia jednotlivými svetlovodmi.

Z hľadiska použitých materiálov delíme optické vlákna do dvoch tried:

- a) vlákna s kvapalným jadrom a pevným plášťom,
- b) vlákna s pevným jadrom i plášťom.

Použitím kvapaliny pre jadro možno zabezpečiť jej extrémnu čistotu.





Tekutina môže byť prakticky bez nežiaducich stopových kovových prvkov a iónov, najmä skupiny OH^- ktoré výrazne ovplyvňujú absorpcia materiálu optického vlákna. Ako látky sa zväčša používajú zlúčeniny (napr. C_2Cl_4)

Nevýhody týchto vlákien sú :

- veľký plniaci tlak (cca 140 MPa),
- veľká tepelná dilatácia jadra a s tým spojené problémy so spojovaním týchto vlákien.

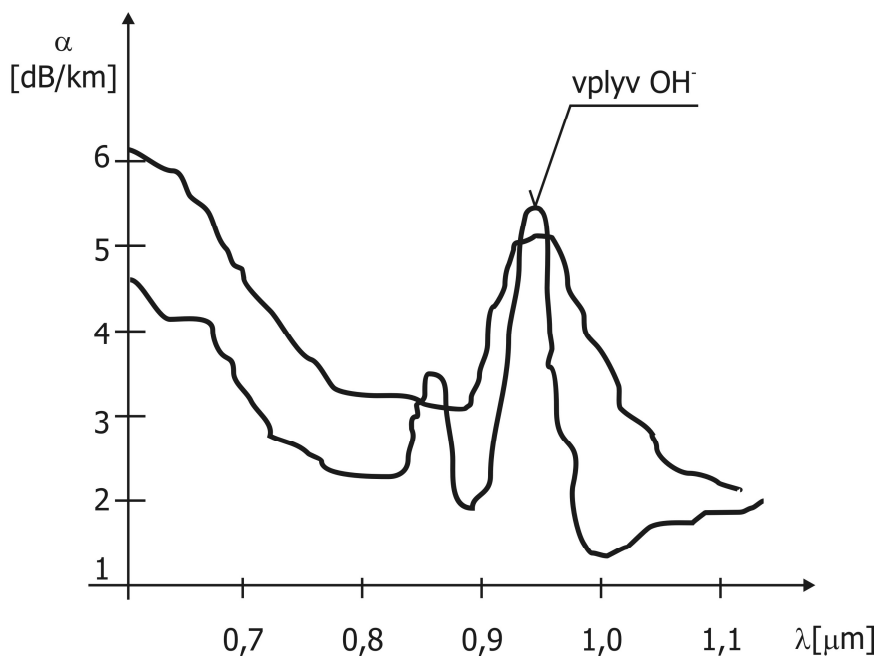
Pri výrobe vlákien s pevným jadrom i plášťom sa používajú dva druhy skiel:

- a) sódnovápenaté,
- b) kremenné (zmesi silikátov).

Menšie tlmenie vykazujú vlákna zo silikátov. Na obr. 4 sú vynesené priebehy merných tlmení takýchto vlákien s vyznačením použiteľnosti. Na krivkách je zreteľný vplyv prímies iónov OH^- s maximom pri $\lambda=950 \text{ nm}$.

Na výrobu sa používajú extrémne čisté suroviny, čo je technicky zvládnutelné. Technologické ťažkosti vznikajú pri tavení vlákna, pretože sa pracuje s teplotou až $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ a ťahanie musí prebiehať v ochrannej atmosfére.

Študujú sa možnosti použitia plastických hmôt na výrobu, optických vlákien. Výhodou týchto vlákien oproti silikátovým by bola podstatne väčšia ohybnosť a pružnosť.



Obr. 4 Závislosť špecifickej konštanty tlmenia α od vlnovej dĺžky λ na rôznych typoch optických vlákien

2.12 Prenos energie optickým vláknom

Šírenie optického žiarenia môžeme sledovať buď riešením vlnovej rovnice, alebo môžeme vychádzať zo zákonov klasickej fyzikálnej optiky.

a) Opis použitím vlnovej teórie

Pri riešení vychádzame z vlnových rovníc pre obe zložky elektromagnetického poľa $\vec{E}$ a $\vec{H}$.

Ak použijeme cylindrické súradnice, bude

$$x = r \cdot \cos(j)$$

$$y = r \cdot \sin\phi$$

$$z = z$$

Pozdĺžna os svetlovodu je totožná so súradnicovou osou z .

Vlnová rovnica elektrického poľa je

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + c^2 E_z = 0 \quad (2.3)$$

Pre magnetické pole platí

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + c^2 H_z = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{kde } c = \sqrt{k_1^2 - b^2}$$

Tieto rovnice platia pre homogénne prostredie s konštantným indexom lomu. V našom prípade treba však rozlíšiť pole v jadre ($r \leq r_1$ kde r_1 je polomer jadra), ktoré musí nadobúdať reálne konečné hodnoty, a pole, ktoré sa vytvorí v plášti ($r > r_1$). Intenzita poľa v plášti musí exponenciálne klesať so vzrastajúcim parametrom r , aby väčšina elektromagnetickej energie bola koncentrovaná v jadre. Pre z-tú zložku poľa hľadáme riešenie v tvare

$$E_z = A \cdot F(r) \cdot e^{jnf} \quad (2.5)$$

kde v je celé číslo, aby funkcia mala periódu 2π . Dosadením (2.5) do (2.3) dostaneme Besselovú rovnicu

$$\frac{d^2 F}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} - (c^2 - \frac{n^2}{r^2}) F = 0 \quad (2.6)$$

Táto rovnica má dve lineárne nezávislé riešenia. Na výpočet poľa vo vnútri jadra je vhodná Besselova funkcia $J_v(i r)$ ktorej hodnota je vždy konečná. Podmienke, aby jednotlivé zložky poľa exponenciálne klesali na nulu s rastúcim polomerom $r > r_1$, vyhovuje Hankelova funkcia prvého druhu pre imaginárnu hodnotu $i = jg$, $H_g^{(1)} = (jgr)$. Riešenie uvedených problémov je mimo rámca tohto predmetu (je náplňou iných odborných disciplín), preto sa s ním nebudeme ďalej zaoberať.

Z riešenia rovnice (2.6) vyplýva, že pozdĺžna fázová konštanta β a vlnové čísla k_1 a k_2 sú viazané vzťahmi

$$u^2 = r_1^2 (k_1^2 - b^2) \quad v^2 = r_1^2 (b^2 - k_2^2)$$

kde r_1 - je polomer jadra

$$k_1 = \frac{w}{v_1} = \frac{2 \cdot p}{l_1} = \frac{w}{c} n_1 \text{ je vlnové číslo jadra}$$

$$k_2 = \frac{w}{v_2} = \frac{2 \cdot p}{l_2} = \frac{w}{c} n_2 \quad \text{je vlnové číslo plášťa}$$

$$k_0 = \frac{w}{c} = \frac{2 \cdot p}{l_0} \quad \text{je vlnové číslo vákua}$$

Zavedieme si ďalej pojem normalizovanej frekvencie a vyjadríme ho vzt'ahom

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} = 2p \frac{r_1}{l_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 r_1 NA$$

Relatívna fázová konštanta B jadrovej vlny je

$$B = \frac{v^2}{V^2} = \frac{b^2 - k_2^2}{k_0^2(n_1^2 - n_2^2)}$$

Parameter V charakterizuje vlastnosti vlnovodu. NA nazývame numerickou apertúrou optovodu.

Je zrejmé, že čím väčšia je NA vlnovodu, tým lepšia je účinnosť naviazania zdroja žiarivej energie do vlákna a tým menšie sú požiadavky na smerovosť vyžarovanej charakteristiky zdroja. Ale optovod s väčšou numerickou apertúrou má menšiu šírku kmitočtového pásma (čím väčšia NA, tým väčší počet šíriacich sa módov vo vlnovode - súvislosť uvedieme neskôr) v dôsledku väčšej medovej disperzie.

V bežných vláknach zo SiO_2 je max. NA $\nabla 0,2$. Z riešenia Besselovej rovnice (2.6) $J_0(V) = 0$ vyplýva, že jej prvý koreň je číslo 2,405

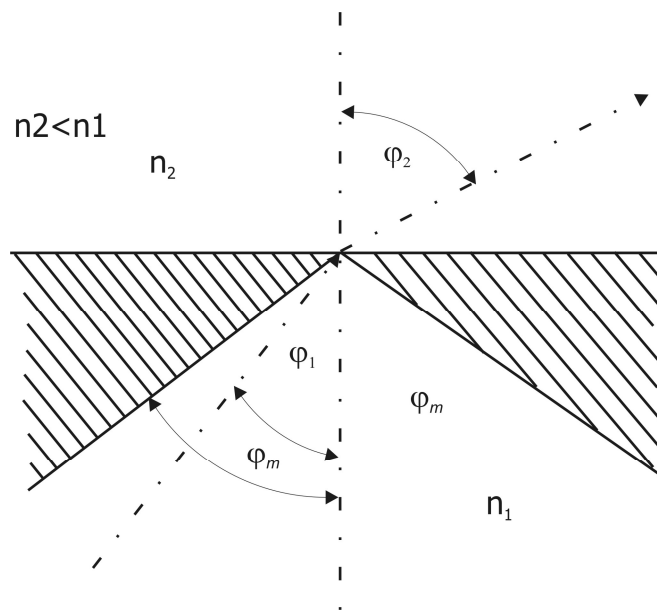
Podmienka pre šírenie len jedného módu v optovode (pre ktorý platí $\frac{n_1}{n_2} \rightarrow 1$) je $V < 2,405$

Príklad: Keď $n_1=1,5$ a $\frac{n_1}{n_2}=1,01$ pre jednomódový prenos smie mať vlákno maximálny priemer $2r_1 = 3,64\mu\text{m}$, keď $\lambda=1\mu\text{m}$

Keď znížime pomer $\frac{n_1}{n_2}=1,003$ potom $2r_1 = 6,6\mu\text{m}$

b) Šírenie optického žiarenia pomocou geometrickej optiky

Vychádzame z úvahy o úplnom odraze, ktorý je založený na lome lúčového zväzku od rozhrania dvoch prostredí, z ktorých prvé má vyšší index lomu n_1 ako n_2 . Na opis dráh zobrazených lúčových zväzkov použijeme Snellov zákon lomu.



obr. 5

Podľa obr. 5 platí:

$$n_1 \sin j_1 = n_2 \sin j_2 \quad (2.7)$$

keď

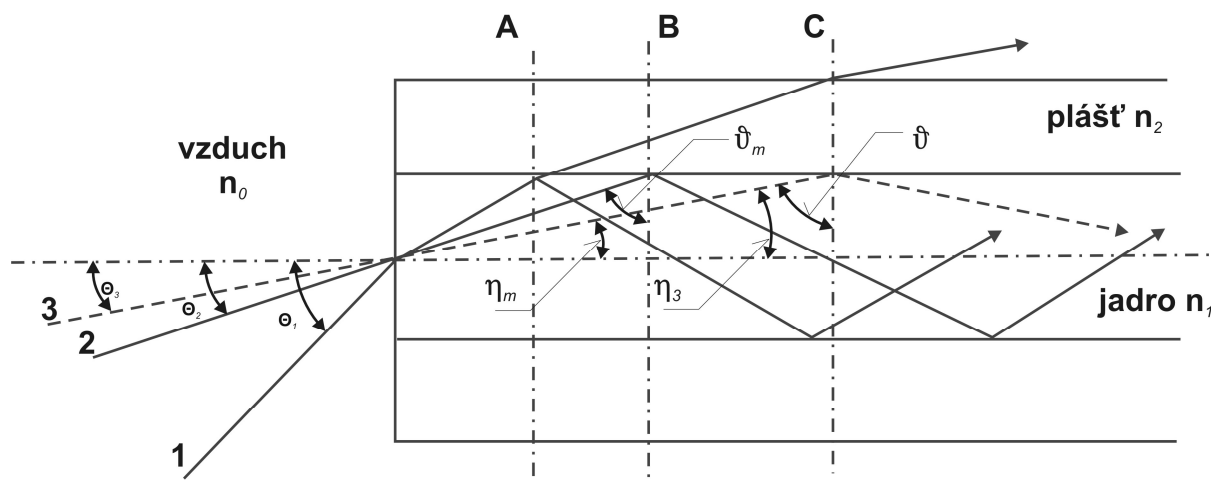
$$j_2 = 90^\circ \quad \sin j_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.8)$$

kde $n_1 > n_2$, φ_1 je uhol dopadu, φ_2 uhol lomu lúča. Pri vzniku úplného odrazu sa $\sin \varphi_2 = 1$, t.j. $\varphi_2 = 90^\circ$, všetky lúče: dopadajúce pod väčším uhlom sú odrazené úplne späť do prostredia, z ktorého dopadli.

Optické vlákno so skokovou zmenou indexu lomu sa teda skladá z jadra s indexom lomu n_1 , obklopeného plášťom s indexom lomu n_2 , spravidla kruhového prierezu.

Podľa obr. 6 na vstupnú plochu jadra s indexom lomu n_1 dopadá lúčový zväzok pod uhlom Θ (vstup zo vzduchu s indexom n_0), pre ktorý platí Snellov zákon lomu:

$$n_0 \cdot \sin \Theta = n_1 \cdot \sin h \quad (2.9)$$



Obr.6 Šírenie lúčového zväzku v optovode

Na rozhranie jadra a plášťa dopadá zväzok pod uhlom

$$90 - h = J$$

Podmienka pre medzný uhol, keď sa zväzok na rozhraní jadra a plášťa úplne odrazí, podľa (2.8) je

$$\sin n_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

Kombináciou vzťahov (2.9) a (2.10) a pri $n_0 = 1$ (platí pre vzduch) môžeme napísať podmienku pre najväčší možný vstupný uhol Θ_0 :

$$\sin \Theta_0 = n_1 \cos J_m \quad (2.11)$$

Z tejto podmienky vyplýva, že keď dopadne na vstup vlákna zväzok lúčov (obr. 6) označený ako 1 pod uhlom väčším ako Θ_0 , nastane v rovine dopadu A lom a časť energie lúča nenávratne unikne z vlákna. V prípade, že dopadajúce zväzky lúčov spĺňajú podmienku $1 \leq \Theta_0$ (pozri lúče 2 a 3), dochádza na rozhraní medzi jadrom a plášťom v rovinách B a C k úplnému odrazu a lúče sa šíria vláknom.

Pre tento prípad platí:

$$NA = \sin \Theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.12)$$

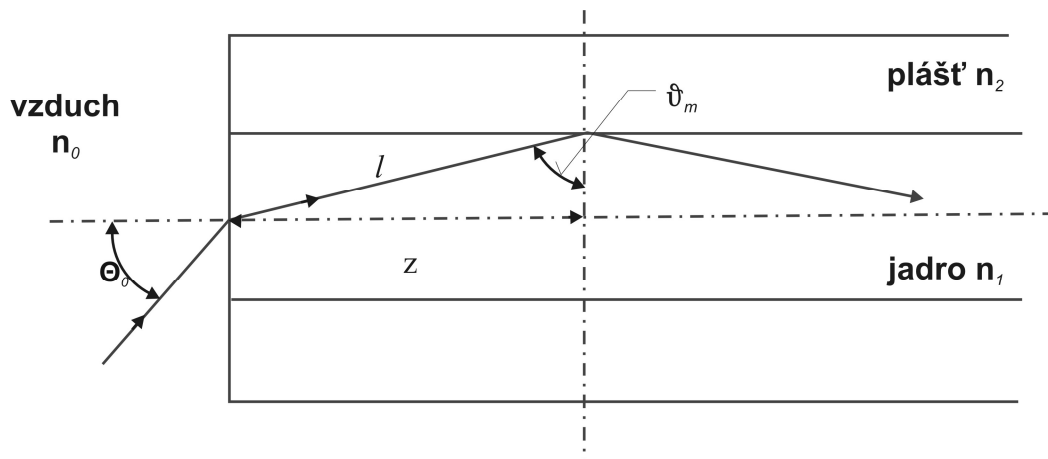
Tento vzťah charakterizuje schopnosť vlákna preniesť prijímaný lúč a nazývame ho vstupnou apertúrou zväzku NA

2.13 Časové oneskorenie signálu pri prenose optovodmi

Lúčové zväzky šíriace sa vláknom pod rôznym uhlom prekonajú vo vlákne rôzne dlhé vzdialenosti, a preto zložky toho istého vstupného signálu prichádzajú s rôznym časovým oneskorením. Pre monochromatické zväzky môžeme odvodiť vzťah pre rozdiel

vzdialeností „ l “ silného lúčového zväzku vzhľadom na vzdialenosť „ z “ osového zväzku podľa obr. 7 :

$$l = \frac{z}{\sin J_m} = \frac{n_1}{n_2} z = z \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 - (NA)^2}} \quad (2.13)$$



obr.7

Rozdiel v dĺžke dráhy zväzku prechádzajúceho v osi a zväzku, ktorý dopadol na vstupnú plochu pod medzným uhlom θ_0 , môžeme vyjadriť vzťahom

$$\Delta z = l - z = z \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = z \frac{\Delta n_1}{n_2} \quad (2.14)$$

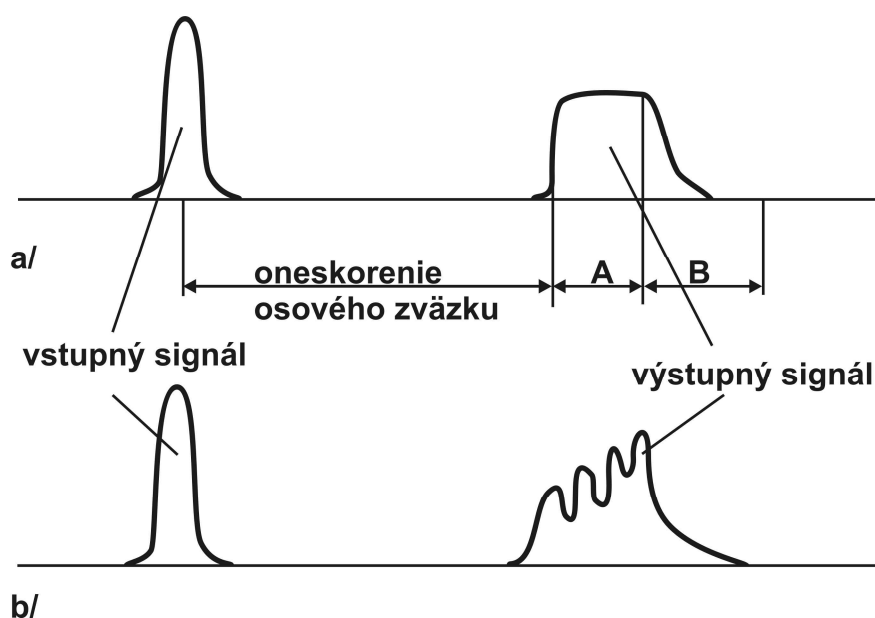
kde $\Delta n_1 = n_1 - n_2$

z ktorého vyplýva pre časový rozdiel Δt príchodu oboch zväzkov na výstup vlákna

$$\Delta t = \frac{z}{c} \Delta n_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (2.15)$$

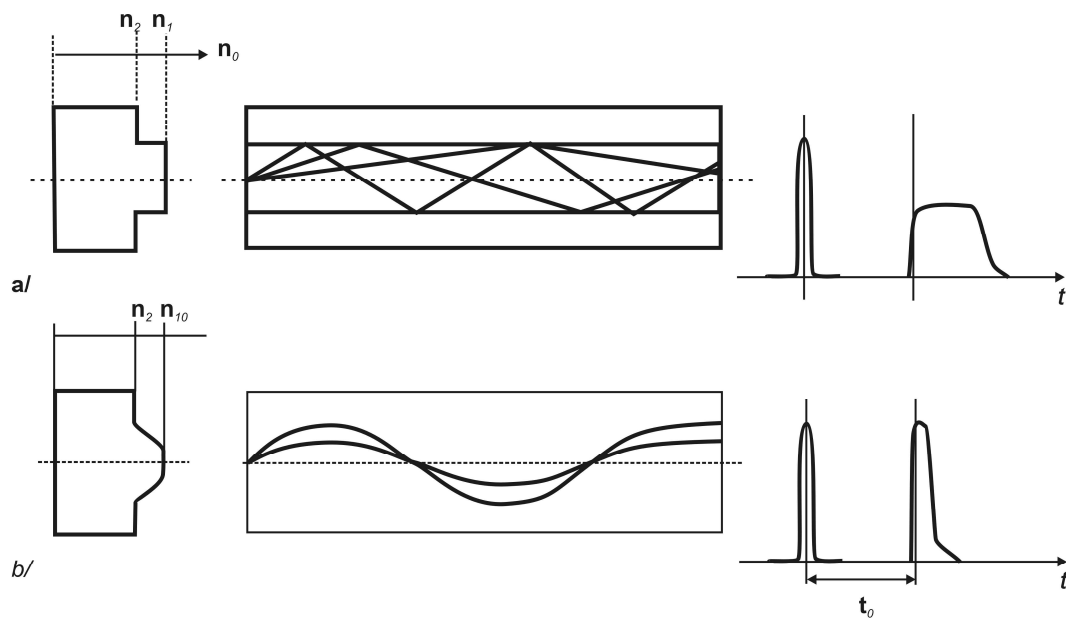
Pri nemonochromatických lúčových zväzkoch vo viacmódových vláknach každý mód sa šíri inou osovou (axiálnou) skupinovou rýchlosťou, takže; signál realizovaný na vstupe vlákna jediným impulzom sa na výstupe skladá zo zložiek, ktoré prichádzajú s rôznym oneskorením oproti módu, ktorý by prešiel v osi vlákna bez odrazov, čím sa podstatne zväčší šírka impulzu. Na obr. 8a je znázornené principiálne rozšírenie šírky impulzu. Na obr. 8b znázornený

vstupný impulz po prechode napr. 4-módového vlákna. Na obr. 9 je znázornený priebeh lúčových zväzkoch pri vláknoch s konštantným indexom lomu a pri gradientných vláknoch. Bodkou je označená vzdialenosť, akú za určitý čas t prejdú jednotlivé módy. Z obrázka je zrejmé, že osová rýchlosť gradientného vlákna podstatne menej kolíše ako vlákna s konštantným indexom lomu, v dôsledku Čoho aj rozšírenie, impulzu na výstupe, bude podstatne menšie.

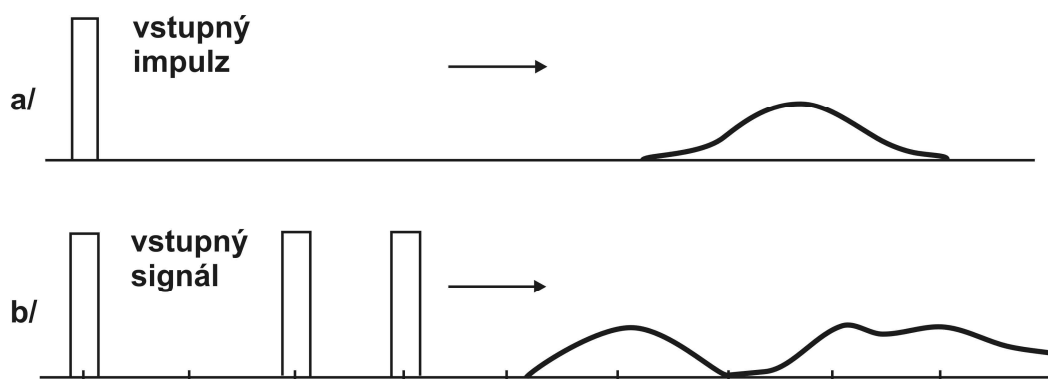


Obr. 8 Skreslenie a oneskorenie impulzu pri prechode optovodom

V prípade signálu realizovaného radom impulzov môže dôjsť k takému veľkému skresleniu (rozšíreniu), že sa podstatne zníži spoľahlivosť prenosu (pozri obr. 10b). V takomto prípade by bolo treba príslušne znížiť rýchlosť prenosu.



Obr. 9 Šírenie lúčových zväzkov na rôznych typoch optických vlákien.



Obr. 10

2.14 Disperzia

Dôležitou charakteristikou vlastností optovodov pri prenose nemonochromatického signálu je skupinové oneskorenie, ktoré charakterizuje skreslenie tohto signálu pri prenose optovodom, t. j. v podstate skreslenie obálky úzkopásmového signálu pre ktorý platí:

$$\Delta w_{\max} \ll w_0 \quad (2.16)$$

Skupinové oneskorenie obálky úzkopásmového signálu je definované ako

$$t_{sk} = \frac{db}{dw} = \frac{dbL}{dw} = n \frac{L}{C} \frac{db}{dk_1} \quad (2.17)$$

kde b - fázový posuv na celej dĺžke optovodu

β - špecifický fázový posuv v smere osi optovodu

k_1 - vlnové číslo jadra optovodu

n - optická hustota jadra optovodu

L - celková dĺžka optovodu Skupinová rýchlosť šírenia svetelnej energie je

$$v_{sk} = \frac{dw}{db} \quad (2.18)$$

Rovnicu (2.17) môžeme prepísať takto

$$t_{sk} = L \frac{db}{dw} = \frac{db}{dk_1} L \frac{dk_1}{dk_0} \frac{dk_0}{dw}$$

kde $k_0 = \frac{w}{C} = \frac{2p}{l_0} = \frac{2p}{l_0}$ je vlnové číslo vákua (vzduchu), K_1 - je vlnové číslo jadra

optovodu

Ďalej platí

$$k_1 = n_1 k_0 = n_1 \frac{2p}{l_0} \quad (2.20)$$

Časť výrazu z rovnice (2.19) môžeme napísať takto

$$L \frac{dk_1}{dk_0} \frac{dk_0}{dw} = L \frac{d(n_1 k_0)}{dk_0} \frac{d\left(\frac{w}{C}\right)}{dw} = \frac{L}{C} \left(n_1 + k_0 \frac{dn_1}{dl_0} \frac{dl_0}{dk_0} \right)$$

keďže

$$\frac{dk_0}{dl_0} = -\frac{2p}{l_0^2} = -\frac{k_0}{l_0}$$

môžeme napísať

$$L \frac{dk_1}{dk_0} \frac{dk_0}{dw} = \frac{L}{C} \left[n_1 - l_0 \frac{dn_1}{dl_0} \right] \quad (2.21)$$

výraz

$$n_1 - l_0 \frac{dn_1}{dl_0} = N_1 \quad (2.22)$$

nazývame skupinový index lomu a

$$t_m = \frac{L}{C} N_1 \quad (2.23)$$

je skupinové oneskorenie dané materiálom a udáva čas, za ktorý voľne šíriaca sa svetelná vlna v médiu s indexom lomu n_1 , prebehne dĺžku optovodu L (vo vláknach zo SiO_2 sa pohybuje v rozmedzí cca $5\mu\text{s}/\text{km}$).

Skupinový index lomu N_1 nie je závislý od jednotlivých šíriacich sa módov, je pre všetky módy pre danú vlnovú dĺžku rovnaký ako vyplýva z (2.22).

2.141 Módová disperzia

Ako už bolo uvedené relatívna fázová konštanta

$$B = \frac{v^2}{V^2} = \frac{b^2 - k_0^2}{k_0^2(n_1^2 - n_2^2)} = \frac{\left(\frac{b}{k_0}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.24)$$

keď $n_1 \rightarrow n_2$, alebo $\frac{n_1}{n_2} \rightarrow 1$

Potom výraz (2.24) môžeme zjednodušiť

$$B = \frac{\frac{b}{k_0} - n_2}{n_1 - n_2} \frac{\frac{b}{k_0} + n_2}{n_1 + n_2} = \frac{\frac{b}{k_0} - n_2}{n_1 - n_2}$$

lebo platí

$$n_1 \geq \frac{b}{k_0} \geq n_2$$

a keď $n_1 \rightarrow n_2$, potom

$$b = k_0 [B(n_1 - n_2) + n_2] = k_0 n_1 \left[B \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) + \frac{n_2}{n_1} \right]$$

keďže $n_1 \rightarrow n_2$ druhý člen $\frac{n_1}{n_2} \rightarrow 1$

Keď relatívny rozdiel indexov lomu Δn je obvyklé daný ako

$$\Delta n = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + n_2^2} \nabla 1 - \frac{n_2}{n_1}$$

$$\beta \nabla k_1 (B \Delta n + 1) \quad (2.26)$$

Pre odvodenie výrazu $\frac{db}{dk_1}$, ktorý potrebuje v rovnici (2.19) na vyjadrenie celkového skupinového oneskorenia musíme

brať do úvahy, že B aj Δn sú funkciou k_1 a okrem toho B je funkciou V.

Pri zohľadnení týchto skutočností po vypočítaní výraz $\frac{db}{dk_1}$ (pozri [2]) dostaneme výsledné skupinové oneskorenie

$$t_{sk} = t_m + \frac{L}{C} \left[\Delta n N_1 - \frac{n_1 l_0}{2} \frac{d\Delta n}{dl_0} \right] \frac{d(BV)}{dV} \quad (2.27)$$

V rovnici (2.27) časovú diferenciu šírenia sa jednotlivých módov určuje výraz $\frac{d(BV)}{dV}$

Vypočítaním výrazu $\frac{d(BV)}{dV}$ (pozri [2]) sa dá dokázať, že keď $V \gg 0$, $u \rightarrow 0$ (najnižší mód) potom

$$\frac{d(BV)}{dV} \nabla_1$$

keď $u \rightarrow 0$ (najvyšší mód)

$$\frac{d(BV)}{dV} = 2 \left(1 - \frac{1}{V} \right)$$

Časový rozdiel medzi najnižším a najvyšším módom vzťahnutý na dĺžku optovodu L bude

$$\frac{\Delta t_{sk}}{L} = \frac{1}{C} \left(1 - \frac{2}{V} \right) \left[\Delta n N_1 - \frac{n_1 l_0}{2} \frac{d\Delta n}{dl_0} \right] \quad (2.28)$$

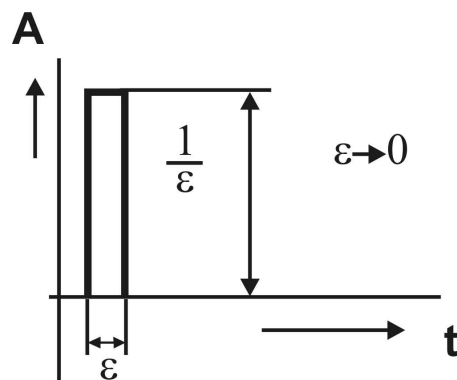
napr. pre $\lambda_0 = 0,85 \mu\text{m}$ SiO₂ SI optovod

d = 25 μm

Módová disperzia $\frac{\Delta t_{sk}}{L} = 68 \text{ [ns/km]}$

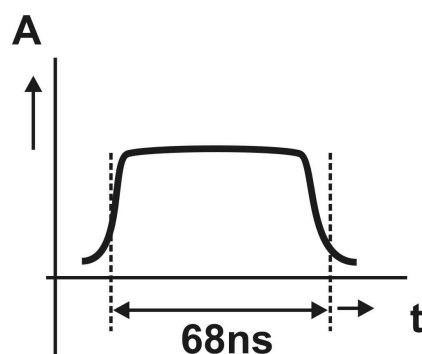
Fyzikálny význam :

Medzi najnižším a najvyšším módom časový rozdiel na konci 1 km dlhého optovodu je 68 ns. Keby sme vybudili tento optovod časovo nekonečne krátkym a hodnotou $\rightarrow \infty$ impulzom (Diracov impulz) pozri obr. 11



Obr. 11

A predpokladajme, že výkon optického žiarenia by sa rozložil pri šírení optovodom na všetky módy rovnomerne, potom by sme dostali na výstupe optovodu odozvu v tvare podľa obr. 12.



Pre SI optovod s podobnými parametrami ako bolo uvedené hore je šírka pásma zreteľne pod 50 MHz . km.

2.142 Materiálová disperzia

Doteraz bolo analyzované oneskorenie za predpokladu, že zdroj žiari na vlnovej dĺžke λ_0 . Je treba si uvedomiť, že väčšina zdrojov, ktoré sú reálne k dispozícii majú konečnú spektrálnu šírku vyžiarenej energie $\Delta\lambda_0$. Nech sú jednotlivé módy vybudené krátkym svetelným impulzom so spektrálnou šírkou $\Delta\lambda_0$. Potom sa bude skupinová rýchlosť šírenia medzi najmenšou a najväčšou dĺžkou vo vnútri spektrálnej šírky $\Delta\lambda_0$ líšiť, teda τ_m , z rovnice (2.27) je tiež funkciou vlnovej dĺžky. Závislosť je daná výrazom

$$\frac{dt_{sk}}{d\lambda_0} \quad (2.29)$$

Rozdiel oneskorenia $\Delta\tau_{sk}$, vzťahnutý na spektrálnu šírku zdroja $\Delta\lambda_0$ a dĺžku optovodu L sa dá vyjadriť

$$\frac{dt_{sk}}{dl_0 L} = \frac{1}{L} \frac{dt_{sk}}{dl_0} \quad (2.30)$$

Použitím rovnice (2.19) môžeme, rovnicu (2.30) prepísať

$$\frac{1}{L} \frac{dt_{sk}}{dl_0} = \frac{d}{dl_0} \left[\frac{db}{dk_1} \frac{dk_1}{dk_0} \frac{dk_0}{dw} \right] = \frac{1}{C} \frac{d}{dl_0} \left(N_1 \frac{db}{dk_1} \right) \quad (2.31)$$

Aby sme ďalšie výpočty nekomplikovali a nemiešali s doteraz analyzovanou módovou disperziou uvažujme vlnu s $b=k_1$, (meridiánový lúč), takže

$$\frac{db}{dk_1} = 1$$

Potom

$$\frac{1}{L} \frac{dt_{sk}}{dl_0} = -\frac{1}{C} \left(l_0 \frac{d^2 n_1}{dl_0^2} \right) \quad (2.32)$$

Výraz v rovnici (2.32) nazývame materiálová disperzia.

Pri vlnových dĺžkach $\lambda_0 = 1,3 \mu\text{m}$ je pre SiO_2 $\Delta t \nabla 0$

$\lambda_0 = 1,3 \mu\text{m}$ je pre $\text{GeO}_2 + \text{SiO}_2$ $\Delta t \nabla 0$

Na druhej strane pri $\lambda_0 = 0,85 \mu\text{m}$ musíme už uvažovať časovú diferenciu, ktorá je pre hore uvedené materiály cca $0,1 \text{ [ns/(km.nm)]}$ pri použití obvyklých zdrojov (polovodičový laser $\Delta\lambda_0 = 1 \text{ nm}$ alebo LED $\Delta\lambda_0 = 50 \text{ nm}$) Naproti tomu módová disperzia SI optovodov je pri tejto vlnovej dĺžke ($\Delta\lambda_0 = 0,85 \mu\text{m}$) zanedbateľná.

2.143 Vlnovodová disperzia

Exaktným výpočtom rovnice (2.31), teda keď $b \neq k_1$ a teda $\frac{db}{dk_1} \neq 1$ dostaneme (pozri[2])

$$\frac{1}{L} \frac{dt_{sk}}{dl_0} = \frac{1}{L} \frac{dt_{sk}}{dl_0} = \frac{1}{C} \frac{d}{dl_0} \left(N_1 \frac{db}{dk_1} \right) = -\frac{1}{C} \left[\frac{2p}{l_0^2} N_1^2 \frac{d^2 b}{dk_1^2} + l_0 \frac{db}{dk_1} \frac{d^2 n_1}{dl_0^2} \right] \quad (2.33)$$

Tento vzťah poukazuje na to, ako sú navzájom zviazané materiálová a módová disperzia. V

uvedenom vzťahu vystupuje výraz $\frac{d^2b}{dk_1^2}$, ktorý je označený ako vlnovodová disperzia a zvlášť dôležitú úlohu hrá pri monomódových vláknach. Výpočet tejto veličiny je pomerne náročný (pozri [23]). Je závislý od vlnovej dĺžky a pri multimódových vláknach ho môžeme zanedbať.

Vzhľadom na priamu úmernosť oneskorenia na dĺžke svetlovodu a vzhľadom na obmedzenie prenosovej rýchlosti vynútené veľkosťou oneskorenia (pozri obr. 10), sú prenosové vlastnosti vlákien z hľadiska možnej rýchlosti prenosu vyjadrované tiež v Mbit.km/s. Z tejto hodnoty ľahko môžeme vypočítať, akú vzdialenosť možno preklenúť pri vyžadovanej rýchlosti bez toho, aby sa narušil tvar prenášaných impulzov. Pre ilustráciu sú v tabuľke I uvedené niektoré praktické hodnoty oneskorenia pre rôzne materiály jadra multimódového SI vlákna. Hodnoty oneskorenia pre rôzne materiály jadra vlákna

Tabuľka I

materiál jadra vlákna	suprasil	FK51	BK 7	SF 16
módová disperzia [ns/km]	75/3	76/7	78/4	85/1
materiálová disperzia jns/krf	3,4	3/2	4/2	11,2

Priaznivým javom pre výslednú zmenu preneseného impulzu je tzv. väzba módov, pri ktorej prechádza energia z módov s nižším sklonom na módy s vyšším sklonom, ktoré môžu mať straty. Príčinou vzniku tejto väzby je napr. i nepravidelnosť rozmerov a zloženie vlákna. Po prebehnutí určitej dĺžky vlákna z dochádza k ustálenému stavu. Pôvodný časový rozptyl, ktorý môžeme zjednodušene vyjadriť výrazom

$$T \cdot \Delta \cdot z \quad (2.34)$$

kde T je stredná doba šírenia signálu, $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ - pomerný rozdiel indexu lomu,

z - väzbová dĺžka.

Na dĺžke l sa časový rozptyl zníži na hodnotu

$$\Delta \cdot T \cdot \sqrt{l \cdot z} \quad (2.35)$$

2.15 Prenos energie gradientným optickým vláknom

Všeobecný popis gradientného vlákna bol uvedený v kap. 2.11. K vyšetrovaniu prenosových vlastností optických vlákien môžeme pristupovať dvoma spôsobmi (pozri kap. 2.12). V prípade, že polomer jadra optovodu $r \gg \lambda$ kde λ je vlnová dĺžka prenášanej svetelnej energie, môžeme použiť zákony geometrickej optiky. V gradientnom vlákne k tejto podmienke, pozri obr. 3c, je ešte nutné pridať podmienku dostatočnej pomalej zmeny $n_x = n(x)$. Táto podmienka je prakticky vždy splnená.

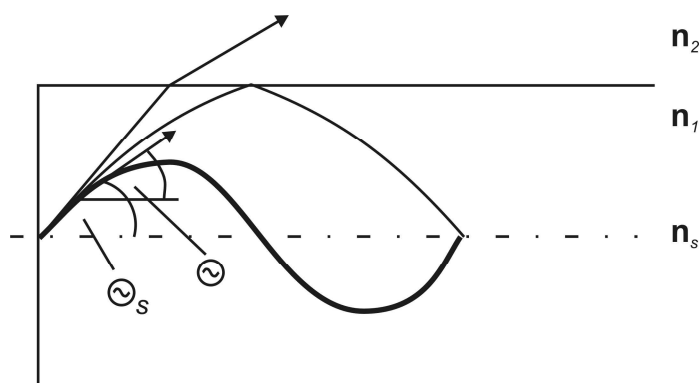
Priebeh indexu lomu v gradientnom optovode sa blíži najčastejšie kvadratickej parabole, vid'. obr.2 a rovnicu (2.1). Optovod s týmto priebehom indexu lomu má veľmi dobré vlastnosti z hľadiska šírenia svetelných signálov. Na obr. 3c sú nakreslené všetky možné priebehy svetelných lúčov v jadre takéhoto optovodu. Z obrázku je vidno, že lúč, ktorý nedosiahne hranice jadra, sa šíri periodicky. Lúč, ktorý dosiahne hranice jadra, sa buď láme späť do jadra, keď je splnená podmienka pre úplný odraz na hranici jadro-plášť, alebo uniká do vonkajšieho priestoru. Teda môžeme povedať, že pri šírení svetelnej energie v GI optovodoch vznikajú jadrové, lomené a priestorové vlny. Teda z toho čo bolo uvedené, vyplýva, že v prípade

GI vlnovodov pokiaľ sú splnené hore uvedené podmienky, môžeme použiť zákony geometrickej optiky.

Pre dráhu lúča s premenným indexom lomu platí diferenciálna rovnica

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \text{grad}(n) \quad (2.36)$$

kde $\vec{r}$ - je rádius vektor bodu na dráhe lúča, ds - je element dráhy pozri obr. 14



Obr.13

Keď je rozloženie indexu lomu osovo symetrické, je $\text{grad } n$ vyjadrený ako derivácia n podľa súradnice v smere zmeny indexu lomu (v našom prípade x).

Podľa obr. 14 je

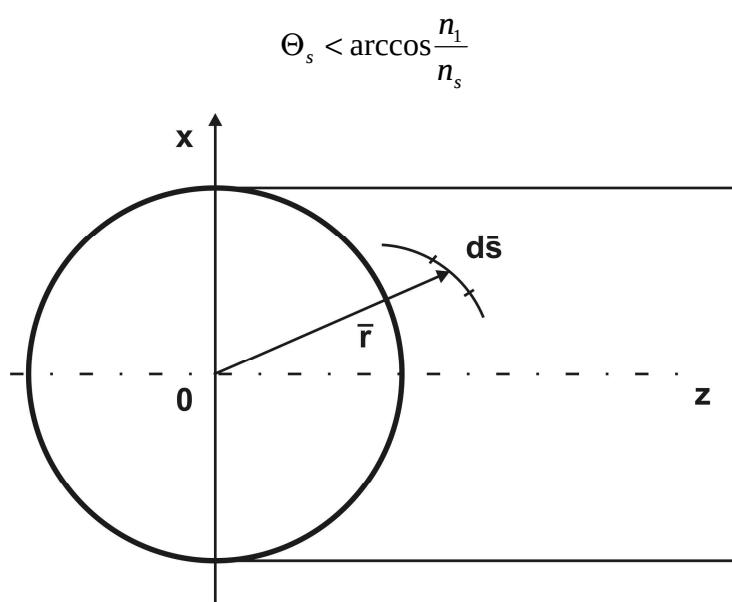
$$|\text{grad } n| = \frac{dn}{dx} \quad (2.37)$$

Aj v prípade GI vlákna platí lokálne Snellov zákon lomu lúčov

$$n_x \cos \Theta_x = n_s \cos \Theta_s \quad (2.38)$$

kde n_x je index lomu v ľubovoľnom mieste dráhy lúča so súradnicou x . Z toho teda vyplýva, že zložka vlnového vektora v smere osi z $\bar{k}_z$, t.j. $b = nk \cos \Theta$ zostáva konštantná.

Keď platí nerovnosť (pozri obr. 13)



Obr. 14

bude sa lúč šíriť periodicky.

Pre lomené lúče platia nerovnosti

$$\arccos \frac{n_1}{n_s} < \Theta_s < \arccos \frac{n_2}{n_1}$$

kde n_2 je index lomu plášťa.

Pre priestorové vlny platí nerovnosť

$$\Theta_s > \arccos \frac{n_2}{n_s}$$

Je zrejmé, že lomené a priestorové vlny zhoršujú prenosové vlastnosti optovodu. Preto je snaha vybudovať len jadrové vlny. To však kladie nároky na vyžarovací smerový diagram zdroja svetla. Aj v tomto prípade musí platiť, že

$$\Delta n = n_s - n_1 \ll 1$$

Pri tejto podmienke sú uhly Θ jadrových vln veľmi malé.

Počet prenášaných módov v GI vlákne je konečný (bližšie pozri [5]).

$$N_g = \frac{1}{2} \left(\frac{2p}{l_0} r_1 n_s \right)^2 \Delta$$

kde $\Delta = \frac{n_s - n_1}{n_s}$, a pomer $\frac{N_k}{N_g} \nabla^2$, $N_k = \frac{1}{2} V^2$ je počet šíriacich sa módov v SI optovode.

Keď teda pre oba vlnovody sú Δ a r_1 rovnaké pre to isté λ_0 je počet šíriacich sa módov v GI polovičný. Keďže počet šíriacich sa módov v GI optovode je obmedzený, potom maximálne skupinové oneskorenie dá sa vyjadriť

$$t_{sk} \nabla \frac{L}{C} n_s \left(1 + \frac{\Delta^2}{2} \right)$$

$$t_{sk} \nabla \frac{L}{C} n_s$$

a rozdiel

$$\Delta t_G = t_{sk_{\max}} - t_{sk_{\min}} = \frac{L}{C} \frac{n_s}{2} \Delta^2 \quad (2.39)$$

v porovnaní s $\Delta t_{\max} \nabla \frac{L}{C} n_1 \Delta$, ktoré platí pre SI vlnovody v prípade, že $V \gg 2$ je

$$\Delta t_G < \Delta t_{\max l}, \text{ lebo } \Delta \ll 1 \text{ a } \Delta \ll \Delta^2$$

Keď je teda pre oba typy optovodov Δn a r_1 rovnaké, potom pre tú istú vlnovú dĺžku sa šíri gradientným optovodom polovica módov oproti vlnovodu s konštantným indexom l ornú. Ako už bolo spomenuté je rozptyl skupinového oneskorenia v gradientnom optovode omnoho menší oproti vlnovodu s konštantným indexom l ornú. Túto výhodnú vlastnosť gradientného optovodu možno vysvetliť tým, že napríklad meridiánový lúč, ktorý sa šíri pod väčším uhlom má vzhľadom k osi vlnovodu menšiu rýchlosť, ale pri prechode do opticky redšieho prostredia jeho rýchlosť vzrastie oproti lúču, ktorý sa šíri pod malým uhlom vzhľadom k osi vlnovodu. Hoci teda prvý lúč má skutočnú dráhu dlhšiu ako paraxiálny, líši sa celková doba oboch lúčov veľmi málo.

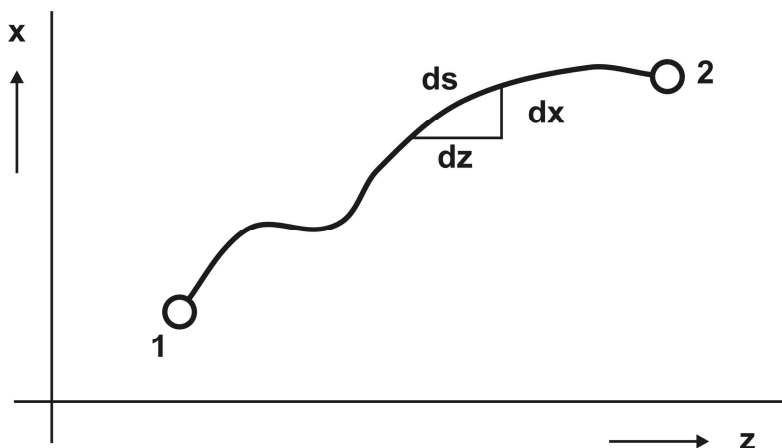
Pre dráhu lúčov GI optovodov platí (2.36). Podľa Fermatovho princípu lúč v nehomogénnom optickom prostredí sa šíri medzi bodmi 1-2 (pozri obr. 15) tak, aby dosiahol bod 2 z bodu 1 za

minimálnu dobu

$$t = \frac{1}{c} \int_1^2 n ds \quad (2.40)$$

c - je rýchlosť svetla vo vákuu

n - optická hustota v elementárnom úseku dráhy ds



Obr. 15

Požadujeme, aby t z rovnice (2.40) bola minimálna. Teda aj optická dráha medzi bodmi 1 a 2

$$L = \int_1^2 n ds \quad (2.41)$$

musí byť minimálna.

Časový rozptyl Δt_G dosahuje pri týchto vláknoch hodnoty okolo 1 ns/km. Z nižšej hodnoty časového rozptylu vyplývajú aj vhodnejšie vlastnosti na prenos informácií, takže s vláknami tohto typu sa ráta pre prenos až za hodnotu Gbit/s.

3. Tlmenie optických vlákien

Tlmenie vlákien je jeden z obmedzujúcich faktorov optického spoja (bez použitia opakovača), spoľahlivosti a veľkosti prenášaného kmitočtu. K tlmeniu vlákna prispievajú:

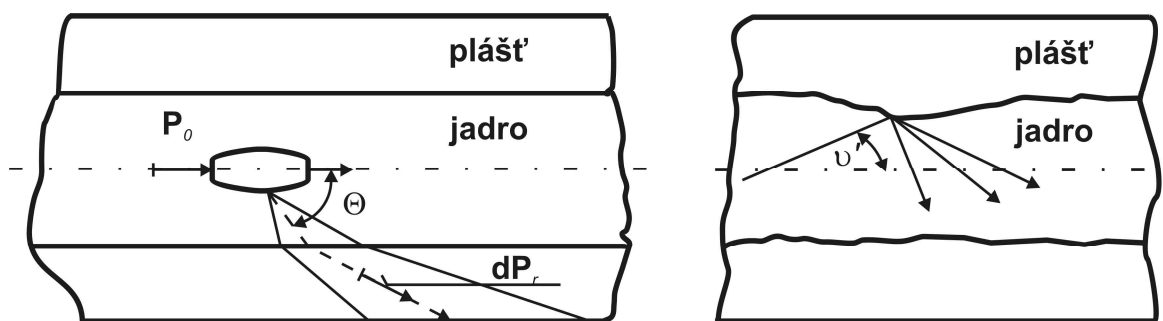
- a) odrazové (Fresnelove) straty na vstupnom a výstupnom priereze vlákna,
- b) straty zapríčinené pohlcovaním (absorbciou) v materiáli vlákna,
- c) straty dané rozptylom žiarenia na nehomogenitách materiálu jadra a na geometrických nedokonalostiach rozhrania jadra a plášťa vlákna,

d) straty zakrivením optického vlákna.

Podľa Fresnelových vzťahov možno ukázať, aká časť svetelnej energie pri prechode rozhraním dvoch prostredí s rôznym indexom lomu ním prejde, resp. sa odrazí. Túto veličinu udávajú v závislosti od uhla dopadu, a to pre zložku polarizovanú jednak kolmo jednak rovnobežne s rovinou dopadu (tieto straty sa pohybujú v medziach 0,4 až 0,6 dB).

Straty pohltením v materiáli jadra sú nepravidelne kmitočtovo závislé, ako vidieť na obr. 4, kde sa výrazne uplatňujú straty na rezonančných kmitočtoch vody v okolí $\lambda = 950 \text{ nm}$ (tlmenie 1 dB/km spôsobí 1250 častíc iónov OH^- v 10^{-9} častíc skla) a ostatných nečistôt základného materiálu vlákna (tlmenie 1 dB/km spôsobí napr. $2,5$ častíc iónu Cu^{2+} v 10^{-9} častíc skla). Takto stratená energia sa mení na energiu tepelnú.

Vplyvom rozptylu svetelnej energie na nehomogenitách materiálu jadra (obr. 16a) sa časť svetelnej energie dostáva do plášťa vlákna, kde musí byť dokonale absorbovaná. Z tejto požiadavky vyplýva podmienka, aby tlmenie plášťa bolo mnohonásobne väčšie ako tlmenie jadra.



Obr. 16a,b

Pri rozptyle žiarenia na nedokonalostiach rozhrania jadra a plášťa (obr. 16b) budú straty závislé od počtu odrazov zväzku lúčov vo vlákne.

Straty vplyvom zakrivenia optického vlákna netreba v praxi uvažovať, pretože pri polomeroch ohybu optických káblov väčších ako $50 \pm 100 \text{ mm}$ sú tieto straty oproti predchádzajúcim zanedbateľné.

Prvé optické vlákna mali tlmenie väčšie ako 1000 dB/km. Vďaka technologickému pokroku majú súčasné komerčné vlákna tlmenia 5 dB/km, laboratórne sa dosahuje tlmenie okolo 1 dB/km, čo sa dosiahlo znížením vplyvu jednotlivých prímiesí

v skle. Spodnú hranicu tlmenie svetlovodov určujú pri krátkych vlnových dĺžkach

Rayleighove straty rozptylom (množstvo rozptýleného svetla závisí od vlnovej dĺžky a hustoty prostredia) a pri väčších vlnových dĺžkach (ako sa už spomenulo) absorbné straty na rezonančných kmitočtoch vody a ostatných nečistôt základného materiálu vlákna.

Vo sveta je už pomerne veľký počet tratí so svetlovodmi a stále sa vyvíjajú dokonalejšie svetlovody. Tak napr. japonská firma NTT informuje o vývoji optického vlákna s kremíkovým jadrom (SiO_2) legovaným GeO_2 a s plášťom z SiO_2 (pozri krivka a v obr. 4). Priemer vlákna je po celej jeho dĺžke $125 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, priemer vlastného jadra je $9,4 \mu\text{m}$. Čistota materiálu 99,9999 %, rozdiel indexov lomu a plášťa $n_1 - n_2 = 0,0028$. Toto vlákno má merné tlmenie 0,2 dB/km pri vlnovej dĺžke $1,55 \mu\text{m}$, čo je už na hranici teoretických možností.

3.1 Presluch medzi súbežnými optickými vláknami

Žiarivá energia prichádzajúca do vlákna môže prechádzať do okolia vlákna, keď nie je splnená podmienka úplného odrazu (2.10), (2.11). Tento prípad môže nastať v blízkosti miesta, v ktorom vstupuje žiarivá energia do vlákna a ďalej v miestach ohybu s malým polomerom. K väzbe medzi jednotlivými vláknami dochádza tiež vtedy, keď sa svetelná energia nešíri len jadrom, ale sčasti i plášťom (v prípade, že plášte oboch svetlovodov nie sú odtienené, môže nastať presluch).

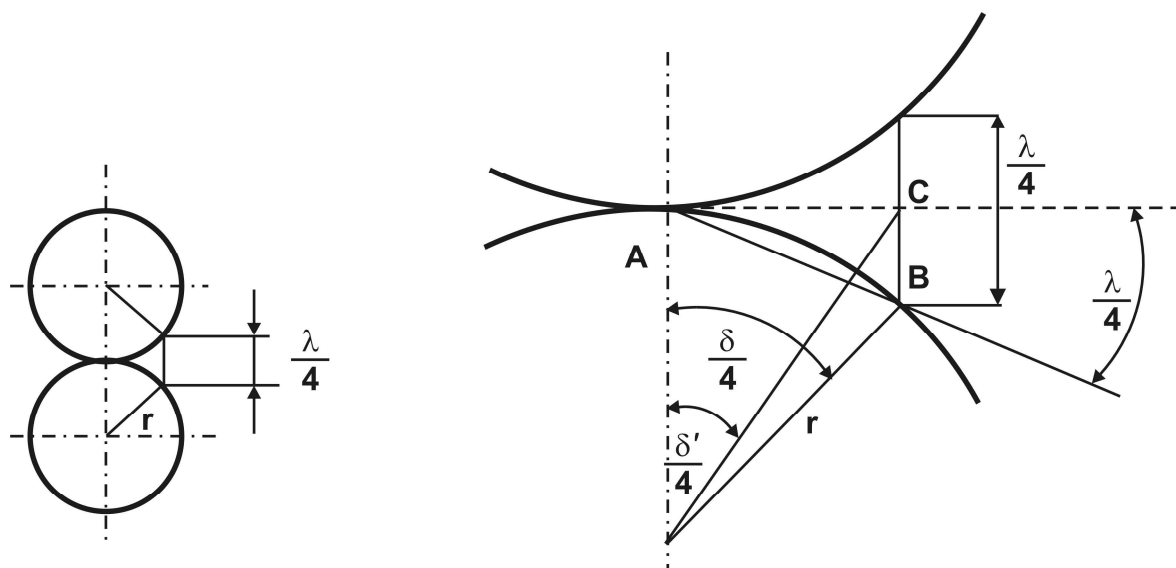
Z výpočtu i overovacích meraní vyplýva, že úroveň prenikajúcej energie klesá veľmi rýchle s hĺbkou vzniku a je zoslabená viac ako 10^{-3} pôvodnej hodnoty už v hĺbke rovnjej $\frac{l}{4}$. Pri dotyku susedných vlákien polomeru r možno teda vymedziť pásmo, z ktorého môže preniknúť žiarivá energia z vlákna do vlákna, keď nestúpne vzdialenosť oboch povrchov

na vyše $\lambda/4$. Podľa obr. 17 zo zjednodušených vzťahov:

$$d \approx d'; \quad AC \approx r \frac{d'}{2}; \quad BC = AC \frac{d'}{4}; \quad \frac{l}{4} = 2 BC = r \frac{d'}{2} \frac{d'}{2} \quad (3.1)$$

platí

$$d = \sqrt{\frac{l}{r}} \quad (3.2)$$



Obr. 17

V prípade, že vlákno je obklopené ďalšími šiestimi vláknami vo zväzku (najnepriaznivejší prípad), potom všetka prenikajúca energia je úmerná :

$$x = \frac{6d}{2p} = \frac{3}{p} \sqrt{\frac{l}{r}} \quad (3.3)$$

Z výrazov (3.2) a (3.3) vyplýva závislosť prenikajúcej energie od pomeru λ/r .

Aby sa znížilo prenikanie energie, plášť sa vyrába z materiálu pohlcujúceho prenikajúce žiarenie, alebo sa obalí nepriepustným materiálom.

Pre optické komunikácie na väčšie vzdialenosti prebiehajú vlákna v kábli vedľa seba na veľkej dĺžke, a preto i nepatrné prenikanie môže spôsobiť neprípustne veľký presluch (je priamo úmerný druhej mocnine spoločnej dĺžky). Preto technológiu výroby svetlovodných káblov treba, prispôbiť tak, aby presluch medzi jednotlivými vláknami v kábli bol zanedbateľný.

3.2 Paralelný prenos súbežnými optickými vláknami

Paralelný prenos pomocou vláknového zväzku sa používa tam, kde sa musí zabezpečiť vysoká spoľahlivosť spojenia a kde prípadné porušenie jedného vlákna nesmie prerušiť spojenie. Zväzky vlákien môžu prenášať väčšiu energiu, ktorá do nich vstupuje a vystupuje z meničov, neprispôbienených prevádzke s jedným vláknom.

Zväzok vlákien možno usporiadať dvojako: buď (častejší prípad) zväzok tvoria tri vlákna,

takže spojnicou ich stredov je trojuholník, alebo zväzok tvoria štyri vlákna a spojnicou ich stredov tvorí štvorec. Keď plocha, ktorú zaberá zväzok vlákien, je väčšia ako súčet plôch jednotlivých vlákien, časť žiarivej energie dopadajúcej na zväzok nie je využitá. Pre bezplášťové vlákna môžeme túto účinnosť vyjadriť súčiniteľom, ktorého hodnota je pre trojuholníkové usporiadanie

$$k_{\Delta} \nabla 0,91$$

a pre štvorcové usporiadanie

$$k_{\square} \nabla 0,79$$

Pre vlákna s plášťom je využitie energie ešte nižšie, a to v pomere

$$\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

Keď označíme energiu, ktorá vnikla do zväzku k energii, ktorá naň dopadá ako κ , potom pre takto vznikajúce tlmenie platí :

$$A_k = 10 \log \frac{1}{k}$$

a podľa; usporiadania vlákien vo zväzku κ možno vypočítať z výrazu

$$k = k_{\Delta} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \text{ alebo } k = k_{\square} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (3.5)$$

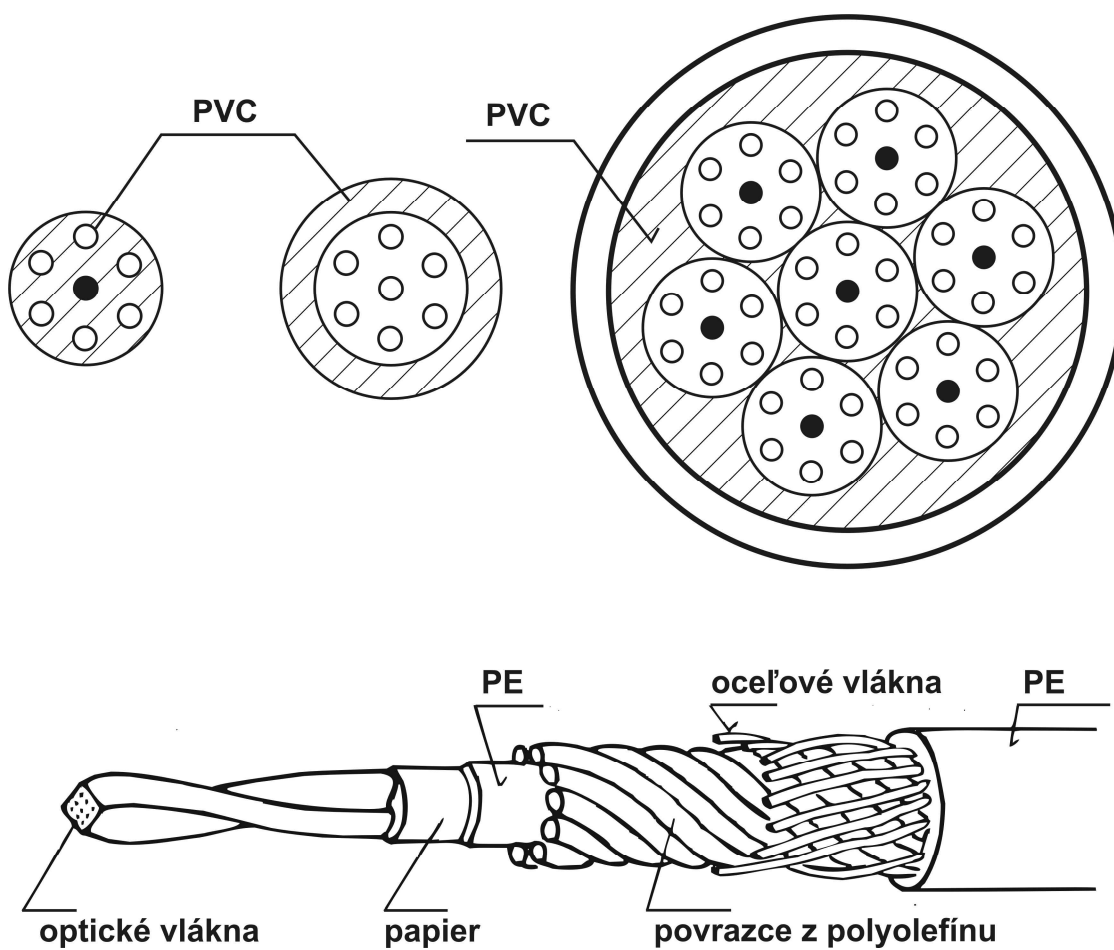
Veľkosť tlmenia sa pohybuje medzi 2 až 3 dB.

4. Káble s optickými vláknami

Pevnosť optických vlákien je vzhľadom na ich malý priemer nízka, preto sa obaľujú plášťom B umelej hmoty, čím vznikajú žily priemeru cca 1 mm.

Z takýchto žíl možno zostavovať káble. Konštrukcia káblov musí chrániť vlákna proti mechanickému poškodeniu, vonkajšiemu vplyvu prípadne vzájomne izolovať, aby sa znížil presluch medzi nimi. Na obr. 18 sú rôzne druhy usporiadania

Vlákna alebo zväzky sú uložené zväčša v mäkkenej plastickej hmote (PVC) a spevňujúcu funkciu káblov zabezpečujú kovové vlákna, plášte z tvrdených plastických hmôt, prípadne panciere a pod.



Obr. 18 Konštrukčné usporiadanie vlákien na rôznych typoch optokáblov

Hmotnosť svetlovodného kábla je prakticky určená len hmotnosťou plastických obalov, prípadne panciera a je teda podstatne menšia ako klasických káblov s kovovými vodičmi.

Nízka hmotnosť a dobré mechanické vlastnosti vlákien umožňujú vyrábať dĺžky 1 až 2 km. V každom kábli je potrebný aspoň jeden pár s kovovými jadrami pre diaľkové napájanie priebežných opakovačov, prípadne zosilňovačov.

Problémom je konštrukcia spojok, ktorých tlmenie by malo byť menšie ako 0,5 dB. Požiadavky na spájanie optických vlákien sú vysoké a rastú s klesajúcim priemerom jadra vlákna. Aby nedochádzalo k stratám energie, mali by spájané vlákna ležať v jednej spoločnej osi, a to v úzkom kontakte oboch vstupných stýkajúcich plôch, ktorých povrch musí byť opticky upravený. Odchýlkam prakticky nemožno zabrániť. Závadou je príliš veľká vzdialenosť oboch spájaných vlákien, ich stranový posuv (nesúhlas oboch osí) a vzájomný uhlový sklon oboch osí. V prípade vzájomného natočenia oboch osí vznikajú nielen energetické straty, ale aj nepriaznivé prerozdelenie módov, lebo sklonom sú "podporované" módy s vyšším sklonom, ktoré zhoršujú časové parametre a rýchlosť prenosu. Navyše sú tieto

módy vystavené v ohyboch vlákna väčšiemu riziku prípadných strát. Zdrojom strát môžu byť aj nedokonale opracované vstupné plochy vlákna (nedostatok kolmosti na os, matný povrch).

Ďalší závažný problém je pripojovanie optických vlákien k zdrojom a detektorom žiarenia.

Z uvedeného vyplýva, že mechanické požiadavky na spojovanie optických vlákien sú veľmi vysoké a tolerancie sa pohybujú okolo tisícín mm.

5. Optoelektronická prenosové systémy

Použitie optoelektronických systémov v telekomunikačnej sieti je podmienené ich kompatibilitou s už existujúcimi telekomunikačnými zariadeniami. Preto treba, aby vstupy a výstupy optických častí trás boli na úrovni TTL (Transistor - Transistor Logic), prípadne ECL (Emitter Coupled Transistor Logic), integrovaných logických obvodov. V prípade využitia optických spojov v telefónnej prevádzke je potrebná nadväznosť na multiplexné súbory (najmä s prenosom PGM), ktoré umožňujú zakódovať a združovať telefónne kanály do veľkokapacitných skupín, napr. kvartálnych (139,264 Mbit/s), prípadne vyšších.

Je však predpoklad, že v budúcnosti sa budú používať zariadenia vytvorené formou integrovanej optiky, ktorá by umožňovala spracovať signál úplne v optickej forme.

Zavádzanie systémov s vláknovými vlnovodmi je podporované súčasnými (a v budúcnosti predpokladanými) vlastnosťami základných dielov tvoriacich prvky optickej časti prenosových trás: nízke tlmenie $< 1 \text{ dB/km}$, materiálová disperzia $< 0,1 \text{ ns/km}$, dostatočná životnosť základných optických zdrojov, t.j. laserov a LED diód $> 10000 \text{ h}$ a ich modulačné možnosti $> 1 \text{ Gbit/s}$, prenosové bitové rýchlosti $> 1 \text{ Gbit/s}$, vzdialenosť medzi opakovacími zosilňovačmi $\gg 1,55 \text{ km}$. (Vzdialenosť 1,55 km je typická maximálna vzdialenosť pre systémy s koaxiálnymi káblami.)

Použitie novej technológie vedie k revízii súčasných koncepcií telekomunikačných systémov a k zavádzaniu integrovaných telekomunikačných sietí. Integrácia je umožnená uvedenými širokopásmovými schopnosťami vláknových vlnovodov, to znamená, že po jednom optickom vlákne dajú sa súčasne preniesť k jednotlivým abonentom ako hovorové, tak i obrazové a dátové signály. Je samozrejmé, že pre takéto kombinované prenosy je najvhodnejší prenosový systém PGM, lebo týmto systémom možno realizovať prenos všetkých uvedených druhov signálov v podstate technickými prostriedkami. Rozdiely sú najmä v šírke pásma jednotlivých typov signálov.

Ďalšou výhodou využitia optických vlnovodov je podstatná úspora úzkoprofilového materiálu, medi. Pre ilustráciu uveďme, že na jeden kilometer dĺžky spoja je pri použití medeného dvojvodiča priemeru 0,6 mm potrebné

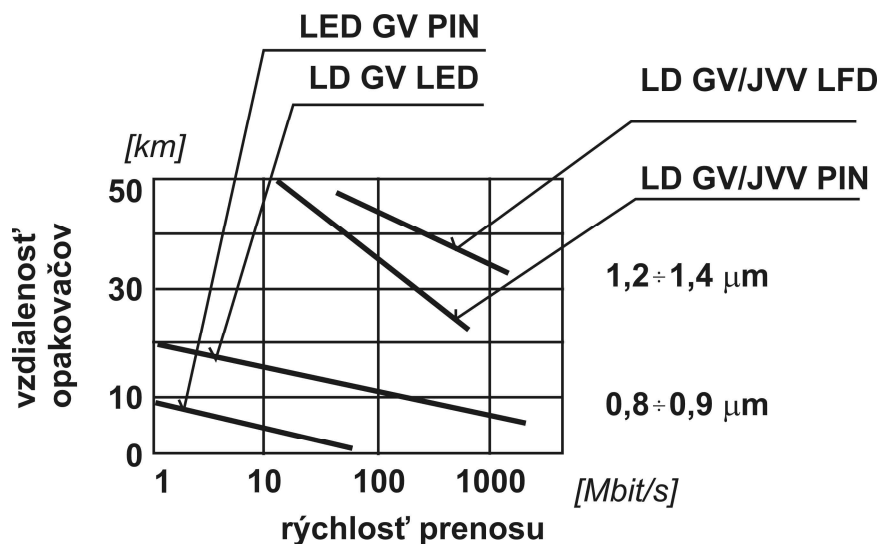
$$2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho_{Cu} = 5 \text{ kg medi}$$

kde $r = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $l = 10^3 \text{ m}$, $\rho_{Cu} = 8930 \text{ kg/m}^3$ je špecifická hustota medi.

Pri použití skleneného kremíkového vlákna priemeru $50 \mu\text{m}$ ako vlnovodu je naproti tomu spotreba $2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho_{SiO_2} = 5 \text{ g/km}$ skleneného vlákna, kde $\rho_{SiO_2} = 2600 \text{ kg/m}^3$ je hustota skla SiO_2 .

Keď si uvedomíme, že súčasná koncepcia stavby telekomunikačných sietí je hviezdicového tvaru, t.j. každý účastník má svoj prívod z ústredne, je zrejmé, aká úspora medi sa tým dosiahne. V budúcnosti treba pritom ešte rátať s budovaním siete káblovej televízie, prípadne siete videotelefónu (obrazového telefónu).

Pre ďalšie úvahy uvedieme najprv názorný diagram, ktorý udáva predpokladané realizačné možnosti pre optické kanály v pásme $0,8 - 0,9 \mu\text{m}$ a v pásme $1,2 - 1,4 \mu\text{m}$, pozri obr. 19. Ako parametre pri jednotlivých čiarach v diagrame sú uvedené rôzne kombinačné možnosti optických prvkov, t. j. vlnovodov, svetelných zdrojov a detektorov.



Obr. 19 , kde LD je laserová dióda, LED - svetlo-emitujúca dióda, LFD - lavínová fotodióda, PIN - pin dióda, GV - gradientné vlákno, JVV- jednovidové vlákno.

Pre ilustráciu prenosových možností budúcich optických systémov možno uviesť, aký vysoký

stupeň možno dosiahnuť v počte kanálov v systéme.

Na digitálny prenos jedného hovorového kanála treba podľa

odporúčaní CCITT rezervovať prenosovú rýchlosť 64 kbit/s. V káblových systémoch s frekvenčným delením kanálov (FDM) možno preniesť po jednom páre koaxiálneho kábla 10 800 tf hovorov. Na to je potrebná v prípade použitia optického kanála prenosová rýchlosť

$$10\,800 \cdot 64 \cdot 10^3 = 0,7 \text{ Gbit/s}$$

Pre takéto rýchlosti treba podľa obr. 19 použiť laserovú diódu. Experimentálne sa dokázalo, že laserové polovodičové diódy možno modulovať rýchlosťami až 2,3 Gbit/s a pri uvážení minimálnej disperzie dajú sa realizovať rýchlosti prenosu až 2 Gbit/s, potom je reálna predstava o uskutočnení prenosu asi 1,4 Gbit/s. Pritom ale (obr. 19) dá sa dosiahnuť kombináciou prvkov LD, LFD a GV vzdialenosť medzi opakovacími zosilňovačmi (regenerátormi) asi 4km, čo je dĺžka väčšia ako uvádzaná vzdialenosť zosilňovacích úsekov pre FDM systém s koaxiálnym káblom.

Pre kvalitný obraz farebnej televízie je potrebná prenosová rýchlosť 64 Mbit/s. Takáto rýchlosť sa dá dosiahnuť pri v súčasnosti existujúcich prvkoch a do vzdialenosti až 5 km medzi opakovacími zosilňovačmi, pri prijateľných nákladoch na kódovanie zariadenie. Možno teda napr. prenášať súčasne telefónny hovor a televízny obraz, pritom na každý tisíci dvojkový znak obrazu prípadne jeden dvojkový znak hovorového kanála.

V takomto usporiadanom systéme má teda účastník možnosť voľby televízneho programu priamo po telefóne. Sieť káblovej televízie je takto pre abonenta prakticky bezplatná. Podobne sa dá po tej istej sieti prenášať farebný alebo čiernobiely obraz videotelefónu. Pre čiernobiely obraz videotelefónu s televíznou kvalitou treba mať k dispozícii rýchlosť prenosu 40 – 48 Mbit/s, keď je použitá delta modulácia.

Možno teda zhrnúť, že pri použití PCM modulácie, pri rýchlosti 64 Mbit/s pre kanál obrazu farebnej televízie a pri rýchlosti 64 kbit/s pre hovorový kanál dá sa pri prie-priepustnosti kanála 1,4 Gbit/s prenášať súčasne buď 20 videosignálov, alebo 20 000 hovorov.

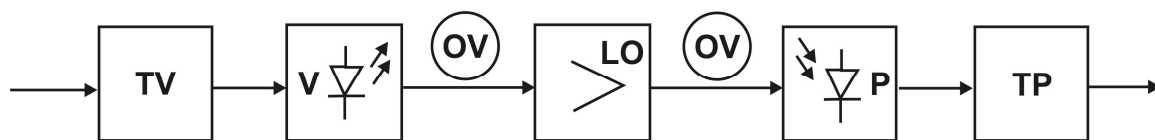
Treba pamätať, že vo všeobecnosti možno realizovať systémy aj s inými druhmi modulácie, ako je PCM. Avšak vzhľadom na modulačné charakteristiky svetelných zdrojov, ktoré sú lineárne len vo veľmi malom rozsahu modulačných prúdov, a vzhľadom na vlastnosti tlmenia a disperzie vlnovodov, možno použiť analógové modulácie na väčšie vzdialenosti len s obmedzenou kvalitou, alebo na kratšie vzdialenosti bez potreby obnoviť tvar signálu. Pritom

však analógová modulácia realizovaná priamo pomocou budiaceho prúdu je veľmi jednoduchá a lacná. Ďalšou možnosťou je amplitúdová modulácia svetla pomocou polarizačných filtrov a materiálov s riadenou polarizáciou, ako je napr. Kerrov článok. Tieto metódy sú pre potreby telekomunikačných systémov príliš nákladné a technicky náročné. Ďalšie možnosti sú napr. použiť PPM (pulzne polohová modulácia) alebo PFM (pulzne frekvenčná modulácia.)

Vzhľadom na doteraz uvedené môžeme povedať, že perspektívne kmitočtové oblasti, použiteľné pre optické prenosové trasy, sú v pásme $0,8 - 0,9\mu\text{m}$, ďalej v oblasti

$1,0 - 1,2\mu\text{m}$ (špeciálne $1,09 < \mu\text{m}$) a konečne $1,2 - 1,4\mu\text{m}$ (špeciálne $1,27\mu\text{m}$). Tieto pásma sú určované jednak vzhľadom na výskyt lokálneho minima tlmenia, jednak na minimum materiálovej disperzie okolo vlnovej dĺžky $1,27\mu\text{m}$. Pre jednotlivé oblasti treba však mať k dispozícii príslušné svetelné zdroje a dostatočne citlivé detektory.

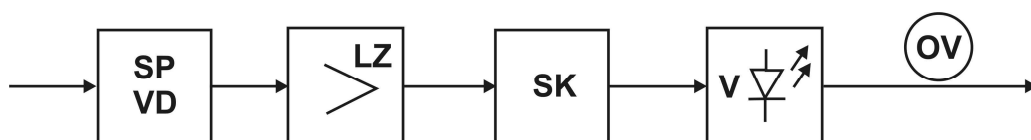
Bloková schéma telekomunikačného systému, ktorého prenosová časť je realizovaná formou optickej trasy, je na obr. 20.



Obr. 20 Blokovaná schéma optického prenosového systému, kde TV je terminál na vysielacej strane, V - optický vysielateľ, OV - optický linkový vlnovod, LO - linkový opakovací zosilňovač, P - optický prijímač (detektor), TP - terminál na prijímacej strane.

Príklad blokového usporiadania terminálu na vysielacej strane je uvedený na obr. 21.

Úlohou linkového zosilňovača je regenerácia signálov vytvorených predchádzajúcimi stupňami digitálneho systému,

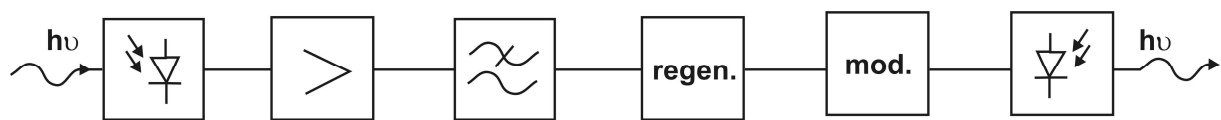


Obr. 21 Blokovaná schéma vysielacieho terminálu, kde SP je zvierkové pole, VD - vidlica, LZ - linkový zosilňovač, SK - skrambler.

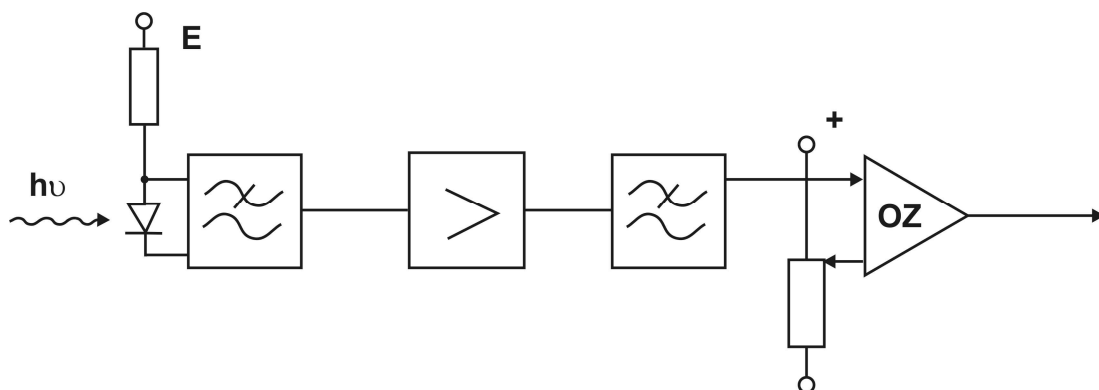
Regeneráciou sa odstránia vplyvy tlmenia a disperzia spôsobenej prepojovaním v ústrední. Ak sa v predchádzajúcich blokoch použije pseudoternárny tvar signálu, potom tento zosilňovač mení tvar na unipolárny.

Úlohou opakovacích zosilňovačov je zosilniť a obnoviť pôvodný tvar prenášaných signálov, napr. impulzov. Môžu byť konštruované ako elektronické alebo optické. Na elektronických opakovacích zosilňovačoch dochádza ku konverzii optických signálov na elektrické a po spracovaní sú opäť transformované na optické signály pomocou modulácie nasledujúceho svetelného zdroja. Optické zosilňovače zosilňujú a tvarovo upravujú priamo optické signály. Bloková schéma elektronického opakovacieho zosilňovača je na obr. 22.

Bloková schéma prijímača (pre systém PCM) je uvedená na obr. 23. Ide o prijímač s priamym zosilnením (používajú sa aj superheterodynné zosilňovače).



Obr. 22 , Bloková schéma elektronického opakovacieho zosilňovača



Obr. 23 Bloková schéma prijímacieho terminálu

Na vstupe prijímača, ktorý je viazaný na výstup optického vlnovodu, je fotodetektor. Prakticky prichádzajú do úvahy p-i-n diódy alebo lavínové fotodiódy. Za detektorom je umiestnený vstupný zosilňovač prijímača, ktorý svojimi vlastnosťami podstatne určuje kvalitu celého prijímača, lebo pracuje v oblasti slabých signálov, pomerne silne rušených šumom. Preto sa na dosiahnutie optimálnych vlastností zaraďuje za vstupný zosilňovač filter, ktorý upravuje tvar signálu tak, aby sa v ďalších stupňoch prijímača dalo ľahšie rozhodnúť, či

vstupný signál v danom okamihu reprezentuje jednotku alebo nulu binárneho kódu. Za filtrom potom nasleduje rozhodovací blok, tzv. komparátor.

5.1 Linkový opakovač

Maximálny dosah prenosovej cesty, tak ako je to aj u iných druhov prenosových systémov je určený:

- a) svetelným výkonom, resp. energiou impulzov vysielača
- b) tlmením a skreslením prenášaných impulzov
- c) citlivosťou prijímača.

Na preklopenie veľkých vzdialeností je potrebné rozdeliť celú trasu na kratšie úseky a medzi ne vložiť linkový opakovač LO.

Linkové opakovače v optokomunikačných systémoch môžu byť konštruované ako:

- 1.) optoelektronické
- 2.) optické

V optoelektronických opakovačoch dochádza ku konverzii optických signálov na elektrické a po spracovaní opäť na optické. Bloková schéma takéhoto typu zosilňovača bola uvedená na obr.22. V súčasnosti sa v optických systémoch využíva tento typ opakovača. Optické opakovače priamo zosilňujú, tvarovo a časovo upravujú optické signály. Tieto typy opakovačov sú vo vývojovom štádiu.

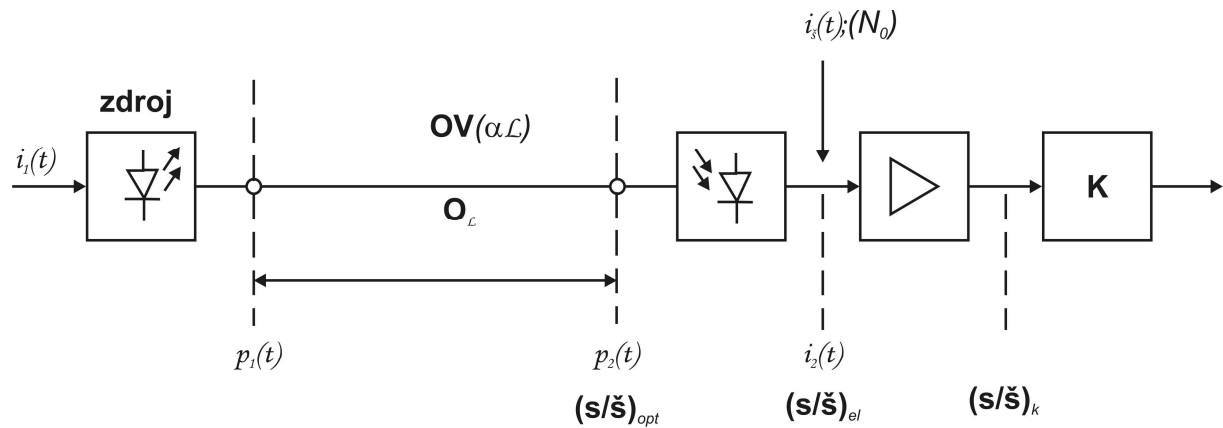
5.2 Vzdialenosť medzi linkovými opakovačmi

Vzdialenosť medzi LO je závislá na kvalite prenosu digitálnych signálov optickými vlnovodmi. Mierou kvality prenosu pri prenose digitálnych signálov môže byť chybovosť prijímaného signálu. Vzdialenosť medzi LO ovplyvňujú nasledovné parametre systému:

- 1.) druh vlnovodu (JMV,MMV,GV)
- 2.) straty vo vlnovode (tlmenie)
- 3.) optický výkon (vstupujúci do vlnovodu)
- 4.) šírka spektrálnej čiary zdroja svetla

5.) citlivosť a spektrálne vlastnosti prijímača

6.) použitý kód



Obr. 24

$i_1(t)$ - ekvivalentná hodnota prúdu užitočného signálu na vstupe optického zdroja

$p_1(t)$ - optický výkon na vstupe do optovodu

OV - optické vlákno

α - špecifické tlmenie OV

L - dĺžka OV