

# VOJENSKÁ AKADEMIA V LIPTOVSKOM MIKULÁŠI

---

Katedra telekomunikačných systémov

**mjr. Ing. Igor ČERNÁK, PhD.**

**pplk. Ing. Michal JENČO, PhD.**

## TELEKOMUNIKAČNÉ SIETE IV.

(Optokomunikačné systémy)

Skriptá

LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ

---

2000

© Ing. Igor ČERNÁK, PhD.

Ing. Michal JENČO, PhD.

---

Recenzenti : 1. Doc. Ing. Vladimír WIESER, CSc.

2. Ing. Roman PONEVÁČ

Za odbornú a jazykovú stránku týchto skrípt zodpovedajú autori. Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

ISBN 80 - 8040 - 137 - 3

# OBSAH

Obsah	3
ÚVOD	5
1 VZNIK A VÝVOJ OPTICKÝCH KOMUNIKÁCIÍ	6
1.1 Dve špecifické vlastnosti optoelektroniky	6
1.2 História a rozdelenie optoelektronických sústav	6
2 OPTICKÉ ŽIARENIE PRENÁŠA INFORMÁCIU	9
2.1 Čo je svetlo	9
2.1.1 Jednotky žiarenia	9
2.2 Optické žiarenie prenáša informáciu	10
2.3 Elektromagnetické spektrum	11
2.4 Bloková schéma optického spoja	14
2.5 Vplyv optického prostredia na parametre optického signálu	15
2.6 Geometrická optika	15
2.6.1 Odraz svetla	17
3 OPTICKÉ VLÁKNA	22
3.1 Typy optických vlákien	22
3.1.1 Šírenie svetla v optickom vlákne	22
3.1.2 Vlákna so skokovou zmenou indexu lomu	23
3.1.3 Vlákna s plynulou zmenou indexu lomu (gradientné)	29
3.2 Charakteristiky optických vlákien	32
3.2.1 Číselná (numerická) apertúra	32
3.2.2 Vázobné straty	34
3.2.3 Disperzia	40
3.2.4 Mechanické vplyvy	41
3.2.5 Porovnávanie charakteristík optických vlákien	42
3.3 Optické káble	47
3.4 Výstavba optických kábelových trás na Slovensku	50
4 ZDROJE A DETEKTORY OPTICKÉHO ŽIARENIA	55

4.1 Zdroje optického žiarenia	55
4.1.1 Polovodičové zdroje optického žiarenia	55
4.1.2 Spojenie LED – optické vlákno	59
4.1.3 Laserové diódy ILD (Injection Laser Diodes)	60
4.1.4 Konštrukcia a činnosť ILD	61
4.1.5 Použitie nevhodného zdroja a niektoré praktické poznatky	62
4.2 Detektory svetla	66
4.2.1 Fotodiódy PN	67
4.2.2 Fotodiódy PIN	71
4.2.3 Lavínové fotodiódy	72
4.2.4 Charakteristiky detektorov svetla	74
5 MULTIPLEXORY S VLNOVÝM DELENÍM	82
5.1 Multiplexor s vlnovým delením – WDM	82
5.2 Manažment systémov s vlnovým delením	88
6 MERANIE PARAMEROV OPTICKÝCH VLÁKIEN	92
6.1 Prenosové charakteristiky optických vlákien	92
6.2 Metódy merania tlmenia v optokomunikačných systémoch	95
6.3 Laboratórne cvičenie	99
7 PERSPEKTÍVY OPTICKEJ VLÁKNOVEJ KOMUNIKÁCIE	109
7.1 Výhody optických prenosových systémov	109
Použité skratky a symboly	112
Zoznam použitej literatúry	116

## ÚVOD

Napredovanie výpočtovej techniky mimoriadne ovplyvnilo rozvoj telekomunikácií. Narastajúcemu počtu zariadení zodpovedá väčší tok informácií, ktorý sa nepretržite mení v čase.

Rozvoj moderných technológií v oblasti spojovacích a prenosových zariadení na základe digitálneho spracovania a prenosu informácií prináša potrebu vytvoriť systém, ktorý zabezpečí univerzálne komunikačné prostredie pre rozvoj informatiky. Cieľom zavedenia nového komunikačného systému je zvýšenie informačnej priepustnosti, prevádzkovej spoľahlivosti a odolnosti spojenia. Základnou podmienkou pre naplnenie týchto náročných požiadaviek je dôsledný a systémový prechod od analógovej k digitálnej technológii. Objektívna nutnosť tejto zmeny je diktovaná technickými zmenami, masovým nasadzovaním výpočtovej techniky vyžadujúcim prenos a spracovanie informácií v dátovej forme, technologickými zmenami vo verejnej telekomunikačnej sieti, ako aj v privátnych sieťach. Výsledkom procesu budovania nového komunikačného systému by malo byť dosiahnutie jednotnej technologickej základne, ktorá vytvorí univerzálne prostredie pre spracovanie, prenos, ochranu a záznam všetkých foriem informácií, pričom optokomunikačné systémy môžu výrazne napomôcť v napĺňaní základných cieľov.

# 1 VZNIK A VÝVOJ OPTICKÝCH KOMUNIKÁCIÍ

Optokomunikačné systémy sa dajú považovať za nový smer pri spracovávaní a prenose informácií na hranici medzi optikou a elektronikou. Je to časť rádioelektroniky nazývaná OPTOELEKTRONIKA. Podstata optoelektroniky je vo vhodnom využití procesov premeny elektrických signálov na optické a optických na elektrické pri súčasnom využití akusticko – optických, optoelektronických a iných fyzikálnych javov a procesov.

## 1.1 Dve špecifické vlastnosti optoelektroniky

- 1) Na rozdiel od elektrického signálu sa optický vyznačuje dvoma priestorovými súradnicami, vzhľadom na to môže byť modulovaný nielen v čase, ale i v priestore. V dôsledku toho je optický zväzok z hľadiska prenosu informácií sústavou, ktorá je zložená z veľkého počtu navzájom spojených paralelných kanálov.
- 2) Nosiče signálu v optoelektronike sú elektricky neutrálne fotóny, čo spôsobuje izoláciu optickej väzby z čoho vyplývajú najmä tieto výhody:
  - účinná elektrická izolácia medzi vstupom a výstupom,
  - jednosmernosť spojenia (nedochádza k spätnému pôsobeniu výstupu na vstup),
  - nevyžadujú sa mechanické kontakty,
  - nevnáša sa kmitočtové obmedzenie,
  - neohraničuje sa miniaturizácia zariadení.

## 1.2 História a rozdelenie optoelektronických sústav

Začiatky prvých „optokomunikačných sústav“ sa odhadujú asi na 6. st. p. n. l. v starom Grécku, kde sa na prenos informácií používali ohňové a dymové signály, systémom releových staníc na vyvýšených miestach. Novodobé dejiny sa však zmieňujú, že v roku 1880 A. G. Bell sa pokúsil patentovať svetelný telefón, kde sa pokúšal preniesť zvukový signál prostredníctvom svetelného lúča na vzdialenosť 200 metrov. Tento pokus pre nedokonalosť

zrkadiel a selénových detektorov ešte nebol úspešný. V roku 1930 bol uskutočnený prvý úspešný laboratórny pokus prenosu obrazu optickým vláknom a až v roku 1956 bol po prvý krát použitý pojem vláknová optika - fiber optic (Kapany). Intenzívny rozvoj výskumu optickej komunikácie je zaznamenaný až po roku 1960 realizáciou lasera. Možnosť použitia sklenených optických vlákien je zaznamenaná až v roku 1966 najmä vo Francúzku (Kao) a Anglicku (Hockham).

Hlavné príčiny prečo sa v novodobých dejinách začína s reálnym využívaním optokomunikačných systémov až v druhej polovici dvadsiateho storočia:

- v začiatkoch boli veľké optické straty spôsobené tlmením (až 1000 dB/km), až metóda prípravy tzv. čistých skiel umožnila straty pod 5 dB/km (koaxiálny kábel má tlmenie asi 5 – 10 dB/km),
- veľké vložné tlmenie pri spájaní optických vlákien (až kvalitné lámačky a zvaračky optických vlákien umožnili prijateľné hodnoty tlmenia zvarov),
- veľmi neskoro boli realizované vhodné zdroje a detektory optického žiarenia.

#### **Rozdelenie optoelektronických sústav :**

- ◆ vyhľadávacie optoelektronické sústavy,
- ◆ navigačné a orientačné optoelektronické sústavy,
- ◆ rozpoznávacie a pamäťové systémy,
- ◆ špeciálne optoelektronické sústavy (vojenské účely),
- ◆ **sústavy pre prenos a zobrazovanie informácií.**

#### **Rozdelenie optoelektronických systémov pre prenos a zobrazovanie informácií**

1) **Optróny** sú jednoduché systémy na prenos signálov (analogových i číslicových).

Používajú sa hlavne tam, kde treba využiť najmä elektrickú izoláciu medzi vstupom a výstupom optrónu. Využitie hlavne v oblasti automatizácie a merania. Zapojenia niektorých typov optrónov sú uvedené v [2].

2) **Optické komunikačné systémy:**

- a) číslicové telekomunikačné systémy,
- b) analógové širokopásmové systémy (prenos video signálu),
- c) prenos údajov (prístrojové aplikácie, počítačové siete).

Optické komunikačné systémy ďalej delíme podľa spôsobu prenosu na:

- a) s prenosom voľným prostredím (vzduch, kozmické spoje),
- b) s prenosom svetlovodom (periodicky fókusujúce prvky, optické vlákna).

3) **Integrovaná optika**, sú to prvky zamerané na ovládanie optického lúča (prepínače, vychyľovanie, rozvetvovanie a pod.). A taktiež sú to prvky na spracovanie signálov v optickej oblasti (modulácia, zmiešavanie, filtrácia a podobne).



## 2 OPTICKÉ ŽIARENIE PRENÁŠA INFORMÁCIU

V súčasnosti je v odborných publikáciách vysvetľovaný pojem svetlo, ako tá časť optického spektra, ktorú vidíme voľným okom. Ostatné žiarenie v celom optickom spektre je nazývané optické žiarenie. Pre názornejšie pochopenie budeme napriek tomu v niektorých prípadoch používať všeobecný pojem svetlo chápaný, ako optické žiarenie.

### 2.1 Čo je svetlo

Sir Isaac Newton (1642 – 1727) a René Descartes (1596 – 1650) ako prvý prezentovali názor, že svetlo je prúd veľmi malých častíc, ktorému dnes hovoríme fotóny. Dnešné znalosti nie sú o veľa dokonalejšie. Vieme, že svetlo v sebe spája dve vlastnosti korpuskulárny charakter (prúd fotónov) a typické vlastnosti vlnenia. Tieto dve vlastnosti sú formami javov jednej a tej istej fyzikálnej reality. Šírenie svetla je v guľových vlnoplochách, tak ako pri elektromagnetickom žiarení, či šírení vln po vhození kameňa do vody.

Podľa kvantovej teórie má svetlo v priestore a čase nespojitý charakter. Žiariace teleso neemituje svetelnú energiu spojito, ale nespojito po malých dávkach (kvantách).

Najmenšie možné množstvo energie nazývame elementárnym kvantom a kvantá svetelnej energie nazývame fotóny. Sú to priestorovo sústredené množstvá energie elektromagnetického žiarenia, ktoré sa pohybujú rovnakou rýchlosťou ako svetlo v danom prostredí. Energia fotónov je nepriamo úmerná vlnovej dĺžke a udáva sa v jednotkách  $eV$  (elektrónvolt). Na porozumenie katalógových údajov sú uvádzané základné jednotky vzťahujúce sa ku žiareniu.

#### 2.1.1. Jednotky žiarenia

Medzi najdôležitejšie jednotky žiarenia v neviditeľnej oblasti spektra patria žiarivá energia, žiarivosť, intenzita ožiarenia, svietivosť a jas.

**Žiarivá energia** ( $We$ ), ktorá pri prechode nejakou plochou za jednotku času sa nazýva žiarivý tok  $\Phi_e$  a udáva sa vo wattoch. Pre ďalšie úvahy zavádzame pojem priestorového uhla  $\omega$ , ktorý je podielom  $S/r^2$ . Jeho jednotkou je  $1 sr$  (steradián).

**Žiarivosť** ( $I_e$ ) bodového zdroja je ďalšia dôležitá veličina. Je určená podielom  $\Phi_e/\omega$ . Jednotkou žiarivosti je  $W/sr$ , čo je výkon emitovaný žiarivým zdrojom do jednotkového priestorového uhla.

**Intenzita ožiarenia** –  $E_e$ . Je to podiel žiarivého toku  $\Delta\Phi_e$  dopadajúceho na plochu  $\Delta S$  na povrchu ožarovaného telesa a tejto plochy, za predpokladu, že plocha  $\Delta S$  je ožiarená bodovým zdrojom a je kolmá k osi žiarivého kužela, v ktorom na ňu dopadá žiarivý tok. Jednotkou je  $W/m^2$ .

Keďže ľudské oko reaguje na žiarenie rôznej farby s rôznou citlivosťou, tak určenie vlastností je zložitejšie. Najcitlivejšie je ľudské oko na zelenožlté svetlo s dĺžkou vlny 555 nm.

**Svietivosť** bola zavedená analogicky a je vyjadrená ako:  $I_v = \Delta\Phi_v / \Delta\omega$ . Jednotka sa nazýva kandela –  $cd$ . Svetelný tok je odvodená jednotka. Je určená svetelným tokom, ktorý do kužela s priestorovým uhlom  $1sr$  vysiela svetelný zdroj, ktorého svietivosť je vo všetkých smeroch rovná  $1cd$ .

**Osvetlenie** je podiel svetelného toku dopadajúceho na plochu  $\Delta S$  a tejto plochy:  $E_v = \Delta\Phi_v / \Delta S$ . Jednotka osvetlenia sa nazýva lux –  $lx$ .

**Jas** je dôležitá veličina, ktorá charakterizuje svietivosť plošného zdroja svetla. Jednotkou je  $lm/m^2$ .

Rýchlosť šírenia elektromagnetických vln je závislá na prostredí, ktorým sa vlny šíria. Svetlo v hmotnom prostredí sa šíri pomalšie ako vo vákuu.

## 2.2 Optické žiarenie prenáša informáciu

Najvyšší podiel na prijatých informáciách z okolitého sveta má pre človeka zo všetkých zmyslov (zrak, sluch, hmat, chuť, čuch) práve zrak. Človek prijíma z okolitého sveta až 100 krát viac informácií zrakom ako sluchom. Zrak je pasívny, to znamená že nedokáže svetlo vytvárať. To čo okolo seba vnímame je vonkajšie svetlo modulované našim okolím. Biele, rovnomerné, nemodulované svetlo je z informačného hľadiska bezcenné. Vyvoláva u človeka iba pocit jasu, nenesie žiadnu informáciu. Ak svetlo dopadá na predmet odrazí sa od neho a tým je modulované týmto predmetom. Intenzita odrazeného svetla sa väčšinou líši od okolia predmetu a ten sa nám javí ako jasnejší, alebo tmavší ako jeho okolie, čím vlastne

rozoznávame obrysy daného predmetu. Predmet však zároveň odráža jednu časť vlnového pásma bieleho svetla silnejšie, ako inú a tým sa nám javí predmet ako farebný. Oko môže rozlišovať nielen zmenu jasú (malý, alebo väčší svetelný výkon), ale navyše i jednotlivé vlnové dĺžky, alebo pásma vlnových dĺžok, ktorým priraduje farebný vnem. Z tohto je pre nás dôležité, že **úmyselná (cieľ'a vedomá) modulácia svetla predmetom je spôsobom prenosu optickej informácie.**

Oko síce dokáže analyzovať komplikované obrazy okolitého sveta, ale z technického pohľadu na oko, ako na prijímač optickej informácie veľmi skoro zistíme, že je príliš pomalé. Rýchlosť modulácie vnímanej okom je pre rýchly prenos informácií nevyhovujúca. Zmeny jasú registruje maximálne asi 16 krát za sekundu. Na tejto „nedokonalosti“ oka je založený princíp kinematografie. Preto pre praktickú detekciu sa používajú fotočlánky, alebo fotodiódy.

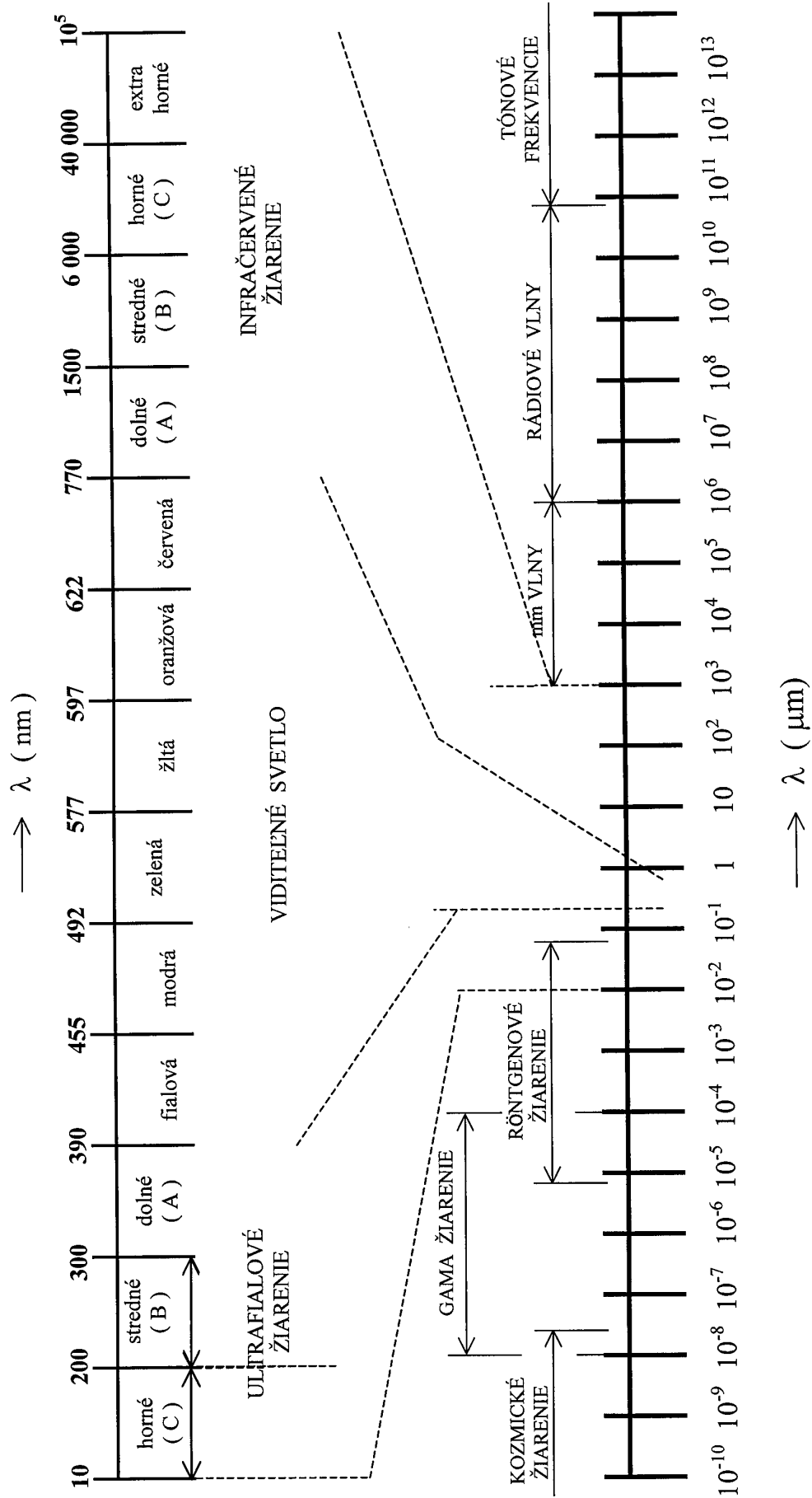
### 2.3 Elektromagnetické spektrum

Farba, vlnová dĺžka a frekvencia sú tri merítka jedného parametru. Vlnová dĺžka je vzdialenosť dvoch kladných alebo záporných maxím sledov kmitov a je tým kratšia, čím viac kmitov vznikne za sekundu. Súčiniteľom úmernosti je rýchlosť šírenia vlny ( $c = 300000$  km/s). Potom platí:

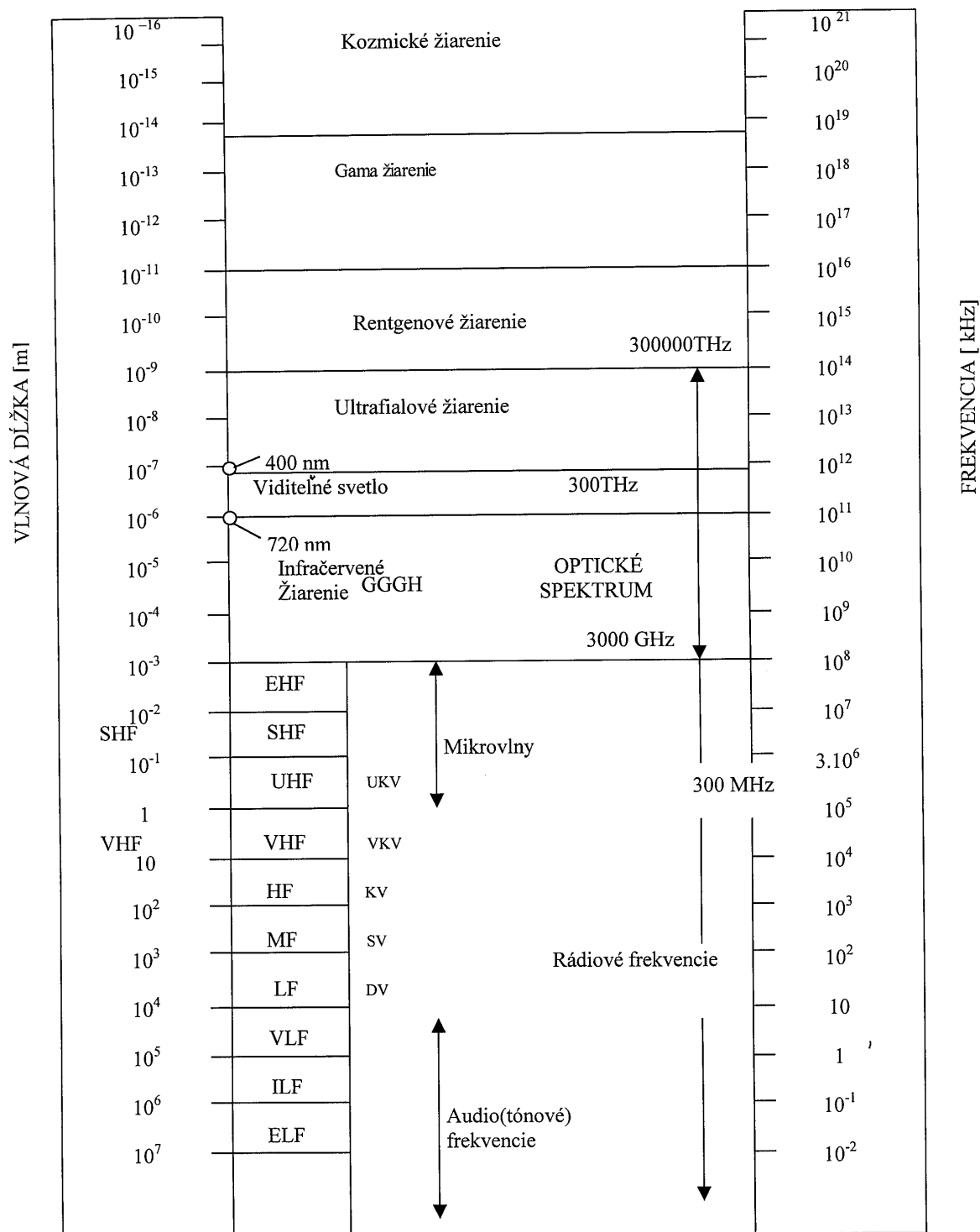
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Oblasť optického žiarenia je od vlnových dĺžok 100 nm až 1 mm. Túto oblasť je možné rozdeliť na sedem pod oblastí. Tri ultrafialové oblasti (100 až 280 nm), (280 až 315 nm), (315 až 390 nm). Oblasť viditeľného svetla (390 až 770 nm) a tri infračervené oblasti (770 až 1,4  $\mu\text{m}$ ), (1,4 až 3  $\mu\text{m}$ ) a (3  $\mu\text{m}$  až 1 mm).

Pre optické komunikácie sa predpokladá využitie (0,4 až 12  $\mu\text{m}$ ). V tejto oblasti je minimálne tlenie materiálov vhodných, ako optokomunikačné prenosové prostredie a emitujú tu vhodné zdroje optického žiarenia (LED i LASERY). Pre kratšie vlnové dĺžky (ultrafialové žiarenie) tlenie týchto materiálov narastá. Na hranici röntgenového žiarenia už nie sú k dispozícii vhodné zdroje optického žiarenia. V dlho-vlnovej oblasti (infračervenej) je energia fotónov malá. Z toho vyplýva, že je aj malá odolnosť optických prijímačov proti rušivým signálom.



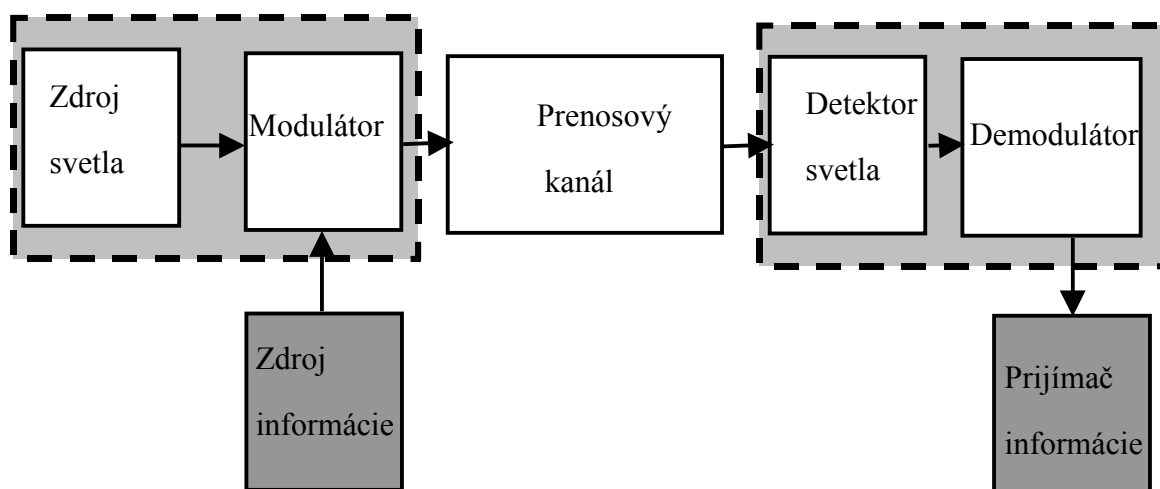
Obr. 2.1 Elektromagnetické spektrum



Obr. 2.2 Úplné elektromagnetické spektrum s vyznačením frekvencií

Teoreticky využiteľná šírka frekvenčného pásma pre optokomunikačné systémy je okolo 500 THz. Takáto šírka pásma umožňuje prenos informácií s extrémne vysokými prenosovými rýchlosťami, kde už nie je limitujúcim faktorom šírka pásma optických vysielačov a prijímačov, ale šírka frekvenčného pásma modulátorov a foto detektorov.

## 2.4 Bloková schéma optického spoja



Obr. 2.3 Základná bloková schéma optického spoja

Optický vysielač - je tvorený modulovaným zdrojom svetla.

Prenosový kanál - je tvorený optickým prostredím.

Optický prijímač - je tvorený prijímacím optickým systémom s fotodetektorom.

Vstupný a výstupný signál optického spoja je elektrický signál, preto vysielačia a prijímacia časť optického spoja obsahuje okrem optoelektronických prvkov a optických sústav tiež elektronické obvody na spracovanie vstupného a výstupného signálu. Ako zdroj svetla sa najčastejšie používa laser, alebo elektroluminiscenčná dióda (LED). Optický signál sa moduluje v optickom modulátore, alebo pri použití polovodičových zdrojov svetla LD (laserovej diódy), alebo LED, priamo zmenou budiaceho prúdu. Na prijímacej strane sa

optický signál privedie na detektor svetla (fotodetektor), jeho úlohou je transformovať optický signál späť na elektrický. Obvody spracovania signálu upravujú elektrický signál do tvaru vhodného na prenos. Sú to najmä obvody združovania signálov, multiplexory, demultiplexory, a podobne. Optické prostredie môže tvoriť vzduch, svetlovody s periodicky fókusujúcimi prvkami, ale najčastejšie sú to optické vlákna. V kozmickom prostredí to môže byť aj vákuum. V optickom komunikačnom systéme je nosičom informácie optický signál. Prenášaná informácia môže byť zobrazená zmenou jeho amplitúdy, frekvencie, fázy, polarizácie, vlnovej dĺžky, doby trvania, alebo kombináciou týchto parametrov.

## 2.5 Vplyv optického prostredia na parametre optického signálu

Ani optokomunikačný systém, nie je možné považovať za úplne bez stratový systém prenosu. V priebehu prenosu dochádza k zoslabeniu signálu, k zmenám tvaru prenášaných impulzov, k zmenám ich časovej polohy. Charakter vyžarovania fotónov má za následok vznik šumu, ktorý nezávisí od úrovne optického signálu a pri detekcii v optickom prijímači vzniká tzv. výstrelový šum, úmerný dopadajúcemu optickému výkonu.

Na elimináciu aj týchto nežiadúcich javov je možné na optickej trase zaradiť optické opakovače, ktoré možno rozdeliť do dvoch skupín:

- a) **opakovače so zosilnením signálu** (v kvantovom laserovom zosilňovači), ich nedostatkom je zvýšenie úrovne šumu s každým opakovačom,
- b) **opakovače regeneračné**, obnovenie signálu na pôvodnú kvalitu (napríklad na báze PCM), potom kvalita signálu nezávisí od dĺžky trasy.

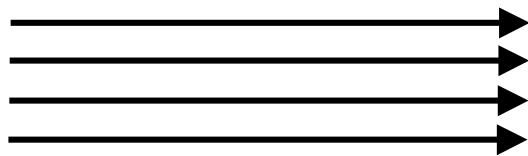
## 2.6 Geometrická optika

V tejto kapitole bude popísané chovanie sa svetla, bez toho aby sme sa podrobne zaoberali, prečo sa svetlo chová práve týmto spôsobom. Podrobnejšie sa týmto zaoberá vlnová

teória a teória častíc. Geometrická optika považuje svetlo vyžiarené zo svetelného zdroja za zväzok lúčov šíriacich sa priestorom. Svetelné lúče sú znázornené, ako priamky a na ne sú aplikované geometrické zákony. Zväzok lúčov je zložený z množstva lúčov, šíriacich sa spoločne priestorom.

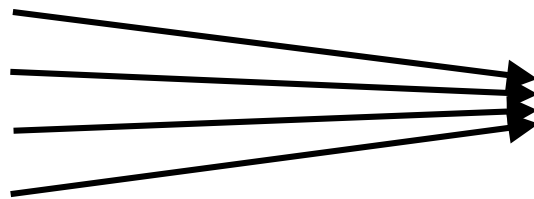


jednoduchý svetelný lúč



paralelný zväzok lúčov

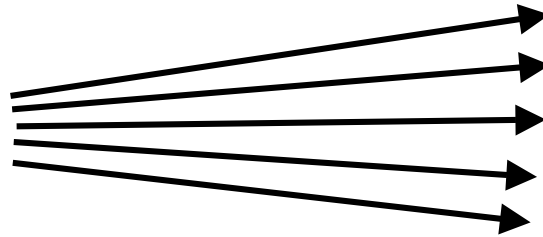
Obr. 2.4a Trajektórie vyžiarených lúčov zo svetelného zdroja



konvergentný (zbiehavý) zväzok lúčov

Obr. 2.4b Trajektória vyžiarených lúčov zo svetelného zdroja – zbiehavý zväzok





divergentný (rozbiehavý) zväzok lúčov

Obr. 2.4c Trajektória vyžiarených lúčov zo svetelného zdroja – rozbiehavý zväzok

### 2.6.1 Odraz svetla

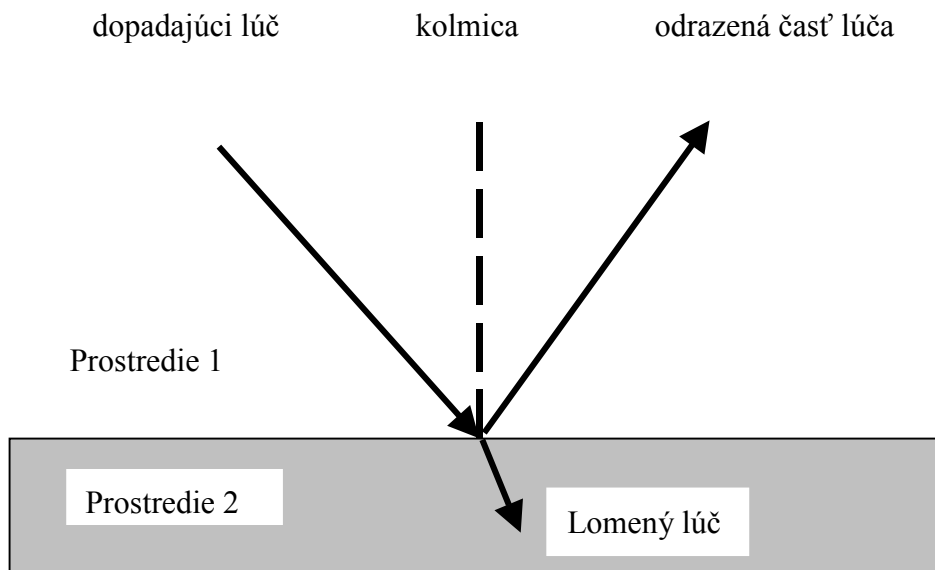
Dôležité pravidlá odrazu:

- uhol odrazu sa vždy rovná uhlu dopadu, pričom tieto uhly sú merané od kolmice spustenej na plochu v bode dopadu lúča,
- dopadajúci lúč, kolmica a odrazený lúč ležia v jednej rovine.

Ak dopadne svetelný lúč z jedného prostredia na iné prostredie môže dôjsť k trom javom:

- časť svetla môže byť odrazená,
- časť svetla môže byť pohltená (a premenená na teplo),
- časť svetla môže novým prostredím prejsť.

V prípade dopadu svetla na dokonalé zrkadlo, je všetko dopadajúce svetlo odrazené. V skutočnosti dokonalé zrkadlo neexistuje a tak vždy dochádza ku stratám svetelnej energie. Ak prechádza svetelný lúč z jedného prostredia do druhého s rozdielnou hustotou (napr. zo vzduchu do skla), časť svetla môže vstúpiť do druhého prostredia a zmeniť smer, tento jav sa nazýva lom. Tento jav vzniká preto, že rýchlosť svetla v opticky hustom prostredí je menšia ako vo vákuu. Časť svetla odrazeného späť do pôvodného prostredia sa nazýva Fresnelov odraz. Jednou z najdôležitejších definícií v optike je definícia indexu lomu.



Obr.2.5 Lom a odraz svetla

**Index lomu** je obvykle označovaný písmenom  $n$ . Pre akúkoľvek látku je  $n$  pomer rýchlosti svetla vo vákuu k rýchlosti svetla v tejto látke, ktorá je vždy menšia. Preto je  $n$  vždy väčšie ako 1. Čím väčší je index lomu, tým väčší je lom.

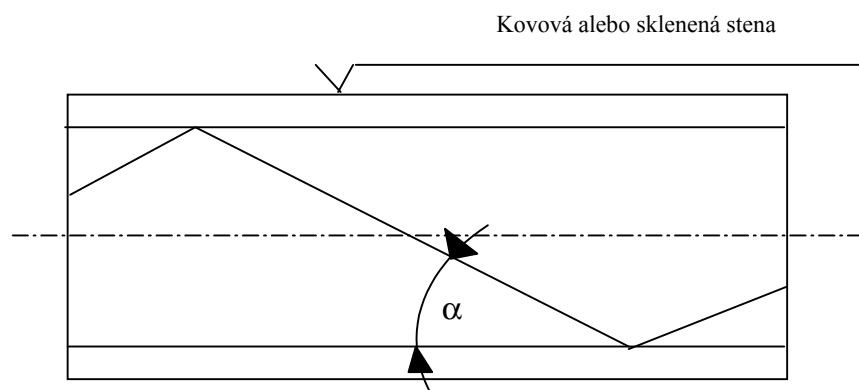
Príklad:

Rýchlosť svetla vo vákuu je  $3 \cdot 10^8$  m/s. Nech rýchlosť svetla v skle je  $1,78 \cdot 10^8$ . Potom index lomu pre sklo je približne  $n = 1,6$ .

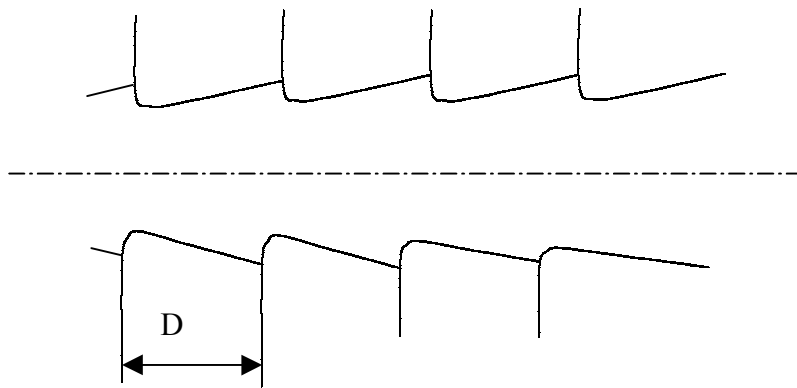
V pozemských podmienkach je výhodnejšie prenášať optické signály použitím svetlovodov. Svetlovody môžeme rozdeliť do troch skupín:

1. Duté svetlovody sú trubice so zrkadlovým vnútorným povrchom s priemerom niekoľko milimetrov. Svetelný lúč sa odráža od stien trubice. Dochádza k stratám pri každom odraze. Nevýhodou je príliš veľké tlmenie rádovo 10 až 100 dB/km.

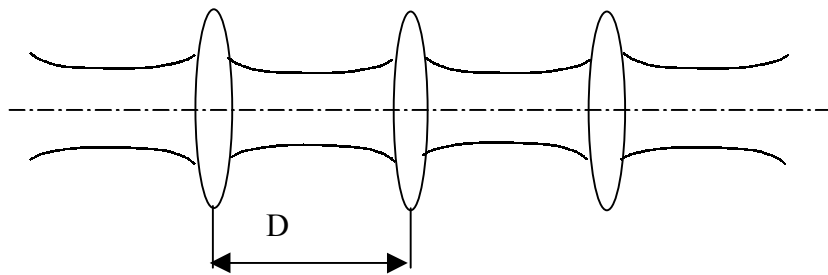
2. Svetlovody s diskretnymi korektormi (s periodicky fókusujúcimi prvkami), sú to sústavy tvorené clonami, šošovkami a zrkadlami. Umiestnenie šošoviek je konfokálne t.j. vzdialenosť  $D$  sa rovná dvojnásobku ohniskovej vzdialenosti  $F$ . Výhodnejšie je používať plynové šošovky, kde sa dá dosiahnuť tlmenie okolo 1db/km. Tento typ svetlovodov je skôr využívaný v laboratórnych podmienkach pre svoje vysoké náklady a komplikované optické nastavenia.
3. Optické vlákna poskytujú šírenie svetla vo vhodnom dialektrickom vlnovode. Na obrázku 2.6 d) je vlákno so skokovou zmenou indexu lomu, tzv. stupňovité optické vlákno. Valcové dielektrické jadro s indexom lomu  $n_1$ , je obklopené dialektrickým plášťom s indexom lomu  $n_2$ . Za predpokladu, že  $n_1 > n_2$  lúče, ktoré vstupujú do jadra optického vlákna pod uhlom  $\alpha$  menším ako  $\alpha_c$ , pre ktorý platí  $\cos \alpha_c = n_2 / n_1$  dochádza na rozhraní jadro – plášť k totálnemu odrazu (odraz na rozhraní dvoch optických prostredí s rôznym indexom lomu). Pre ilustráciu optické vlákna na báze  $\text{SiO}_2$  je tlmenie menšie, ako 0,2 dB/km pri vlnovej dĺžke  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ .



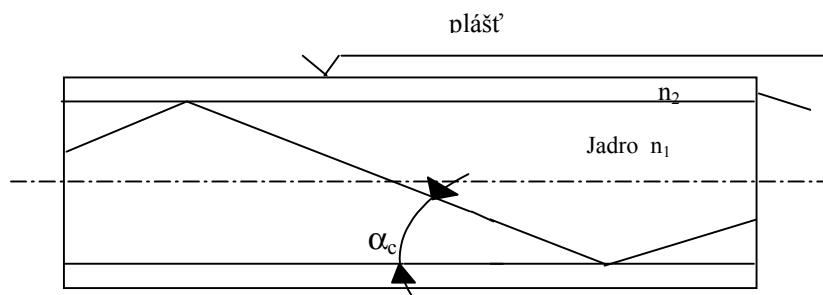
a) duté svetlovody



b) svetlovody s fókusujúcimi clonami



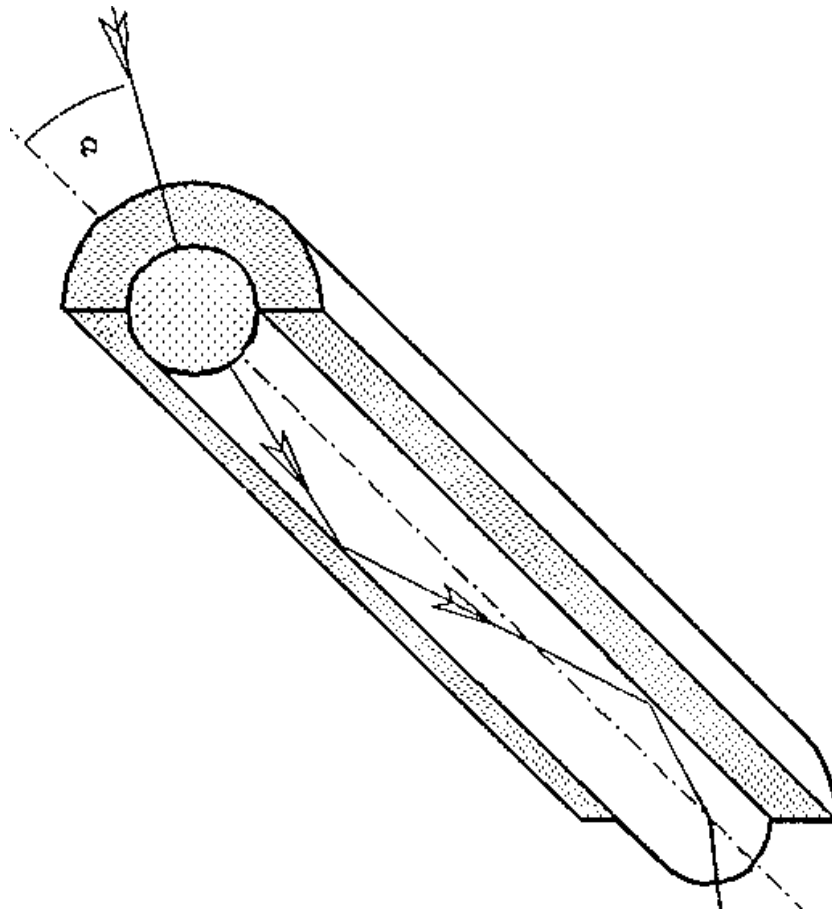
c) svetlovod so šošovkami



d) optické vlákno

Obr. 2.6 Rôzne typy svetlovodov

Pro lepší názornost' je na obrázku 2.7 znázornený rez optického vlákna v 3D zobrazení.



Obr. 2.7 Rez optického vlákna

## 3 OPTICKÉ VLÁKNA

**Optické vlákno**, niekedy tiež **optický vlnovod**, alebo svetlovod prenáša svetlo na veľké vzdialenosti s malým tlmením. Umožňuje viesť svetlo po zakrivenej dráhe a chráni ho pred rušením a poruchami.

Prvé vlákna mali tlmenie nad 1000 dB/km, čo boli horšie parametre ako má koaxiálny kábel (10 dB/km). Postupným vývojom bol tlmenie optického vlákna znížené na 5 dB/km a dnešné moderné vlákna dosahujú hodnotu 0,3 dB/km. Vlákna sú dnes navyše aj podstatne lacnejšie ako metalické vodiče.

Používanie optického vlákna na prenos má nasledujúce výhody:

- Veľkú šírku pásma vzhľadom na možnosť dosiahnuť vysokej prenosovej rýchlosti (prenos veľkého množstva informácií),
- úplná elektrická izolácia,
- odolnosť voči elektrostatickému a elektromagnetickému rušeniu,
- odstránenie nebezpečenstva iskrenia a ohňa.

Vo svetlovodných vláknach sa svetlo šíri úplným odrazom. Podstata spočíva v tom, že keď svetlo prichádza z prostredia (látky) s väčšou optickou hustotou na rozhranie s látkou, ktorá má menšiu optickú hustotu a uhol dopadu prekročí medzný uhol, je (teoreticky) celé svetlo odrazené späť do prostredia, z ktorého prichádza.

### 3.1 Typy optických vlákien

#### 3.1.1 Šírenie svetla v optickom vlákne

Svetlo sa odráža od vnútorných stien vlákna až kým nedosiahne jeho vzdialený koniec. Ak sa ohýba vlákno okolo rohu, „ohýba“ sa aj svetlo vo vnútri vlákna.

Rozoznávame dva základné typy vlákien (kap. 3.1.2 a 3.1.3):

- Vláknó so skokovou zmenou indexu lomu,
- vláknó s postupnou zmenou indexu lomu.

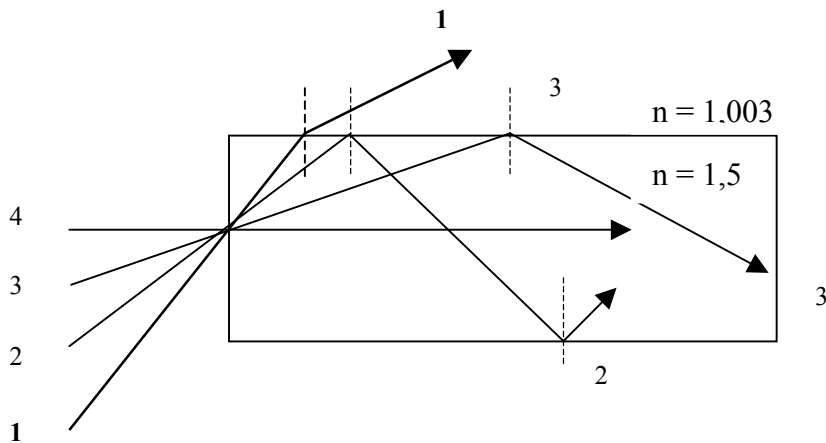
Mechanizmus odrazu svetla vo vnútri vlákna je závislý od typu použitého vlákna a rozoznávame:

- Úplný odraz (vo vlákne so skokovou zmenou indexu lomu),
- nepretržitý lom (vo vláknach s plynulou zmenou indexu lomu).

### 3.1.2 Vlákná so skokovou zmenou indexu lomu

Najjednoduchšie optické vlákno so skokovou zmenou indexu lomu je tvorené skleneným vláknom obklopeného vzduchom.

Sklo je opticky hustejšie ako okolitý vzduch (pomer indexov lomu je  $1,5 : 1,0003$ ). U svetla šíriaceho sa v skle dôjde k úplnému odrazu, pokiaľ uhol dopadu na vnútornú stenu skla (merané od kolmice) je väčší ako **medzný uhol** ( $41,48^\circ$ ).



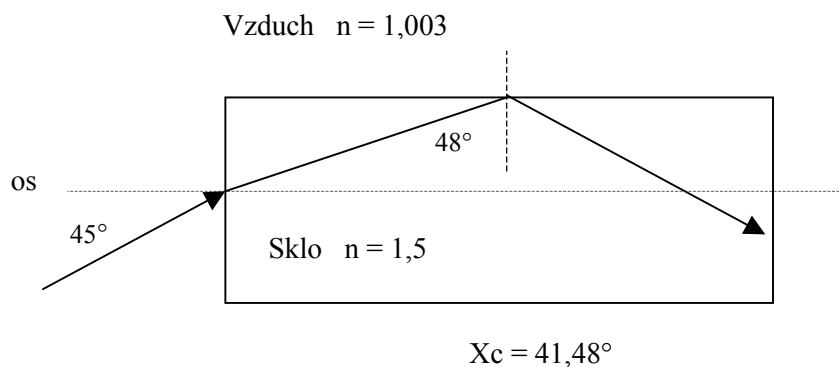
Obr. 3.1 Lom svetla na rozhraní sklo - vzduch

- ◆ lúč 1. dopadá na rozhranie pod uhlom  $30^\circ$  preto vystupuje do okolitého vzduchu,
- ◆ lúč 2. dopadá na rozhranie pod uhlom  $45^\circ$  a to je viac ako medzný uhol ( $41,48^\circ$ ), preto sa odráža od protilahlých stien a šíri sa v sklenenom vlákne úplným odrazom,
- ◆ lúč 3. má uhol dopadu  $60^\circ$  preto sa taktiež šíri v skle úplným odrazom,
- ◆ lúč 4. je axiálny a šíri sa priamo v smere osy vlákna bez odrazu od rozhrania.

Lúče č. 2, 3, 4 sa teda šíria vo vnútri vlákna úplným odrazom na rozhraní sklo - vzduch. Čím je väčší rozdiel indexov lomu, tým je menší medzný uhol.

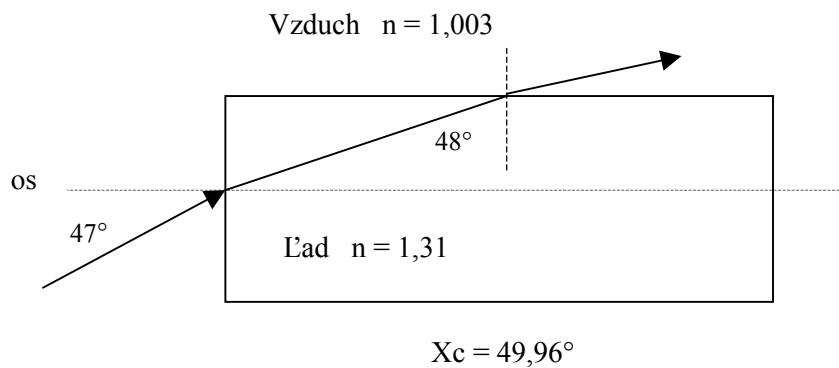
Ak svetelný lúč vnikne do skleneného vlákna pod určitým uhlom dochádza vo vnútri k úplnému odrazu na rozhraní sklo – vzduch (obr. 3.2).

Ak je vlákno z iného materiálu napr. z ľadu ( $n = 1,31$ ), potom ten istý lúč vstupujúci do vlákna pod rovnakým uhlom bude lomený na rozhraní ľad – vzduch von z vlákna a to vplyvom zväčšenia medzného uhla.



Obr. 3.2 Lom svetelného lúča na rozhraní vzduch - sklo



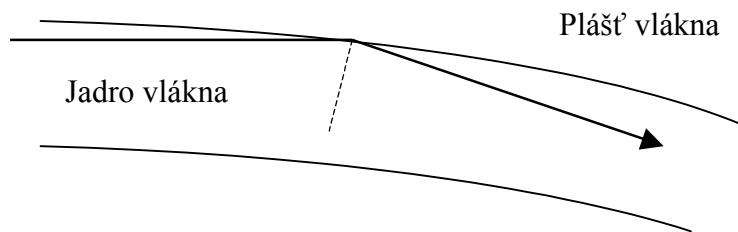


Obr. 3.3 Lom svetelného lúča na rozhraní vzduch - ľad

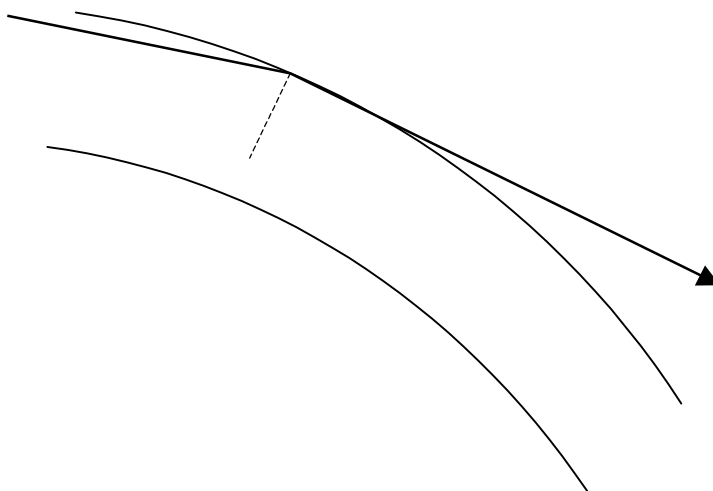
V praxi optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu obsahujú dva rôzne druhy skla. **Jadro** (opticky hustejšie sklo) je obalené sklom druhého druhu (opticky redšieho), tvoriaceho **plášť**. Hranica medzi jadrom a plášťom vytvorí rozhranie pre úplný odraz.

Medzný uhol je tým menší, čím viac sa hodnoty indexov lomu od seba líšia. Dobré optické vlákno používa materiály zo značne odlišnými indexami lomu. To znamená, že sklo tvoriace obal musí mať značne odlišný index lomu.

Dôležité znižovanie medzného uhla je v prípade ohybu vlákna. Čím väčší bude rozsah uhlov, pri ktorých dochádza k úplnému odrazu, tým viac sa zväčší uhol možného ohybu vlákna, pričom sa svetlo stále ešte šíri vo vnútri vlákna.



Obr. 3.4 Menší ohyb vlákna



Obr. 3.5 Větší ohyb vlákna

Takže vo vlákne so skokovou zmenou indexu lomu dochádza ku skoku medzi indexami lomu jadra a plášťa.

## Pre telekomunikácie sú vhodné tri základné typy optických vlákien

- a) Mnohovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. stupňovité opt. Vlákná (SI – MM Step Index Multy Mode).
- b) Mnohovidové vlákna so spojitým (gradientným) profilom indexu lomu, tzv. gradientné optické vlákna (GI – MM Gradet Index Multy Mode).
- c) Jednovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. stupňovité optické vlákna (SI – SM Step Index Singl Mode).

## Klasifikácia vidov

Vidy ( módy) klasifikujeme najskôr podľa azimutálneho vidového čísla „ $m$ “, potom podľa toho či sú TM (transverzálne magnetické vidy), alebo TE (transverzálne elektrické vidy), pri ktorých  $m = 0$ , alebo EH, HE (hybridné), pri ktorých  $m \geq 1$  a nakoniec podľa radiálneho vidového čísla.

Mnohovidové optické vlákna umožňujú šírenie konečného počtu vedených vidov (rádovo stovky až tisícky). Počet vedených vidov závisí od parametrov optického vlákna ( $\Delta$ ,  $a$ ) a vlnovej dĺžky  $\lambda$  prenášaného svetla, čo je vyjadrené tzv. normovanou frekvenciou  $v$ . „ $\Delta$ “ je relatívny rozdiel indexov lomu jadra a plášťa. „ $a$ “ je vzdialenosť určujúca rozhranie jadra od plášťa.  $v_c$  označuje hodnotu kritickej normovanej frekvencie pod ktorou sa vid už nešíri.

**Celkový počet vedených vidov (vidový objem)  $M_s$  pre SI – MM optické vlákna:**

$$M_s = \frac{v^2}{2}$$

V ideálnom SI – MM optickom vlákne nevzniká väzba vidov, optický výkon naviazaný do určitého vidu sa šíri v tomto vide pozdĺž optického vlákna nezávisle od ostatných vidov.

Väčšia časť optického výkonu sa šíri v jadre a nie v plášti. Preto vlastnosti plášťa neovplyvňujú podstatne šírenie.

Výhoda šírenia jedného vidu optickým vláknom je, že sa odstráni disperzia signálu, spôsobená rôznym oneskorením jednotlivých vidov (vidová disperzia) v mnohovidovom optickom vlákne. Mnohovidové optické vlákna neumožňujú vedenie jedného vidu (vznik vidovej konverzie). V jednovidovom optickom vlákne sa šírenie ostatných vidov potlačí vytekaním, alebo absorpciou. Toto môže byť realizované vhodnou voľbou normovanej frekvencie optického vlákna.

Pre jednovidový režim sa uvažuje s vedením základného  $LP_{01}$  vidu. Ohraničenie pásma jedno vidovosti je preto určené kritickou frekvenciou ďalšieho vidu

$$LP_{11} \text{ pre ktorý platí } V_c = 2,405$$

Šírenie len dominantného (základného) vidu  $LP_{01}$  optickým vláknom vzniká ak:

$$0 < v = k_{n1} a \sqrt{2\Delta} < V_c = LP_{01} = 2,405$$

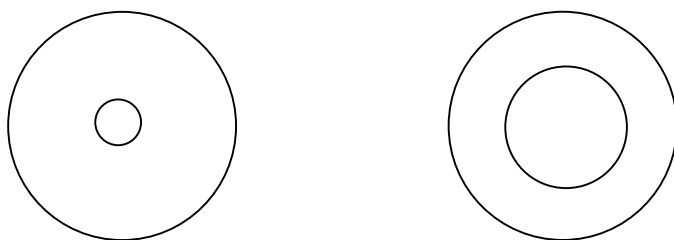
Ak sú splnené hore uvedené podmienky, hovoríme o jednovidovom stupňovitom (SI – SM) optickom vlákne. Musí mať malý priemer  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Ak by bol priemer jadra niekoľko  $\mu\text{m}$  musíme zvoliť malé  $\Delta$ , ale potom veľká časť energie (až 50%) sa šíri v plášti optického vlákna. Toto je nevýhodné preto sa používajú iné profily indexu lomu napr. vlákno typu W.

Poznámka:

V SI – SM optickom vlákne sa v skutočnosti môžu šíriť dva vidy  $LP_{01}$  + vid s ortogonálnou polarizáciou k  $LP_{01}$ . Pojem jednovidový sa vzťahuje na šírenie svetla s určitou polarizáciou.

### Mnohovidové vlákna

Niektoré vlákna majú veľký prierez jadra. To umožňuje vstup svetelných lúčov do vlákna pod viacerými rôznymi uhlami. Vstupný uhol lúča určuje jeho cestu vláknom, jeho **vid** (mód, spôsob). Vlákna s veľkým jadrom sa nazývajú **mnohovidové vlákna** (multimódové) so skokovou zmenou indexu lomu.



Obr. 3.6 Prierez jednovidového a mnohovidového vlákna pod mikroskopom

### Jednovidové vlákna

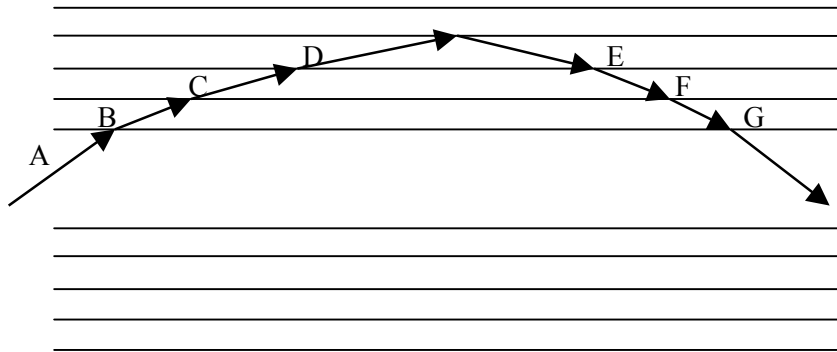
Vlákna s malým prierezom jadra umožňujú len jeden vstupný uhol a teda len **jeden vid**. Jadro vlákna so skokovou zmenou indexu lomu musí mať konštantnú optickú hustotu.

Axiálny lúč prechádza priamo a teda dosiahne koniec vlákna rýchlejšie. Ak je vlákno ohýbané, svetelný lúč dopadá na rozhranie a dochádza k úplnému odrazu. Ak je ohyb príliš veľký, lúč sa lomí von z jadra.

Jednovidové vlákna tvoria základ pre diaľkové telekomunikačné siete. Pracujú v oblasti vlnových dĺžok 1310 a 1550 nm. Aj keď je priemer funkčnej ochrany vlákna 125  $\mu\text{m}$  a priemer primárnej ochrany 250  $\mu\text{m}$ , priemer módového poľa je cca 10  $\mu\text{m}$ . Optické tlmenie umožňuje realizovať až 70 km trasy bez opakovačov.

### 3.1.3 Vlákná s plynulou zmenou indexu lomu (gradientné)

Vlákná s plynulou zmenou indexu lomu tzv. **gradientné vlákna** boli vyvinuté koncom 70-tych rokov. Na šírenie svetla je použitá **metóda nepretržitého lomu svetla**. Index lomu gradientných vlákien je premenlivý. Pri postupe lúča od stredu jadra k okraju, teda k rozhraniu jadro-plášť (obal) sa index lomu znižuje.



Obr. 3.7 Vrstvový model jadra optického gradientného vlákna

Ide o sústavu veľkého počtu vrstiev s rôznymi indexami lomu. Index lomu sa znižuje od osi smerom k vonkajšej vrstve.

Lúč A je lomený od kolmice, lebo prechádza do menej hustého prostredia. Lúč B a C je ďalej lomený od kolmice. Lúč D prekročil medzný uhol a dochádza k úplnému odrazu.

Predstava nepretržitého lomu je založená na veľkom počte veľmi tenkých vrstiev, z ktorých každá má nepatrne odlišný index lomu. Lúč postupne dopadá na jednotlivé tenké vrstvy a mení svoj smer. Tieto vrstvy však v skutočnosti neexistujú, predstavujú len model, index lomu sa mení plynule.

Je možné uvažovať aj Fresnelov odraz, ktorý je sprievodným javom lomu svetla na rozhraní dvoch prostredí, ako je to u vlákien so skokovou zmenou indexu lomu. V skutočnosti však žiadne rozhrania nie sú, a ak dochádza k lomu (ohybu) bez existencie rozhrania, nedochádza k Fresnelovemu odrazu .

Vo vláknach s plynulou zmenou indexu lomu sa optická hustota zväčšuje smerom ku stredu vlákna. Najvýhodnejší priebeh zmeny indexu lomu je parabolický.

Dôvodom pre vývoj rôznych typov vlákien je jav nazývaný disperzia a to **vidová disperzia** spôsobená rôznymi vidmi šírenia svetelných lúčov vo vnútri vlákna v závislosti od uhla pod ktorým do vlákna vstupuje, ale aj **chromatická (spektrálna) disperzia** spôsobená rozdielnym indexom lomu danej látky pre rôzne vlnové dĺžky svetelného žiarenia, teda odlišnou rýchlosťou svetla s rôznou vlnovou dĺžkou.

Obidva druhy disperzie majú za následok deformáciu tvaru svetelných impulzov, resp. obmedzenie rýchlosti prenosu dát.

Disperzia deformuje tvar impulzov do takej miery, až je signál nerozpoznaťelný. Ak sa čas medzi každým vysielaným impulzom predĺži, je možné impulzy identifikovať. Prenos informácie preto môže byť realizovaná len pri nižšej prenosovej rýchlosti. Napríklad hypotetické impulzy s dobou trvania 50 ns môžu byť po prenose vláknom dlhým 40 km deformované na dĺžku 100 ns. Pre dobrú identifikáciu by bolo potrebné vložiť medzi impulzy medzeru trvajúcu aspoň 100 ns, čo by dvakrát zmenšilo prenosovú rýchlosť.

Vývoj vlákien s plynulou zmenou indexu lomu umožnil vidovú disperziu znížiť. Napriek tomu, že sa lúče lomia k vonkajším stranám vlákna, menšej optickej hustote, je ich rýchlosť väčšia, ako rýchlosť axiálnych lúčov šíriacich sa opticky hustejším stredom. Axiálne lúče sú teda pomalšie, alebo rovnako rýchle.

U dlhých vlákien dochádza k odchýlkam od ideálneho priebehu indexu. Z toho vyplýva skreslenie (rozšírenie) prenášaných svetelných impulzov. Prenosová rýchlosť vlákien s plynulou zmenou indexu je aj napriek tomu vyššia než u mnohovidových vlákien so skokovou zmenou indexu. **Vlákná s plynulou zmenou indexu lomu sú mnohovidové.**

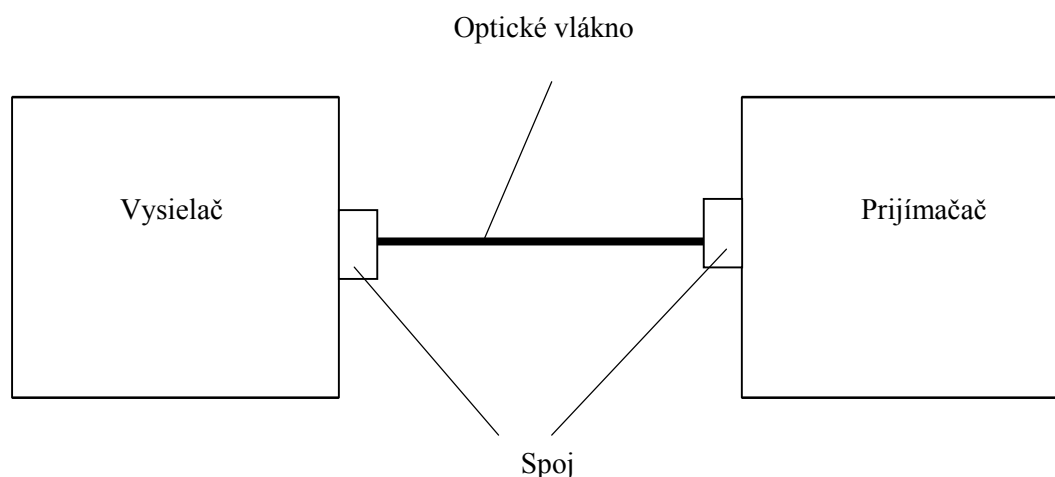
Výroba vlákien s plynulou zmenou indexu lomu bola najskôr veľmi nákladná, postupne bola cena znížená a tento typ je dnes už bežne používaný.

Obmedziť vidovú disperziu je možné aj použitím jednovidového vlákna so skokovou zmenou indexu lomu. V jednovidovom vlákne sa šíria **len axiálne lúče** a ďalšie typy vidov sú eliminované. Tieto vlákna sú veľmi tenké. **Jadro** by malo byť tenšie než **3,6 násobok vlnovej dĺžky** svetla. Pre svetlo s vlnovou dĺžkou 0,85  $\mu\text{m}$  je potrebné vlákno tenšie než 3,1  $\mu\text{m}$ . Malé rozmery spôsobujú problémy pri spojovaní vlákien a sústredení svetelnej energie do jadra

vlákna. Aj napriek tomu jednovidové vlákna so skokovou zmenou indexu získavajú na trhu telekomunikačných systémov stále väčšie uplatnenie, predovšetkým na diaľkové prenosy v tranzitných, respektíve transportných sieťach.

### 3.2 Charakteristiky optických vlákien

Optické vlákno môžeme zaradiť do komunikačného systému ako prenosové médium (prenosovú linku). V komunikačnom reťazci budú optické vlákna používané ako prenosová linka pre prepojenie vysielачa a prijímača. Spojenia medzi optickými prvkami (vysielač svetla, optické vlákno, detektor svetla) musia byť dokonalé, aby sa zamedzilo stratám.



Obr. 3.8 Optické vlákno v komunikačnom reťazci

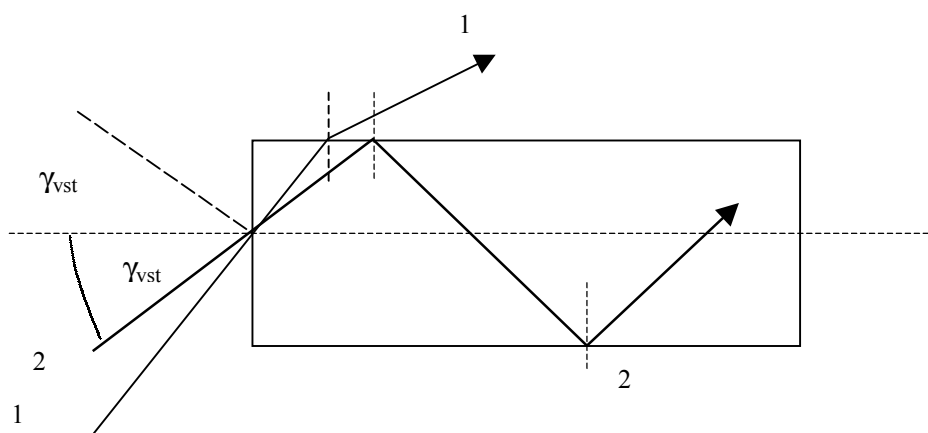
Medzi najsledovanejšie charakteristiky optického vlákna patria číselná apertúra (numerická apertúra), väzobné straty, disperzia, mechanické a iné vlastnosti. Na vysvetlenie charakteristík optického vlákna použijeme mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu.



### 3.2.1 Číselná (numerická) apertúra

Svetlo dopadajúce na začiatok vlákna sa ďalej šíri vo vnútri vlákna. Pokiaľ je uhol dopadu lúča (meraný od osi vlákna) príliš veľký, dochádza k jeho lomu na vnútornej stene vlákna vplyvom uhlu dopadu menšieho než je uhol medzný.

Schopnosť vlákna prijať určité množstvo svetla sa nazýva **číselná**, alebo tiež **numerická apertúra**. Numerická apertúra (NA) je rovná sínusu maximálneho uhla, z ktorého prichádzajúce lúče sa vo vnútri vlákna budú ešte šíriť. Pokiaľ je uhol prekročený, lúče sú na rozhraní vzduch – vlákno odrazené, k šíreniu svetla vo vlákne nedôjde.



Obr. 3.9 Numerická apertúra ( $\sin \gamma_{vst}$ )

NA vypočítame z indexu lomu vlákna so skokovou zmenou indexu:

$$NA = \sin \gamma_{vst} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

kde  $\gamma_{vst}$  - je maximálny uhol vstupujúceho lúča, ktorého svetlo sa ešte bude šíriť vláknom,

$n_1$  - je index lomu jadra,

$n_2$  - je index lomu plášťa.

Pokiaľ je medzi zdrojom svetla a vstupným koncom iné prostredie ako vzduch, je hodnota  $\sin \gamma_{\text{vst}}$  delená indexom lomu tohto prostredia:

$$\text{NA}_c = \text{NA} / n_3.$$

Tento vzťah nemôže byť použitý pre vlákna s plynulou zmenou indexu. V tomto prípade môžeme hodnotu NA určiť experimentálne. Je dôležité, aby číselná apertúra vlákna odpovedala použitému svetelnému zdroju, inak by časť svetelnej energie bola ztratená.

### 3.2.2 Väzobné straty

Pri spajovaní vlákien vznikajú straty, pokiaľ nie je svetlo vstupujúce do vlákna správne smerované a straty vplyvom štruktúry vlákna. Medzi najdôležitejšie typy strát spôsobených väzbou medzi vláknami patria:

- ◆ Straty numerickou apertúrou (NA),
- ◆ straty prierezom vlákna,
- ◆ straty Fresnelovým odrazom,
- ◆ straty odchylkou osí,
- ◆ straty oddialením koncov vlákien,
- ◆ straty nerovnosťou plôch,
- ◆ straty znečistením stykových plôch.

#### a) Straty NA

Straty energie môžu vzniknúť na dokonalom spojení vlákien, ktorých hodnota NA sa líši. Prijímacie (pokračujúce) vlákno prijme celé svetlo zo zdrojového (prichádzajúceho) vlákna, pokiaľ je jeho NA väčšia alebo rovná NA zdrojového vlákna. Pokiaľ je NA prijímacieho vlákna menšia, potom sa časť svetla nebude prijímajúcim vláknom šíriť a vznikajú straty NA (straty vplyvom číselnej apertúry).

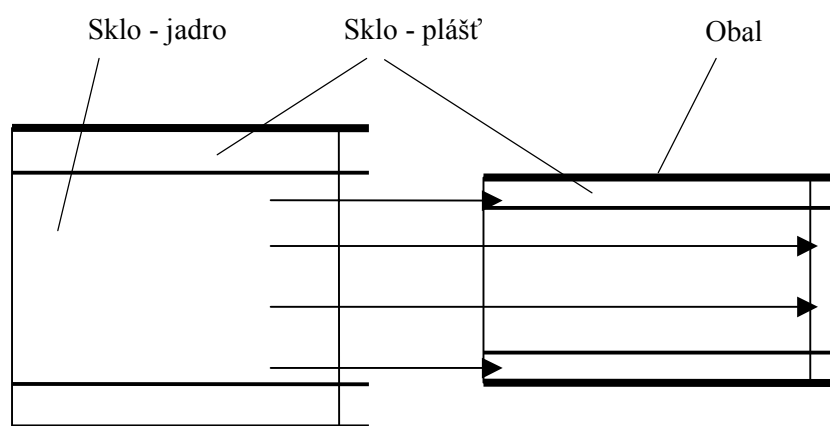
$$NA \text{ (dB)} = 20 \log (NA_z / NA_p)$$

kde  $NA_z$  - je NA zdrojového vlákna,  
 $NA_p$  - je NA prijímacieho vlákna.

Straty vplyvom rozdielnej NA môžu byť potlačené použitím kompresora svetelného zväzku, ktorý zmenší priemer zväzku. Straty NA sú ešte výraznejšie, keď spojované vlákna nebudú súosé.

### b) Straty prierezom vlákna

Ak spojujeme rôzne vlákna, tieto môžu mať rôzne veľký prierez jadier. Pokiaľ majú jadrá rovnakú veľkosť, alebo je jadro prijímacieho vlákna väčšie ako jadro zdrojového vlákna, tento druh strát nevzniká. Pokiaľ je zdrojové jadro väčšie ako jadro prijímacie, časť svetla nedopadne na jadro prijímacieho vlákna, stráca sa a vznikajú straty prierezom jadra.



Obr. 3.10 Straty prierezom jadra

Vypočítame ich:

$$[\text{dB}] \text{ Straty prierezom jadra} = 20 \log(S_z / S_p)$$

kde  $S_z$  je prierez jadra zdroja,

$S_p$  je prierez jadra prijímacieho vlákna.

Tieto straty sa zvýšia v prípade nedokonalého spojenia t.j. oddialenia koncov vlákien, alebo zlou súosťou. Môžu byť potlačené kompresiou svetelného zväzku.

### c) Straty Fresnelovym odrazom

Vznikajú pri spojení dvoch vlákien s rozdielnými indexami lomu ich jadier.

$$\text{Straty Fres. odrazom} = 10 \log (1 - (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2) [\text{dB}]$$

kde  $n_1$  - je index lomu jadra,

$n_2$  - je index lomu vonkajšieho prostredia.

Uvedený vzťah je presnejší pre jednovidové vlákno. Pre mnohovidové vlákno sa skutočné hodnoty od vypočítaných hodnôt líšia. Pre vlákna s plynulou zmenou indexu nemôžu byť vypočítané podľa uvedeného vzťahu.

Fresnelove straty môžu byť znížené užitím vhodnej optickej látky (alebo lepidlá). Na spojovanie lepením sa používajú epoxidové živice s vhodným indexom lomu. Pri zvarovaní koncov vlákien môžu vzniknúť straty zlou súosťou.

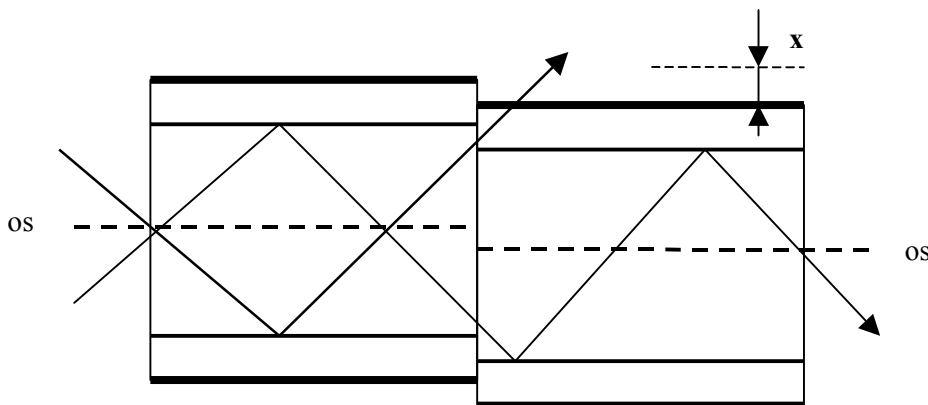
## d) Odchýlka osí

### Odchýlka osí do strán

Táto odchýlka je nepatrná pri vláknach s veľmi úzkym jadrom (jednovidové). Pokiaľ nie sú stredové jadrá dostatočne súosé, môže sa svetlo druhým vláknom nešíriť.

Osová odchýlka môže viesť ku stratám Fresnelovým odrazom vo vláknach s plynulou zmenou indexu, lebo v mieste spojenia vlákien sa ich indexy lomu líšia. Už malá odchýlka osí ma veľký vplyv na zvýšenie strát. Uhlovú odchýlku osí do  $10^\circ$  môžeme tolerovať, ale straty sú veľké už pre malú hodnotu odchýlky osí.

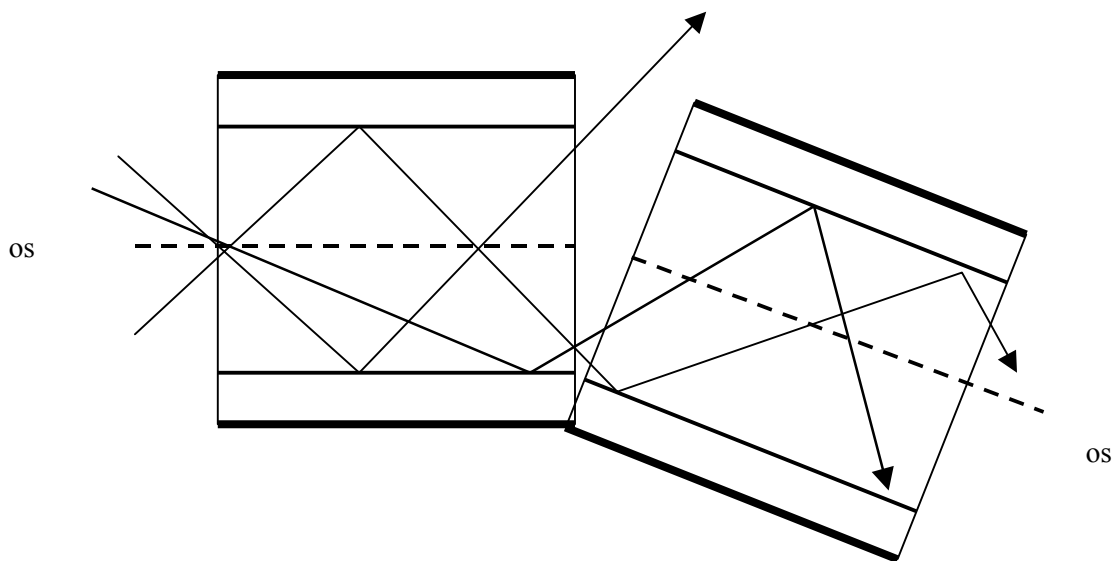
Straty odchýliek osí do strán môžu byť potlačené použitím presných konektorov na konci vlákien. Miera osovej odchýlky sa vyjadruje ako podiel veľkosti vyosenia ( $x$ ) a priemeru jadra vlákna ( $d$ ).



Obr. 3.11 Odchýlka osí do strán

### Uhlová odchýlka osí

Vplyv uhlovej odchýlky osí bude menší pre vlákna s veľkou hodnotou numerickej apertúry. Číselná apertúra zdrojového vlákna je dôležitejšia, ako číselná apertúra prijímacieho jadra.

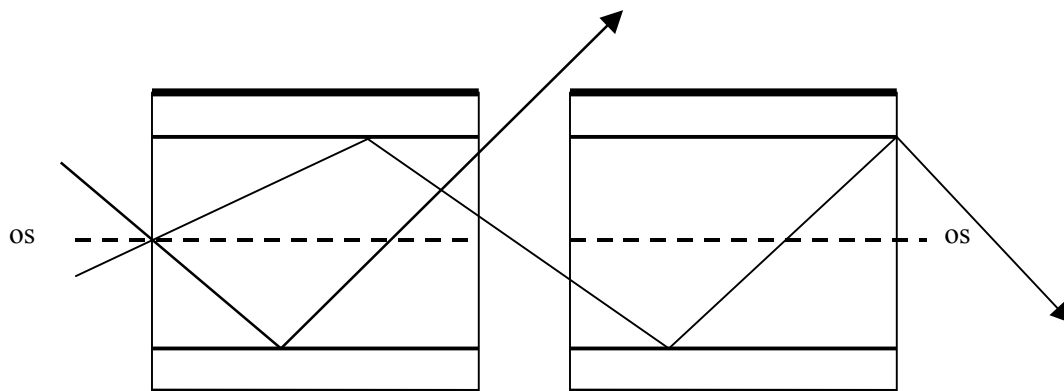


Obr. 3.12 Uhlová odchýlka

#### e) Oddialenie koncov vlákien

Pokiaľ sú konce dvoch vlákien vzdialené, vznikajú straty. Aj v tomto prípade sú straty ovplyvňované predovšetkým číselnou apertúrou NA zdrojového vlákna. Čím je väčšia NA zdrojového vlákna, tým sú väčšie straty na spoji.

Časť optického žiarenia sa dostáva mimo optického vlákna, čo spôsobuje straty. Straty sú úmerné veľkosti uhlovej odchýlky a vzdialenosti koncov vlákien (oddialenie).



Obr. 3.13 Oddialenie koncov vlákien

Opticky vhodná látka s podobným indexom lomu znižuje vplyv oddialenia koncov vlákna. Taktiež je vhodné používať presné konektory.

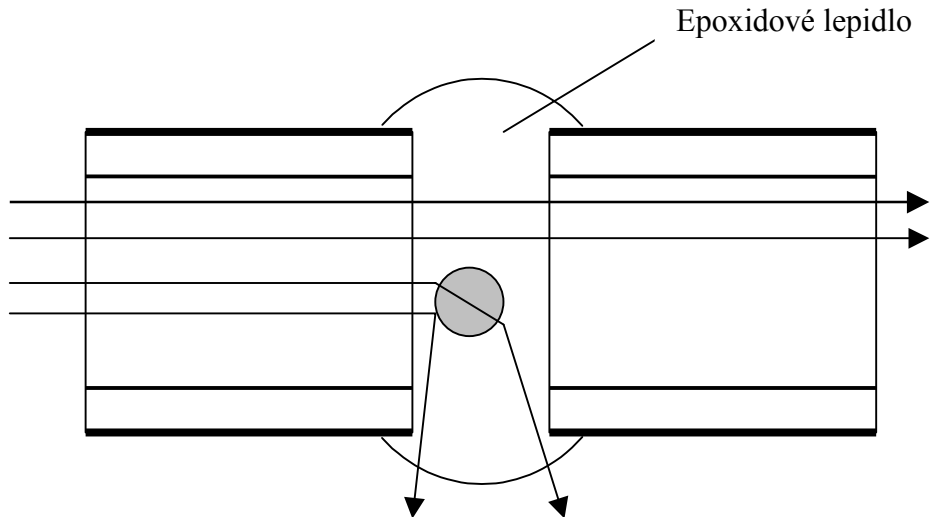
#### **f) Nerovnosti plôch**

Je dôležité, aby plochy spojovaných vlákien boli opticky rovné. Taktiež, aby rez konca vlákna bol presne pod uhlom  $90^\circ$  k osi vlákna, inak dochádza ku stratám vplyvom uhlovej odchýlky osí. Na rezanie sa používajú presné nástroje, alebo sa vlákno zlomí a presne zabrusí..

#### **g) Znečistenie**

Znečistenie je prekážkou pri šírení svetla. Prítomnosť cudzích látok vedie ku stratám lomom, odrazom. Znečistenie predstavujú napríklad aj vzduchové bublinky v epoxidovej živici. Keď svetlo dopadá na bublinky v chybnom spoji, dochádza k energetickým stratám, lebo vzduch v bubline má nižší index lomu.

Všetky uvedené straty vynikajú nielen pri spájaní vlákien pomocou zvárania, ale aj pri ukončení vlákna pomocou konektora.



Obr. 3.14 Znečistenie v spoji

### 3.2.3 Disperzia

Ďalším zdrojom strát môže byť **vidová disperzia**, spôsobená nerovnakou dĺžkou prenosových dráh pre jednotlivé vidy, a **chromatická disperzia**.

Je prakticky nemožné vyrobiť zdroj svetla, ktorý je celý monochromatický. Čím užšie je frekvenčné pásmo svetelného zdroja, tým menšia je chromatická disperzia. Zväčšuje sa pri odlišnej vlnovej dĺžke svetla.

U mnohovidových vlákien nemá chromatická disperzia veľký význam. Sklo používané pre ich konštrukciu nepodporuje chromatickú disperziu. Pre tieto typy má ďaleko väčší vplyv vidová disperzia.

U jednovidových vlákien sa viac uplatňuje chromatická disperzia, lebo vidová disperzia tam nevzniká. Celkovo je však disperzia v jednovidových vláknach podstatne menšia než u iných typov vlákien.



### 3.2.4 Mechanické vplyvy

Ide predovšetkým o také mechanické vplyvy ako je ohyb, mikroohyb, mechanická pevnosť vlákna, vplyv jadrového žiarenia, povrchové chyby vlákna a pod.

#### a) ohyb

Ak dôjde k ohybu vlákna, tak kolmica od ktorej meráme uhol dopadu a odrazu zmení svoju polohu voči lúču šíriaceho sa vláknom. Uhly dopadu môžu klesnúť pod medzný uhol a takéto lúče sú stratené vplyvom lomu do plášťa.

Straty ohybom môžu byť omedzené použitím vlákien s väčším rozdielom indexov lomu, alebo použitím svetla s najmenšou možnou vlnovou dĺžkou.

#### b) mikroohyby

Ide o zvlnenie alebo o mikroohyby na dĺžke vlákna. Môžu mať veľký polomer zakrivenie, ktoré spôsobí vyvedenie niekoľkých vidov von z vlákna. Tým dôjde k zväčšeniu tlmenia.

Môžu byť obmedzené použitím špeciálnych materiálov na vlákna a ochranou proti poškodeniu a možnosti ohybu.

#### c) mechanická pevnosť

Sklo je krehké, ale ohybné pokiaľ sa neprekročí jeho medza pevnosti. Po jej prekročení sklo praskne.

Teoreticky vydrží sklo vydrží  $700 \text{ kg/mm}^2$ . K poškodeniu dochádza vplyvom nadmerného ohybu, tlaku a ťahu. Zlomeniu a poškrabaniu skla zabránime pomocou obalu vlákna a opatnosťou pri pokladaní kábla. Pred vodou je sklo chránené ochranným obalom.

#### d) jadrové žiarenie

Spôsobuje rušenie komunikácie optickými vláknami a poškodzuje ich. Ožiarenie poškodzuje sklo vlákna a zväčšuje jeho tlmenie. Poškodenie vlákna jadrovým žiarením je nevratné a kábel je potrebné vymeniť.

Najnáchylnejšie sú kremičité vlákna. Vlákna z plastických hmôt sú oveľa menej citlivé.

#### **e) povrchové chyby**

Prítomnosť chýb vo vlákne spôsobuje straty energie. Chyby môžu vznikáť pri výrobnom procese, mechanickým poškodením, alebo jadrovým ožiarením. Dôsledkom sú rozdiely v indexoch lomu jednotlivých miest na dĺžke vlákna, alebo úsekov vlákien na trase. Tým je mechanizmus šírenia svetla narušený.

### **3.2.5 Porovnávanie charakteristík optických vlákien**

V tejto časti sú porovnané charakteristiky troch typy vlákien a vlákna z plastickej hmoty používaného na komunikáciu na veľmi krátke vzdialenosti. Ide o nasledujúce typy vlákien:

#### **A) Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu**

Vyrábajú sa z mnohozložkového skla, alebo sa jedná o dotované kremičité vlákna.

#### **B) Mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu**

Najvýhodnejší priebeh hodnoty indexu lomu u vlákna s plynulou zmenou indexu lomu je parabolický. V praxi sa ale nedá presne dosiahnuť.

#### **C) Jednovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu**

#### **D) Plastické vlákno**

Plastické vlákna sa používajú na krátke vzdialenosti. Sú lacné a ľahko použiteľné. Nie je potrebné ich chrániť ochranou. Majú však pomerne veľký tlmenie a preto sú pre veľa aplikácií v komunikáciách nepoužiteľné.

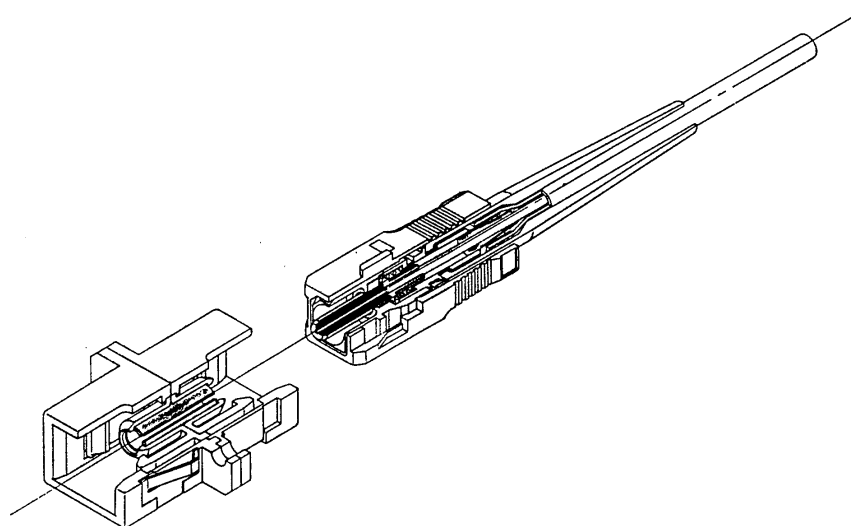
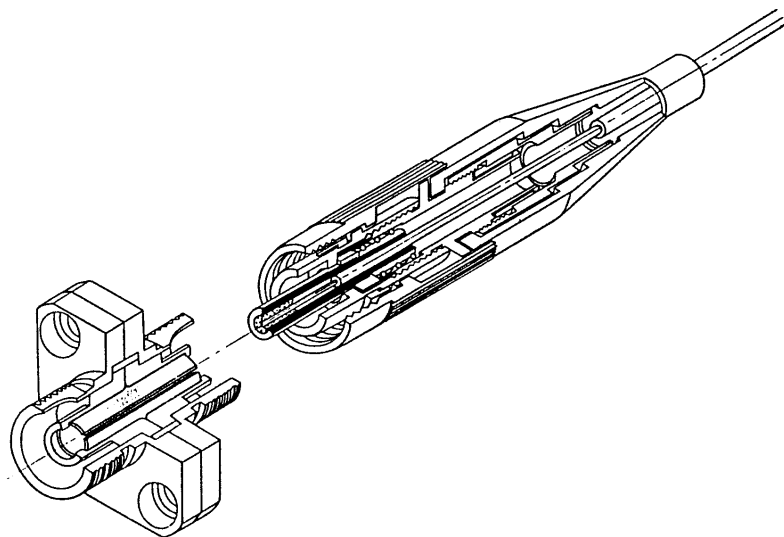
Tabuľka č.3.1 Charakteristiky vlákien

	Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu	Mnohovidové vlákno s plynulou zmenou indexu lomu	Jednovidové vlákno	Plastické vlákno
Priemer plášťa	125 – 500 $\mu\text{m}$	100 – 150 $\mu\text{m}$	50 – 125 $\mu\text{m}$	450 – 1000 $\mu\text{m}$
Priemer jadra	50 – 450 $\mu\text{m}$	30 – 60 $\mu\text{m}$	3 – 10 $\mu\text{m}$	200 – 600 $\mu\text{m}$
Tlmenie	40 dB / km	2 – 10 dB / km	2 – 5 dB / km	350 – 1000 dB / km
Šírka pásma pre 1 km	0,025 GHz	0,15 - 2 GHz	40 GHz	Neudáva sa
Merané pri vlnovej dĺžke	0,85 $\mu\text{m}$	0,85 $\mu\text{m}$	0,85 $\mu\text{m}$	0,65 $\mu\text{m}$
Index lomu jadra	1,48	1,48	1,46	1,5
Index lomu plášťa	1,45	1,46	1,456	1,4

Z hľadiska aplikácií delíme optokomunikačné vlákna:

- 1) Telekomunikačné vlákna pre veľké vzdialenosti.
- 2) Telekomunikačné optické vlákna pre stredné vzdialenosti a miestny styk.
- 3) Optické vlákna pre osvetľovanie, kontrolné, diagnostické a meracia systémy.
- 4) Optické vlákna pre špeciálne systémy (vojenské účely, pozorovacie, prenos obrazu a podobne).
- 5) Optické vlákna pre prenos svetelnej energie (pre lekárske účely – špeciálny skalpel a pod. ).
- 6) Vlákna pre senzorové systémy.

Optické vlákna je potrebné spojovať pomocou špeciálnych konektorov, ktoré musia byť vyrobené veľkou presnosťou.



Obr. 3.15 Niektoré typy konektorov – rez.

Najsledovanejšie parametre pri výrobe každého optického konektora sú:

- Definícia - typ konektora (pre aké účely – na aký typ optického vlákna bude konektor použitý),
- potrebné komponenty pre výrobu daného typu konektora,
- spôsob leštenia konektora.

Komponenty optického konektora:

- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| ▪ Ferula (piestik)  | - Ferrule             |
| ▪ Teleso konektora  | - Connector housing   |
| ▪ Gumová priechodka | - Rubber hood         |
| ▪ Zasúvací konektor | - Plug type connector |
| ▪ Adaptér (spojka)  | - Adaptor             |

**Typy konektorov:**

- FC
- SC
- ST
- SMA
- D4
- E2000

**Druhy leštenia:**

- FC
- PC
- SPC
- UPC
- NPC (Angle PC)

## Leštenie optického konektora

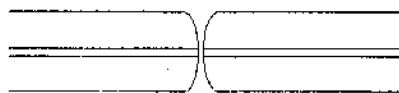
Leštenie optického konektora je jedným z najdôležitejších úkonov pre správne naviazanie optického vlákna do konektora. Od spôsobu a kvality leštenia konektora, do značnej miery závisí tlmenie vnesené zaradením konektora do optickej trasy. Leštenie konektorov sa vykonáva vo výrobe. Optické vlákno po správnom naviazaní do konektora musí asi o 0,1 mm prečnievať od konca konektora. Aj z tohto dôvodu je nutné konektor udržiavať v čistote, prípadne pred pripojením konektora, tento vyčistiť v liehovom roztoku.

Niektoré typy leštenia sú uvedené na obrázku.



FC – Flat polishing

RL typ. 15 dB



PC polishing

RL typ. 35 dB



SPC polishing

RL typ. 45 dB

Fiber Undercut < 0,05 μm



UPC polish polishing

RL typ. 55 dB



NPC Angle polishing

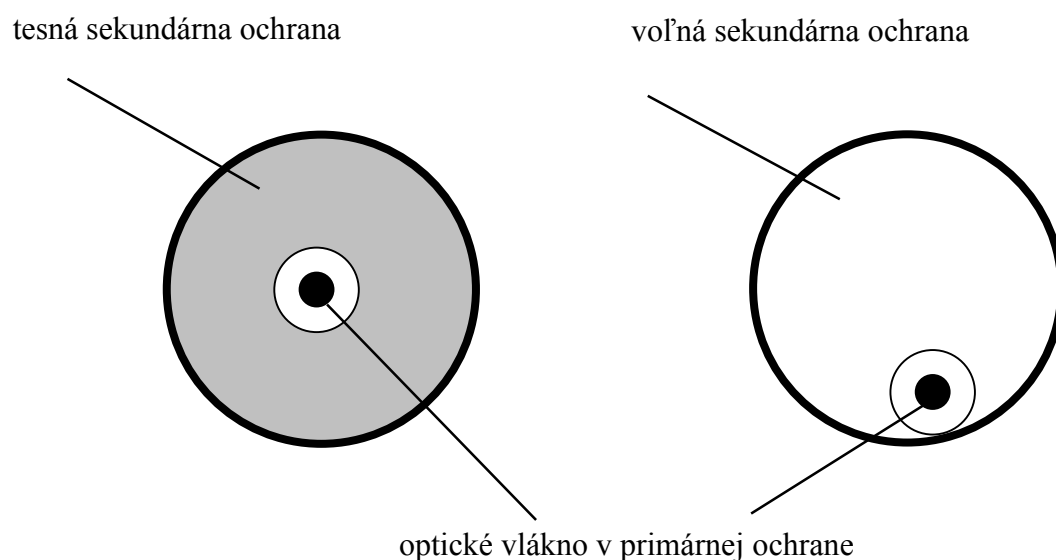
RL typ. 75 dB

Obr. 3.16 Spôsoby leštenia optických konektorov

### 3.3 Optické káble

Pre praktické využitie optických vlákien je potrebné tieto vlákna chrániť pred mechanickým, tepelným a chemickým namáhaním. Vlákna sa preto chránia prostredníctvom vhodne navrhnutých konštrukcií optických káblov.

Optické káble sa môžu skladať z viac ako 100 vlákien s vlastným obalom a sú umiestnene v spoločnom ochrannom obale. Zväčšenie priemeru kábla umožňuje lepšiu manipuláciu. Základnou ochranou optického vlákna je primárna ochrana tvorená až tromi akrylátovými vrstvami nanášanými už pri výrobe vlákna pri procese ťahania vlákna z preformy. Výrobca vlákna nanáša na takto upravené vlákno ďalšiu tzv. sekundárnu ochranu.



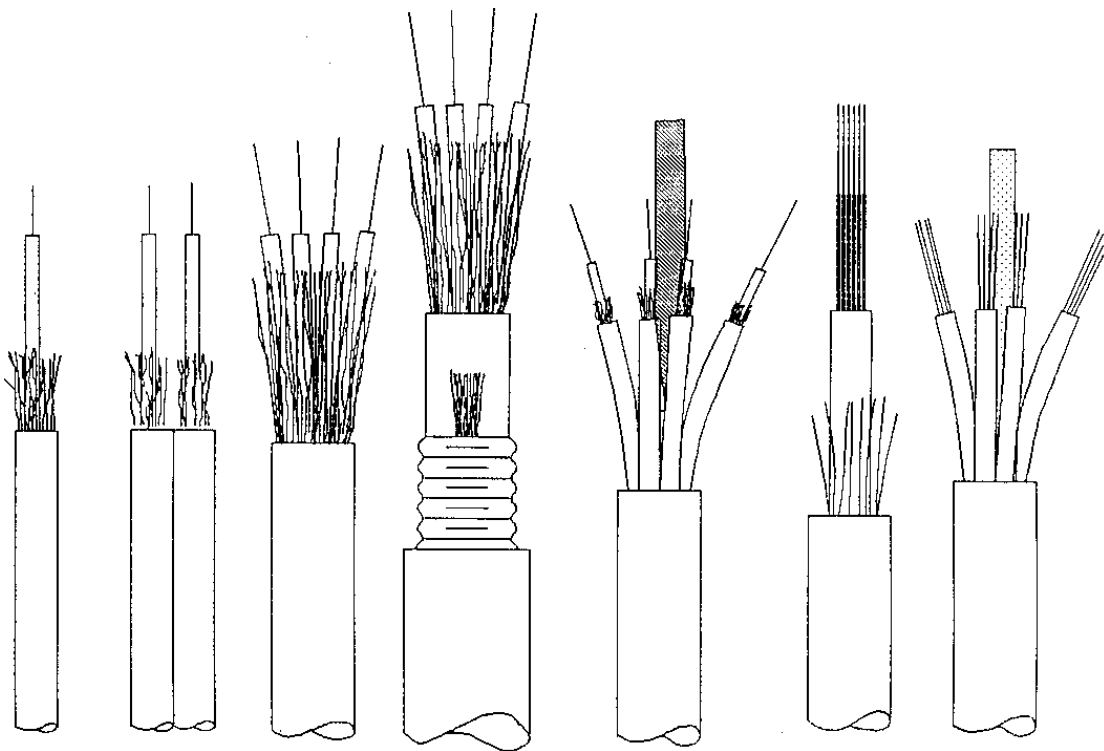
Obr. 3.17 Primárna a sekundárna ochrana optického vlákna

Sekundárna ochrana môže byť pevná, vyrobená z vhodného plastu (PVC, PA 12 a pod.) nanášaná priamo na primárnu ochranu vlákna, alebo voľná ochrana, keď je vlákno (vlákna) uložené do trubičky plnenej spravidla špeciálnym gélom. Gél je tvorený zmesou olejov, alebo silikónovou zmesou, ktorá je odolná proti vlhkosti.

V praxi sa môžeme stretnúť aj so zväzkovými, alebo polymérovými vláknami. Pre prenos dát a telekomunikačné prenosové systémy sa však nehodia. Používajú sa v riadiacich a kontrolných systémoch pre spínanie fototyristorov, ovládanie silových častí lokomotív, lodí, lietadiel, majú miesto v medicíne, ale aj ako dekorácia.

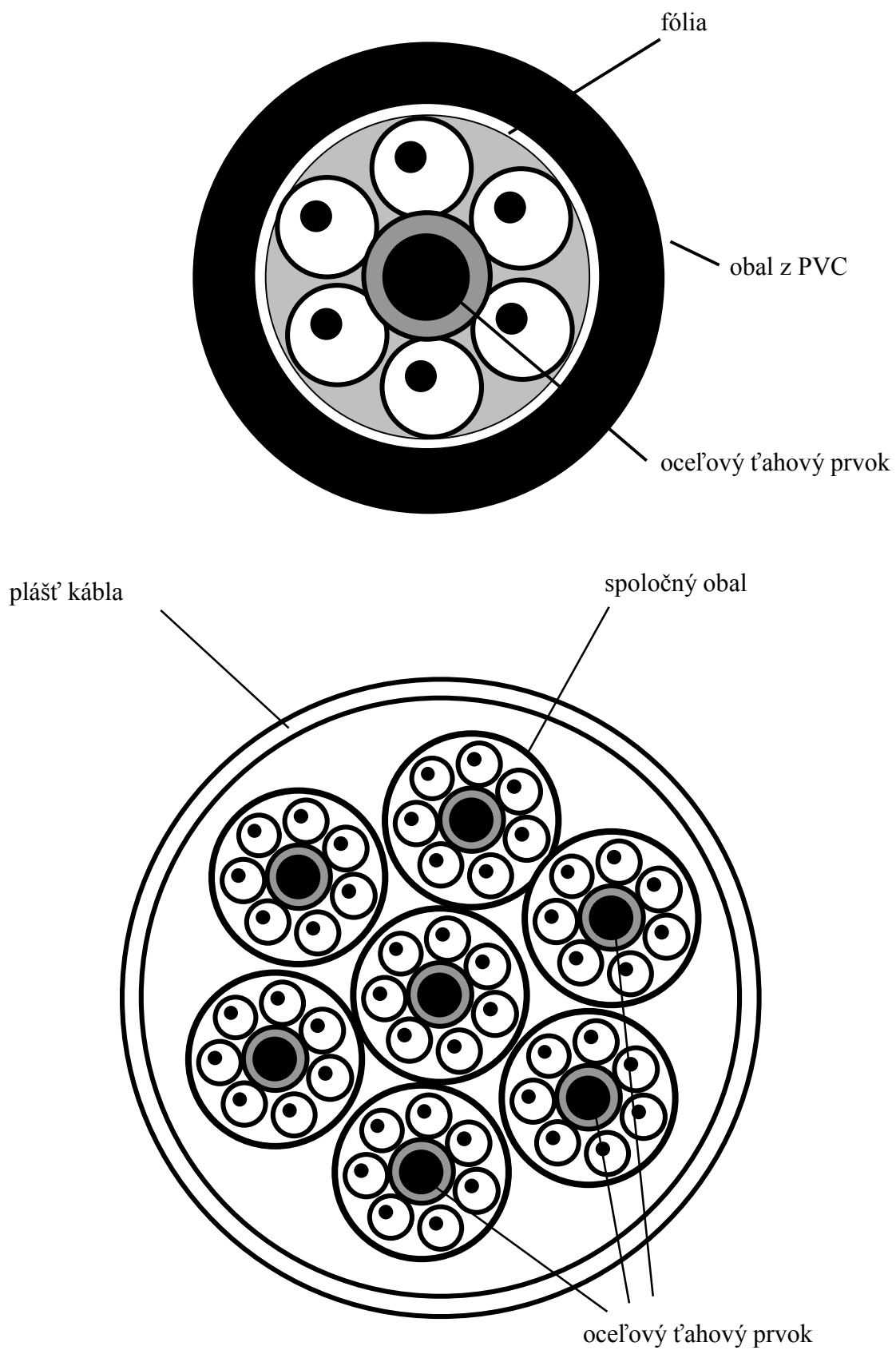
Okrem obalených vlákien sú káble ešte tvorené ďalšími konštrukčnými prvkami a prvkami pre zvýšenie pevnosti. Konštrukčné prvky kábla tvoria spravidla spevňujúce oceľové jadro okolo ktorého sú ovinuté optické vlákna v príslušnej ochrane.

Konštrukcia kábla použitého na výstavbu optokomunikačných trás musí odpovedať konkrétnym požiadavkám na danú aplikáciu. Musí sa rešpektovať očakávané mechanické namáhanie, zmeny teplôt, pôsobenie UV žiarenia, vplyv chemikálií v mieste uloženia kábla a pod. Niektoré konštrukčné typy optických káblov sú uvedené na obrázkoch.



Obr. 3.18 Niektoré typy káblov





Obr. 3.19 Optický kábel so 6 vláknami a kruhový kábel obsahujúci 47 vlákien

### 3.4 Výstavba optických kábelových trás na Slovensku

Výstavba optických kábelových trás je dôležitou prioritou pri vytváraní telekomunikačnej infraštruktúry. Je to prvý a základný kameň pre poskytovanie nových služieb, ktoré vyžadujú stále väčšie prenosové rýchlosti.

Ešte v rokoch 1988-1989 bola plánovaná výstavba koaxiálnych káblov. Politické a hospodárske zmeny v roku 1989 vytvorili vhodné podmienky na odlišné ponímanie a koncipovanie strategických rozvojových zámerov v oblasti telekomunikácií na Slovensku.

V priebehu rokov 1990-1991 sa postupne dospelo k záveru, že najprogressívnejším riešením bude výstavba optických káblov (OPK) a budovanie digitálnych prenosových systémov SDH. Kvôli nedostatočným skúsenostiam sa používajú optické káble s jednovidovými (monomódovými) vláknami bez metalických prvkov, s najmenším tlmením pri vlnových dĺžkach okolo 1550 nm a najmenšou disperziou okolo vlnovej dĺžky 1310 nm. Vychádzalo sa z teoretických znalostiach a praktických skúsenostiach západných výrobcov.

V prvej etape budovania optických prenosových médií, ktoré trvalo do konca roku 1995, bolo vybudovaných asi 1100 km optických káblov, na ktoré boli nasadzované prevážne zariadenia SDH. Prednostne boli zabezpečované trasy pre medzinárodné a národné digitálne spojenia, spravidla 20 vláknovými OPK.

Hlavným dodávateľom pre obdobie od roku 1995 je firma NOKIA. V počiatocnom období nebolo možné využívať výhody kruhovej topológie, ako aj zariadení SDH, a preto prevažná časť zariadení SDH bola nasadzovaná a prevádzkovaná na optických vláknach v jednoduchých ringoch.

V roku 1995 bola spracovaná štúdia budovania optickej prenosovej siete, ktorá stanovila základné podmienky jej budovania s prihliadnutím na:

- maximálne využitie kruhovej topológie,
- kapacitu prognózovanej prevádzky do roku 2005
- počty ADM (add/dropp multiplexorov) ktoré je možné prevádzkovať v jednom kruhu.

Výsledkom štúdie bolo logické usporiadanie prevádzky do hierarchických úrovní, pričom v prípade prevádzkovo a kapacitne dôležitých uzlov boli navrhnuté aj prechody medzi jednotlivými vrstvami pre dosiahnutie väčšej ochrany a bezpečnosti prevádzky. Na základe praktických skúseností bolo zistené, že dodatočné dobudovávanie prípojného diaľkového

optického kábla pre napojenie neskôr budovaných digitálnych spojovacích uzlov je pre kvalitu, spoľahlivosť a bezpečnosť prevádzky 1. a 2. úrovne digitálnej prenosovej siete nevhodné a rizikové. Preto je prevádzka 3. úrovne (regionálna) zabezpečovaná na samostatných oblastných optických kábloch a zároveň sa začala venovať zvýšená pozornosť aj riadeniu siete a jej synchronizácii.

V druhej etape budovania optických prenosových médií v rokoch 1996-1997 bolo vybudovaných 2500 km optických káblov. To viedlo ku zostaveniu kruhovej topológie pre SDH.

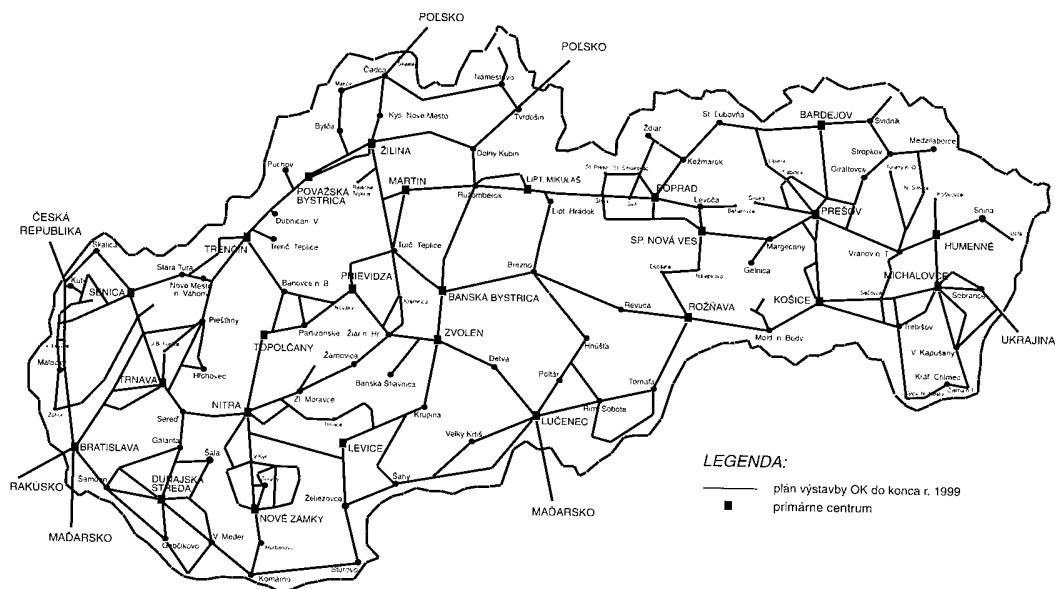
Postupne bolo potrebné prekvalifikovať existujúcu 3. regionálnu úroveň digitálnej prenosovej siete na primárnu časť prístupovej siete a prevádzku zabezpečovanú samostatnými OPK na miestnej úrovni (miestny optický kábel) na sekundárnu časť optickej prístupovej siete. Bolo taktiež prekvalifikované pôvodne plánované 20-vláknové OPK na 40-vláknové.

Potreba budovania optickej prístupovej siete je vyvolaná nutnosťou zabezpečenia optimálnych podmienok pre možnosť pružného reagovania na požiadavky zákazníkov o nové služby.

Optická prenosová sieť v súčasnosti pozostáva z transportnej a prístupovej siete a je tvorená 4 úrovňami, a to:

- ◆ **úroveň – národná transportná sieť** – zabezpečuje prevádzku medzinárodnú, prevádzku medzi tranzitnými ústredňami (DTÚ) a prevádzku s najvyšším stupňom zabezpečenia (širokopásmová prevádzka, dátové prenosy, okruhy pre mobilných operátorov a pod.),
- ◆ **úroveň – regionálna transportná sieť** – zabezpečuje prevádzku medzi DTÚ a hlavnými ústredňami (HOST) a prevádzku medzi príslušnými HOST. Ochrana prevádzky je zabezpečená prostredníctvom uzlov zabezpečujúcich prechod do vyššej, resp. nižšej úrovne siete. Túto vrstvu tvoria uzly s HOST, uzly s prechodom do vyššej, resp. nižšej úrovne siete a mestá s veľkými vzdialenými účastníckymi jednotkami (RSU),
- ◆ **úroveň – primárna časť prístupovej siete** – zabezpečuje prevádzku medzi HOST a uzlami prístupovej siete,
- ◆ **úroveň – sekundárna časť prístupovej siete** – zabezpečuje prevádzku medzi uzlami prístupovej siete a zákazníkmi.

Na zabezpečenie čo najväčšej bezpečnosti prevádzky transportnej a prístupovej siete sa buduje prenosová sieť tak, aby sa mohli vytvárať v čo najväčšej miere samostatné fyzické kruhy minimálne pre prvé tri úrovne prenosovej digitálnej siete.



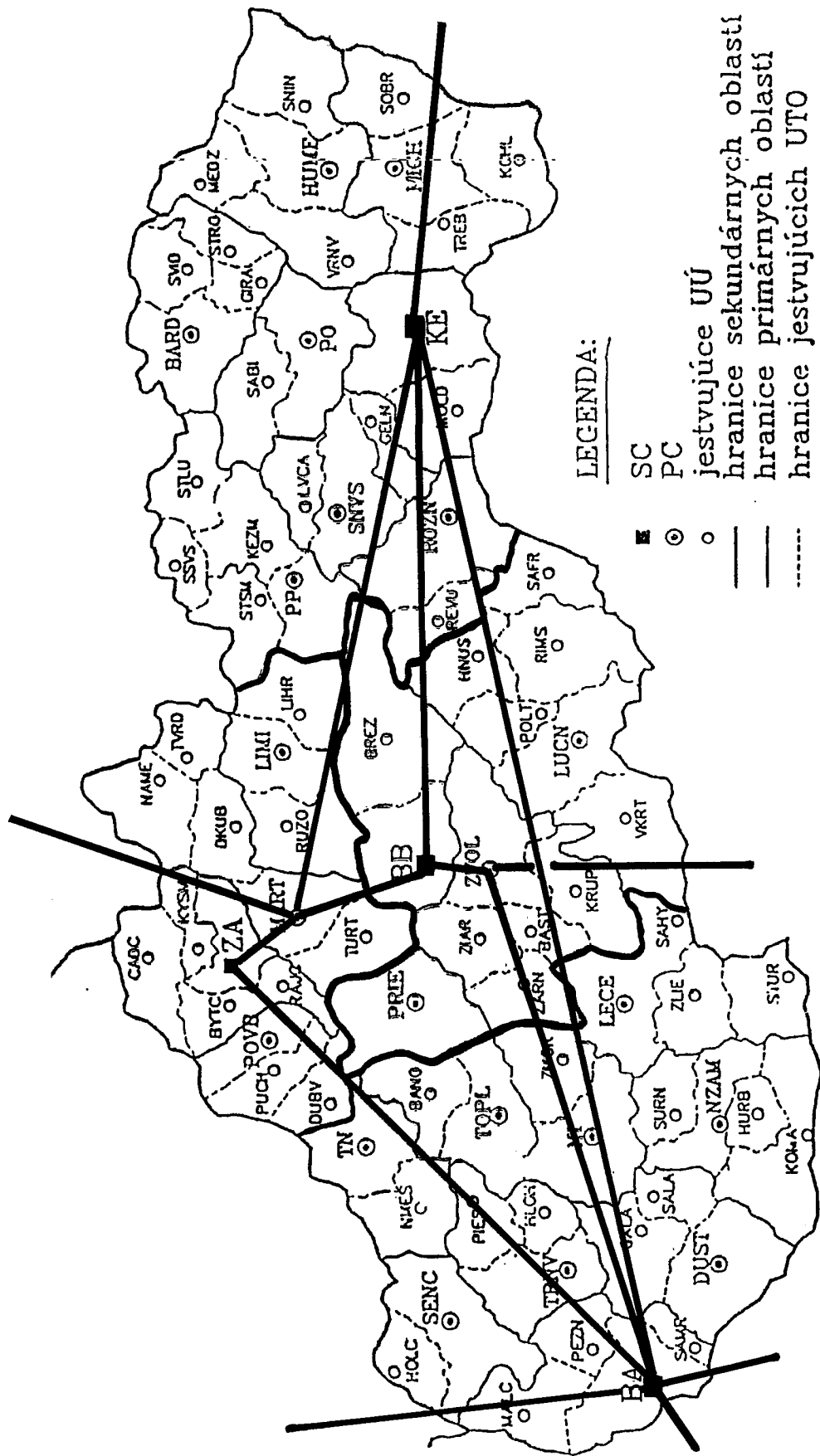
Obr. 3.20 Sieť všetkých optických káblov (stav z roku 1999)

Cieľom pri budovaní bolo zabezpečiť optické prepojenie všetkých uzlov so sídlom primárnej oblasti dvoma nezávislými cestami, čo bolo splnené.

Začala sa budovať optická prístupová sieť. Na zabezpečenie širokopásmových služieb je potrebné vybudovať veľké množstvo OPK.

Kvôli časovej a ekonomickej náročnosti boli dohodnuté nasledovné pravidlá výstavby pri maximálnom využití existujúcej metallickej siete:

- ◆ Ak je potrebné budovať nový kábel, budovať len optický.
- ◆ Budovať optické káble všade tam, kde existujúce metalické káble kapacitne nepostačujú ani po nasadení PCM 1. rádu.
- ◆ Budovať multiplexné zariadenia na metalických kábloch všade tam, kde podľa prognózy budú kapacitne postačovať min. 2 roky.



Obr.3.21 Hlavné optické trasy spájajúce sekundárne centrá telekomunikačnej siete

V nedostupných oblastiach sa budú budovať rádiové prístupové systémy.

Súčasný trendy naznačujú, že je možné očakávať zväčšený nárast požiadaviek od zákazníkov najmä na nové služby (ISDN, multimédia, dátové diaľnice...). Preto ak si chce hlavný poskytovateľ telekomunikačných služieb na Slovensku udržať popredné miesto aj po očakávanej liberalizácii telekomunikačného trhu, musí svoje aktivity zamerať v prvom rade na včasné a komplexné dobudovanie kvalitnej optickej prenosovej siete.

## 4. ZDROJE A DETEKTORY OPTICKÉHO ŽIARENIA

### 4.1 Zdroje optického žiarenia

K zdrojom so spojitým spektrom patrí Slnko, lenže iba vo svojom jadre. Skôr ako svetlo opustí Slnko, sú niektoré vlnové dĺžky absorbované plynmi existujúcimi na povrchu a tým sú zo spektra odstránené. Tento proces sa opakuje pri prechode svetla zemskou atmosférou. Vzťah medzi absorbovanou vlnovou dĺžkou a absorbovaným plynom je daný atómovými konštantami plynov a môžeme ich vypočítať. Tmavé pásy v slnečnom spektre nazývame Frauehoferove čiary. Z týchto pásov v spojitom spektre môžu astronómovia predpokladať existenciu určitých plynov, ktoré odpovedajú chýbajúcim vlnovým dĺžkam spektra.

Pre potreby optokomunikačných systémov uplatňujúcich sa v telekomunikáciách sa budeme podrobnejšie zaoberať polovodičovými zdrojmi optického žiarenia.

#### 4.1.1 Polovodičové zdroje optického žiarenia

Najlacnejšie a preto veľmi často používané zdroje pre optokomunikačné systémy sa využívajú svetlo emitujúce diódy (Light Emitting Diode – LED). Je potrebné povedať, že prenosová rýchlosť s použitím LED je nižšia ako pri použití laserov.

Konstruktívne sa materiály pre LED volia tak, aby emitovali svetlo v oblasti blízkej infračervenému žiareniu. Prvé LED pre optiku boli gálium arzenidové (GaAs) a používali sa v 60-tých rokoch. Emitovali svetlo v rozsahu 880 nm až 910 nm. Nízka citlivosť prechodu na zmeny prúdu v priepustnom smere spôsobila zníženie prenosovej rýchlosti asi na 5Mbit/s. Preto sa začali vyrábať gálium arzenidové LED s heterogénnym prechodom s vrstvou dotovanou hliníkom. Emitujú svetlo v pásme 550 – 900 nm a prenosová rýchlosť vzrastie na 100 Mbit/s.

Vo vysielacích systémoch pre optické vlákna sa používajú štyri základné typy LED:

- a) obyčajné plošné (planar), alebo tiež čelne emitujúce,
- b) hranovo emitujúce (edge),
- c) polkruhové MESA (dome),

d) burrusove.

Charakteristika základných typov LED:

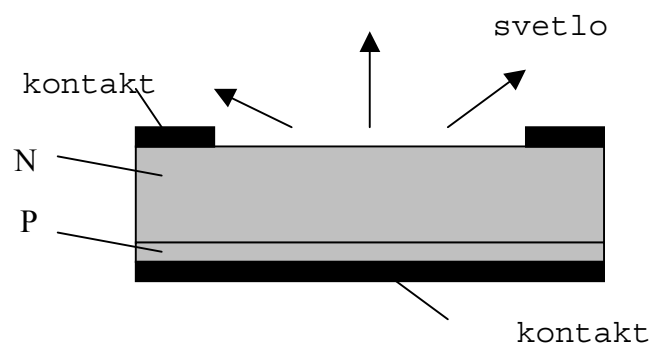
a) Obyčajné plošné (planár), alebo čelne emitujúce, označované ako S-LED majú potenciálne najvyššiu prenosovú rýchlosť, ale majú príliš veľkú plochu emitujúceho svetla, čo pri určitom prúde v priepustnom smere spôsobuje, že emitujú menej svetla než ostatné typy LED.

b) Hranovo emitujúce E-LED produkujú väčšinu svojho svetla bočnými stenami. Napriek tomu, že produkujú menej svetla než čelne emitujúce LED, ich geometria umožňuje sústrediť do vlákna viac svetla. Všeobecne tento typ poskytuje dobrú šírku pásma pre moduláciu.

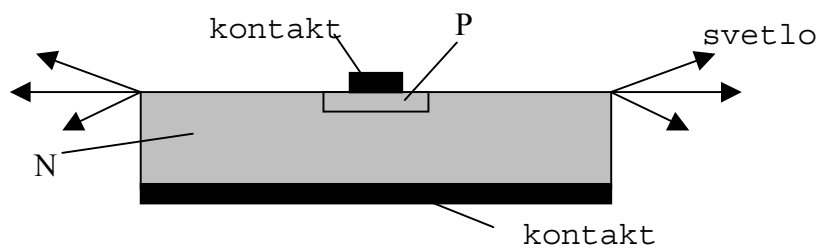
c) Polkruhové typy LED sú účinnejšie vďaka svojej geometrii. Prechod medzi materiálmi typu P a N je konštruovaný ako pologuľa. Toto zaisťuje, že žiarenie nedopadá na rozhranie LED/epoxid pod uhlom, ktorý by prekročil medzný uhol. U niektorých LED tohto typu je materiál typu N formovaný do podoby kužeľa. LED tohto typu sú výrobné náročné a používajú sa iba ako svetelný zdroj pre zväzky optických vlákien.

d) Typ Burrus (B-LED) boli vynájdené Burrusom v roku 1970. Sú vylepšením plošného emitovania a bežne sa používajú ako svetelné zdroje pre jednotlivé vlákna. Do vrchnej plochy polovodiča typu N je vyleptaná priehlbina a do nej je vložené optické vlákno. Jadro vlákna je tak priložené priamo k oblasti LED, ktorá emituje svetlo. Väčšina svetla emitovaného prechodom je preto zachytená vláknom. Osová odchýlka  $45^\circ$  spôsobí stratu iba polovice svetla, ktoré by mohlo do vlákna vstupovať. Nedostatkou použitia Burrusovej LED diódy je potreba reflektoru pre kolimáciu svetla do jadra optického vlákna. Výroba Burrusovej LED diódy s homogénnym prechodom je relatívne nekomplikovaná, výroba Burrusovej LED s heterogénnym prechodom je dosť zložitá.



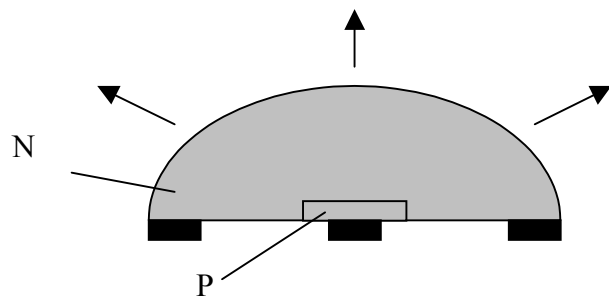


a) ČELNE EMITUJÚCA

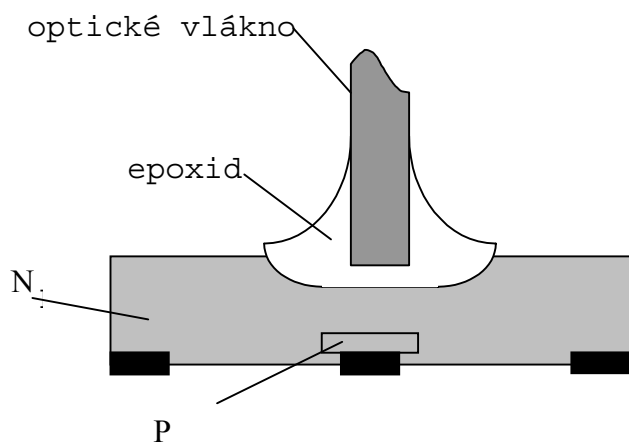


b) HRANOVO EMITUJÚCA

Obr. 4.1. a, b Typy LED



c) POLOKRUHOVÁ

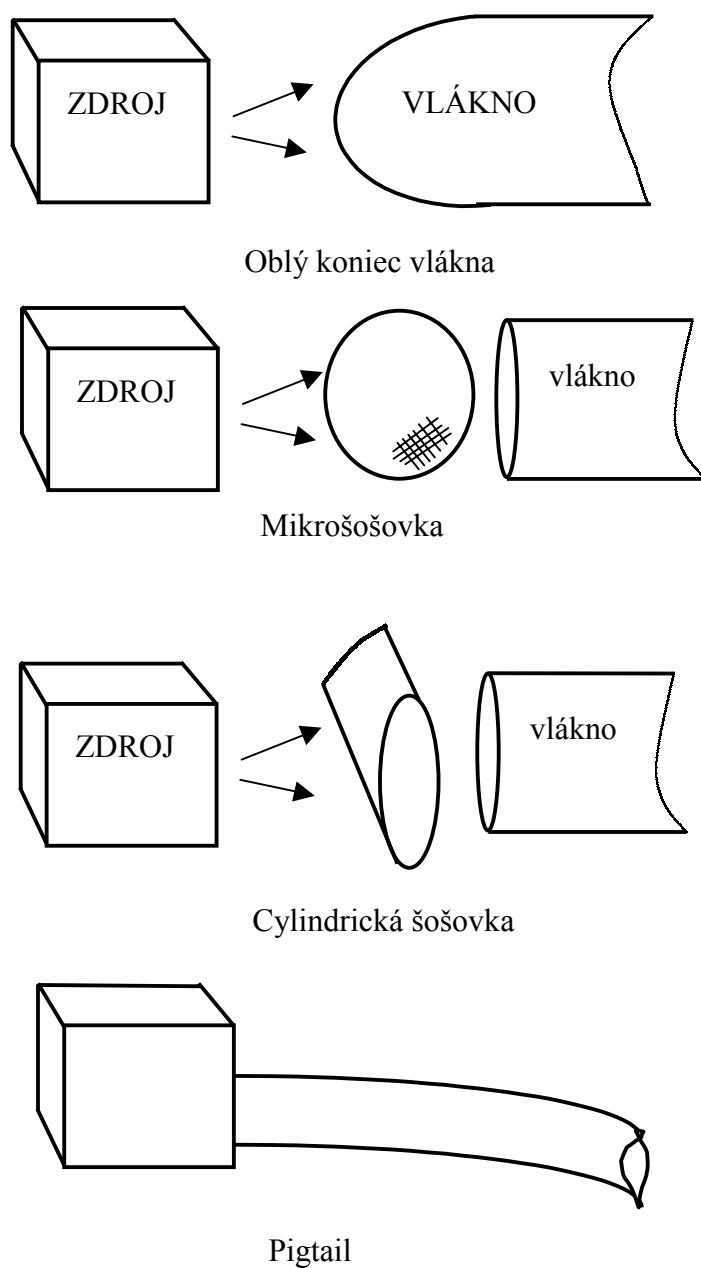


d) BURRUSOVA

Obr. 4.1.c, d Typy LED

## 4.1.2 Spojenie LED – optické vlákno

Množstvo vstupujúceho svetla môže byť zvýšené vložení mikro šošovky do spojenia, alebo využitím vlákna so zaobleným koncom. Zdroje svetla sa často predávajú ako jeden celok s krátkym optickým vláknom. Tento konštrukčný celok sa nazýva pigtail. Ak je k dispozícii presný nástroj pre spojovanie vlákien, je jednoduchšie spojiť dve vlákna, než spojovať priamo vlákno so zdrojom svetla.



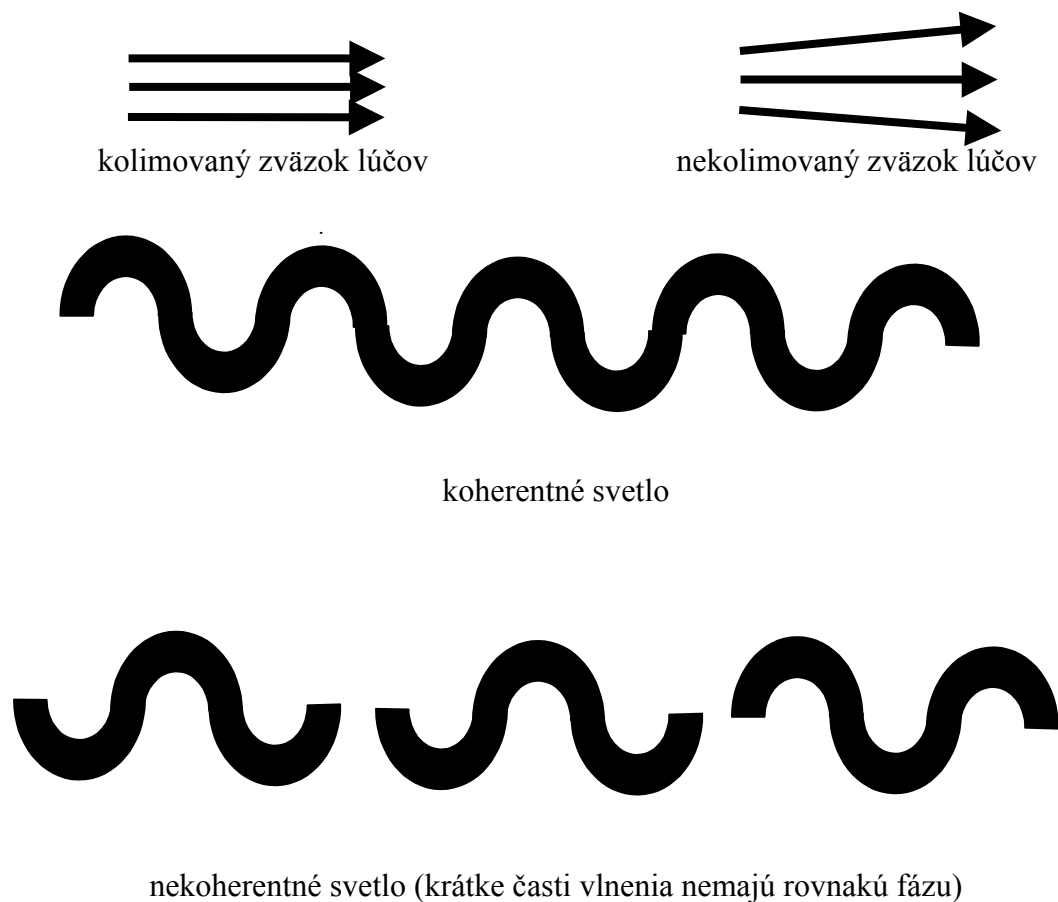
Obr. 4.2 Spojenia zdroj – vlákno

### 4.1.3 Laserové diódy ILD (Injection Laser Diodes)

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) znamená zosilnenie svetla vynútenou emisiou žiarenia. Existuje veľa typov laserov napríklad:

rubínový, hélium-neónový, pevný, polovodičový, ...

Polovodičové lasery (ILD) sú typy ktoré majú vhodne malú oblasť emitujúcu svetlo pre pripojenie optických vlákien. ILD sú iba špeciálne formy LED. Hlavný rozdiel medzi ILD a LED je optická rezonančná dutina v ILD. Svetelné žiarenie sa tak odráža od oboch koncov dutiny. Spôsobí tak vynútenú stimulovanú emisiu a zaisťuje, že emitovaný svetelný zväzok má všetky lúče rovnobežné. U iných typov laserov je rovnobežnosť lúčov dosiahnutá použitím dvoch paralelných, presne nastavených zrkadiel. Svetlo generované laserom je viac monochromatické než svetlo generované inými metódami. Okrem už uvedenej kolimácie (rovnobežnosť lúčov), je tiež koherentné. Takýto zväzok lúčov nie je divergentný (rozbiehavý), ako u lúčov kde nie je zabezpečená kolimácia.



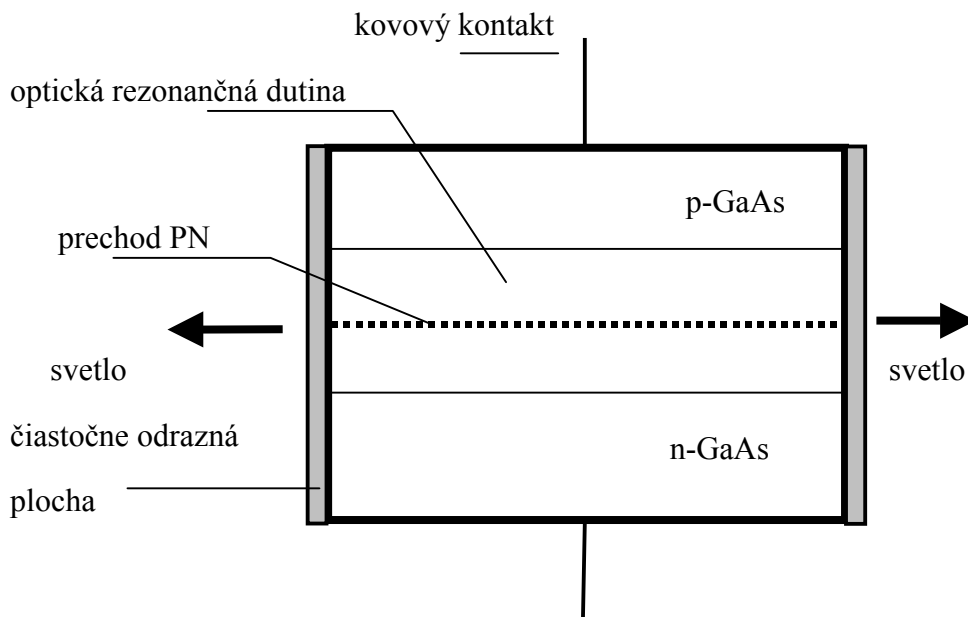
Obr. 4.3 Kolimácia a koherentnosť svetla

#### 4.1.4 Konštrukcia a činnosť ILD

ILD funguje ako svetlo emitujúca dióda pri veľmi nízkych prúdoch v priepustnom smere. Pri takýchto nízkych prúdoch by mohla byť ILD považovaná za hranovo emitujúcu (edge) LED diódu. Až pri vyšších prúdoch začína jav zvaný laserovanie (laserový jav). Prúd pri ktorom začína tento jav sa nazýva „prah laserovania“ (prah stimulovanej emisie).

Z časticovej teórie svetla vyplýva, že fotóny môžu byť emitované z excitovaných atómov dvoma spôsobmi:

- 1) samovoľnou (spontánnou) emisiou,
- 2) vynútenou (stimulovanou) emisiou.



Obr. 4.4 Jednoduchá ILD dióda s homogénnym prechodom

Na obrázku 4.4 je jednoduchá ILD dióda, kde fotóny sa hromadia v optickej rezonančnej dutine a keď dôjde k inverzii populácie (population inversion ) laser vyžiari svetlo. Za normálnych podmienok je vo svetelnom zdroji excitovaných atómov omnoho menej, než atómov v základnom stave. Za určitých podmienok môže byť táto situácia opačná. Väčšina atómov je v excitovanom stave a práve táto situácia sa nazýva „inverzia populácie“ (inverzia obsadenia energetických hladín). Takáto situácia nastane u ILD keď je viac fotónov vytváraných stimulovanou emisiou než spontánnou. Práve z tohto javu vzniká i názov LASER – zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia.

Poznáme veľa rôznych typov ILD. Väčšina variánt vychádza z dvojitého heterogénneho prechodu. Patria sem ILD s veľkou optickou dutinou, úzkymi pásmi, alebo zvlňenými vrstvami, ako mesa diódy s rozloženou spätnou väzbou – DFB (Distributed Feedback Lasers). DFB je v systémoch s optickými vláknami veľmi často používaná. Vlnová dĺžka svetla emitovaného v DFB je daná vzdialenosťou medzi vlnami zvlňenej vrstvy.

Spojenia ILD s optickým vláknom veľmi často používajú na spojenie zaoblené konce vlákna, alebo cylindrické šošovky. Celkovo však možno konštatovať, že použitie laserového svetla vedie ku zníženiu strát na spojenie laser- vlákno.

#### **4.1.5 Použitie nevhodného zdroja a niektoré praktické poznatky**

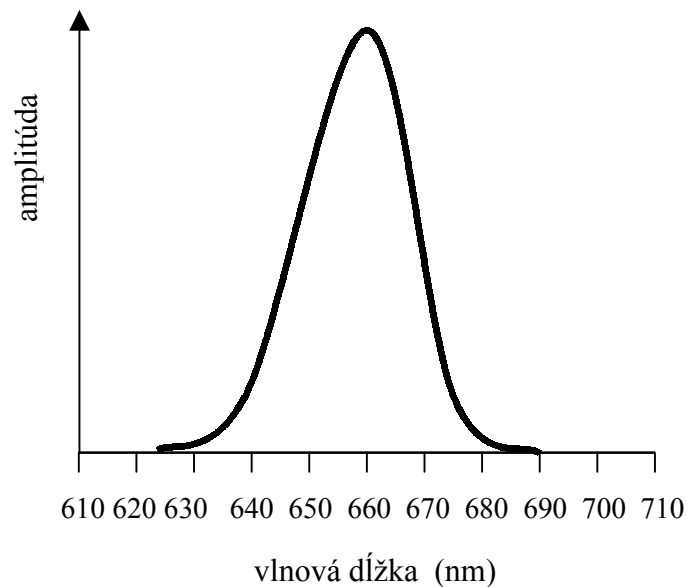
##### **Použitie nevhodného zdroja svetla môže mať tieto dôsledky:**

- Svetlo na druhom konci kábla je príliš slabé (vplyvom veľkého útlmu zvolenej vlnovej dĺžky vo vlákne),
- dochádza k obmedzovaniu prenosovej rýchlosti (vplyvom chromatickej, alebo vidovej disperzie),
- môže dochádzať k veľkým stratám na spojenie zdroj – vlákno,
- môže dôjsť k zamedzeniu prenosu analógových signálov (vplyvom neschopnosti zdroja byť modulovaný).

### Niektoré praktické poznatky:

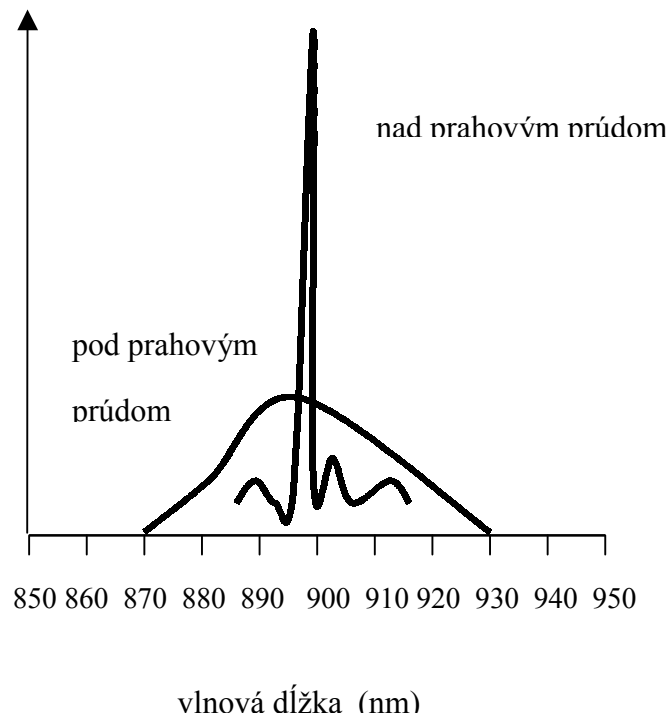
- Je potrebné zaistiť aby prijímač na druhom konci vlákna bol schopný detekovať svetlo tej vlnovej dĺžky, ktorú zdroj emituje a zároveň, aby zdroj emitoval svetlo vlnovej dĺžky, ktorá nemá v danom type vlákna príliš veľký útlm,
- LED diódy emitujú svetlo vlnovej dĺžky 500 – 1600 nm so šírkou spektra 20 – 70 nm. Polovodičové lasery emitujú svetlo vlnových dĺžok 800 – 1600 nm so šírkou spektra 0,5 – 3 nm.

#### a) GeAsP LED



Obr. 4.5.a Spektrálne rozloženie pre LED diódy

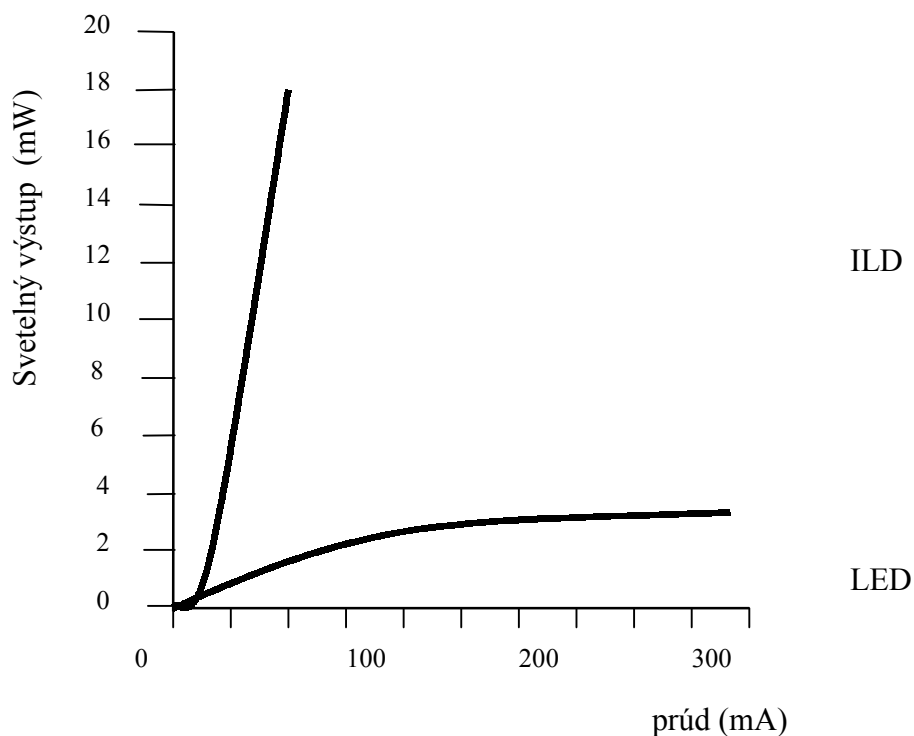
## b) GaAs laserová dióda



Obr. 4.5.b Spektrálne rozloženie pre ILD diódy

- množstvo emitovaného svetla sa obvykle meria v miliwatoch (mW) a skutočné množstvo svetla, ktoré je generované z LED i ILD je obvykle rovnaké, rozdiel je v množstve svetla, ktoré môže byť sústredené do vlákna,
- svetlo ktoré nie je do vlákna smerované je nenávratne stratené,
- apertúra je číselné vyjadrenie udávajúce relatívnu intenzitu vysielaného svetla v rôznych uhloch vzhľadom na emitujúci zdroj, čiže ak nie je osová odchýlka a číselná apertúra malá, takmer všetko svetlo zo zdroja by malo vstupovať do vlákna,





Obr. 4.6 Porovnanie závislosti svetelného výstupu od prúdu pre LED a ILD

- LED majú väčšiu životnosť ako ILD,
- zvyšujúcou sa teplotou sa zvyšuje vodivosť polovodičov a vlnová dĺžka emitovaného žiarenia sa zvyšuje, pričom zmeny vlnovej dĺžky môžu byť až  $0,25 \text{ nm} / ^\circ\text{C}$ ,
- prekročenie určitej hodnoty prúdu v priepustnom smere spôsobí hlavne u ILD zničenie čipu, preto je potrebné zaradiť ochranné obvody,
- ILD majú vyššiu spotrebu elektrickej energie,
- prekročenie množstva svetla (jedná sa však rádovo o  $\text{MW} / \text{cm}^2$ ) dopadajúceho na koncové zrkadlá sa nazýva „kritická degradácia zrkadiel“ (catastrophic degradation) a môže spôsobiť úplné zničenie ILD.

## 4.2 DETEKTORY SVETLA

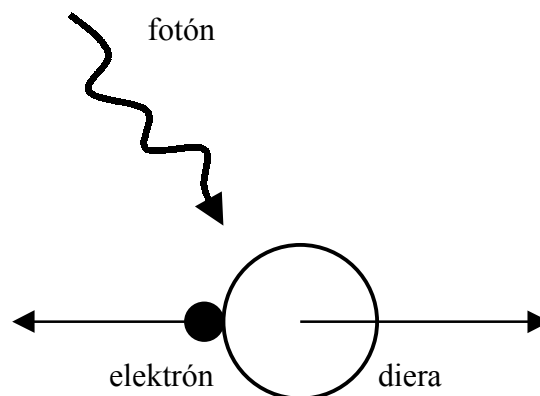
Informáciu v tvare digitálneho signálu, ktorá je prenášaná cez optické vlákno vo forme svetelných impulzov, je potrebné na konci vlákna detekovať. Na tento účel sa využívajú detektory svetla.

Detektor svetla je v podstate druhom prevodníka, t.j. zariadenie, ktoré transformuje fyzikálnu veličinu - svetlo na elektrický signál. Pri vývoji komunikačných systémov s optickými vláknami sa objavil nedostatok detektorov svetla vhodných pre vysokú rýchlosť dát vysielaných zdrojmi svetla ako sú LED, alebo ILD. Preto boli pre komunikačné systémy s optickými vláknami vyvíjané fotodiódy PN, ktoré sú z hľadiska schopnosti detekovať zmeny pri prenosovej rýchlosti dát väčšie ako stovky bit/s dosť kvalitné.

Najdôležitejšou vlastnosťou detektora je **lineárna citlivosť** (zmeny na vstupe by mali spôsobiť proporcionálne zmeny na výstupe). Niektoré staršie typy fotodiód, ako aj fototranzistory takéto vlastnosti (ako je detekcia zmien pri vysokých rýchlostiach a lineárna citlivosť) nemali a preto sa už nepoužívajú.

Okrem fotodiód PN boli vyvinuté aj ich rôzne varianty, vrátane fotodiód PIN a lavínových diód.

Elektrický prúd je výsledkom pohybu voľných nosičov elektrického náboja. Model detekčného zariadenia je založený na vytvorení páru voľných nosičov elektrónu a diery pomocou energie fotónu.



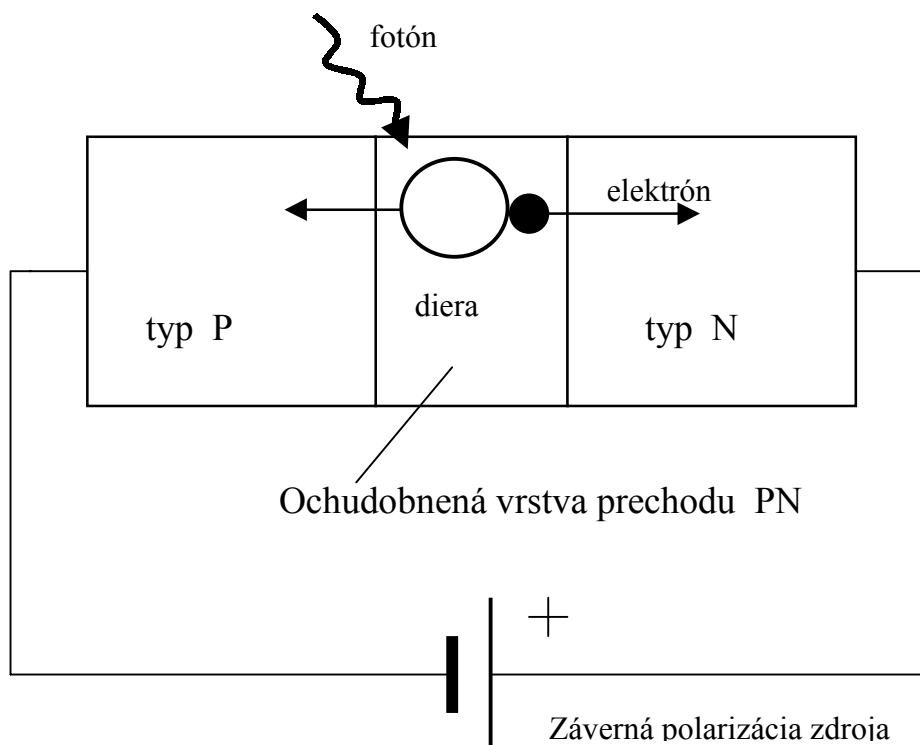
Obr. 4.7 Princíp detekcie svetla

Spojený pár elektrón-diera absorbuje dopadajúci fotón. Energia dopadnutého fotónu je využitá na oddelenie nosičov náboja, čo spôsobí tok elektrického prúdu. Na takomto princípe je svetelná energia transformovaná na elektrickú.

#### 4.2.1 Fotodiódy PN

Za vhodných podmienok vyvolávajú fotóny dopadajúce na fotodiódu tok elektrického prúdu. Ide o jednu z ďalších možností správania prúdu a fotónov na prechode PN. Veľkosť prúdu je úmerná počtu dopadajúcich fotónov. Na tomto základnom princípe pracujú fotodiódy PN, PIN a lavínové diódy.

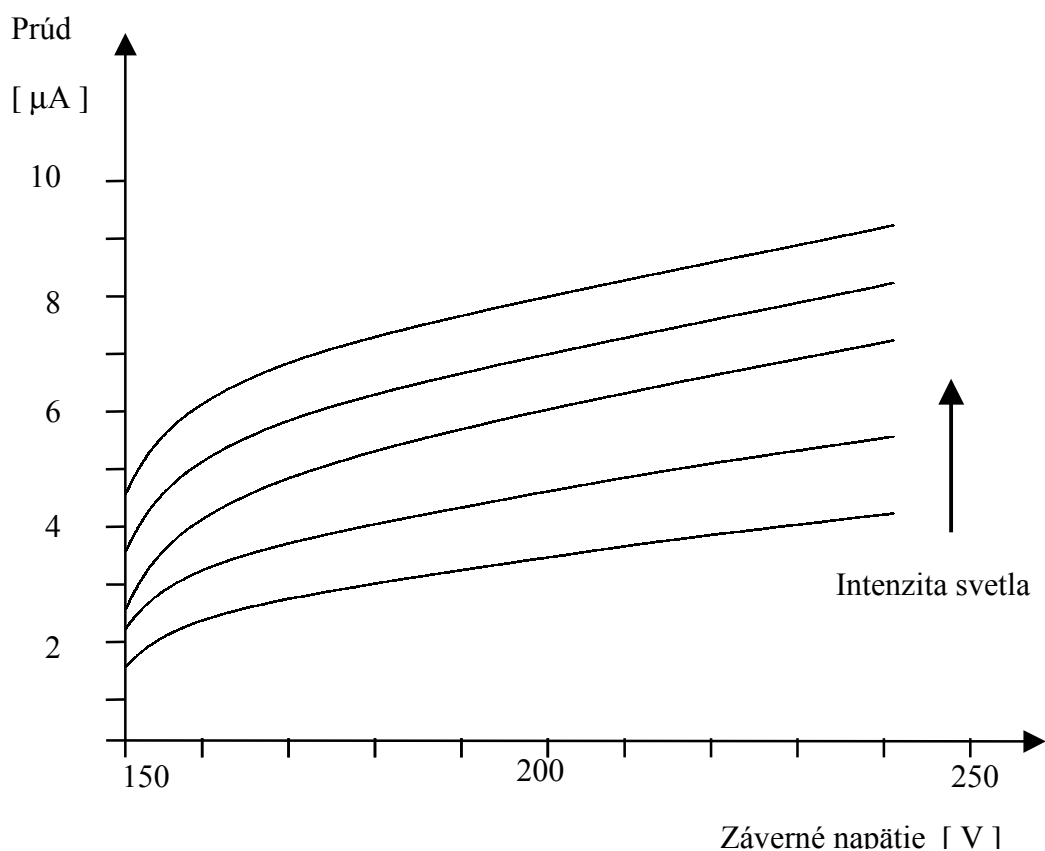
Ak je fotodióda polarizovaná v závernom smere, tečie ňou veľmi malý (takmer žiadny) prúd. Voľné elektróny na okraji prechodu PN rekombinujú s dierami a vytvárajú tak v strede oblasť bez voľných nosičov elektrického náboja. Táto oblasť sa nazýva **ochudobnená oblasť**. Táto vrstva vykazuje v závernom smere vlastnosti izolantu.



Obr. 4.8 Dopad fotónov na ochudobnenú oblasť prechodu PN

Malý prúd, ktorý prechodom tečie sa nazýva **prúd za tmy**. Pri zvýšení záverného napätia rastie len mierne. Pri ďalšom zvyšovaní napätia môže dôjsť k prierazu t.j. poškodeniu prechodu PN.

Dopadajúce fotóny poskytujú energiu, ktorá vytvára páry voľných elektrónov a dier. To umožňuje vznik toku elektrického prúdu. Oddelené nosiče sú opačnou polaritou priťahované na opačné konce fotodiódy - vzniká tok prúdu v závernom smere. Čím viac fotónov dopadne na prechod P-N, tým je viac voľných nosičov a tým je väčší záverný prúd.



Obr.4.9 Voltampérová charakteristika fotodiódy PN

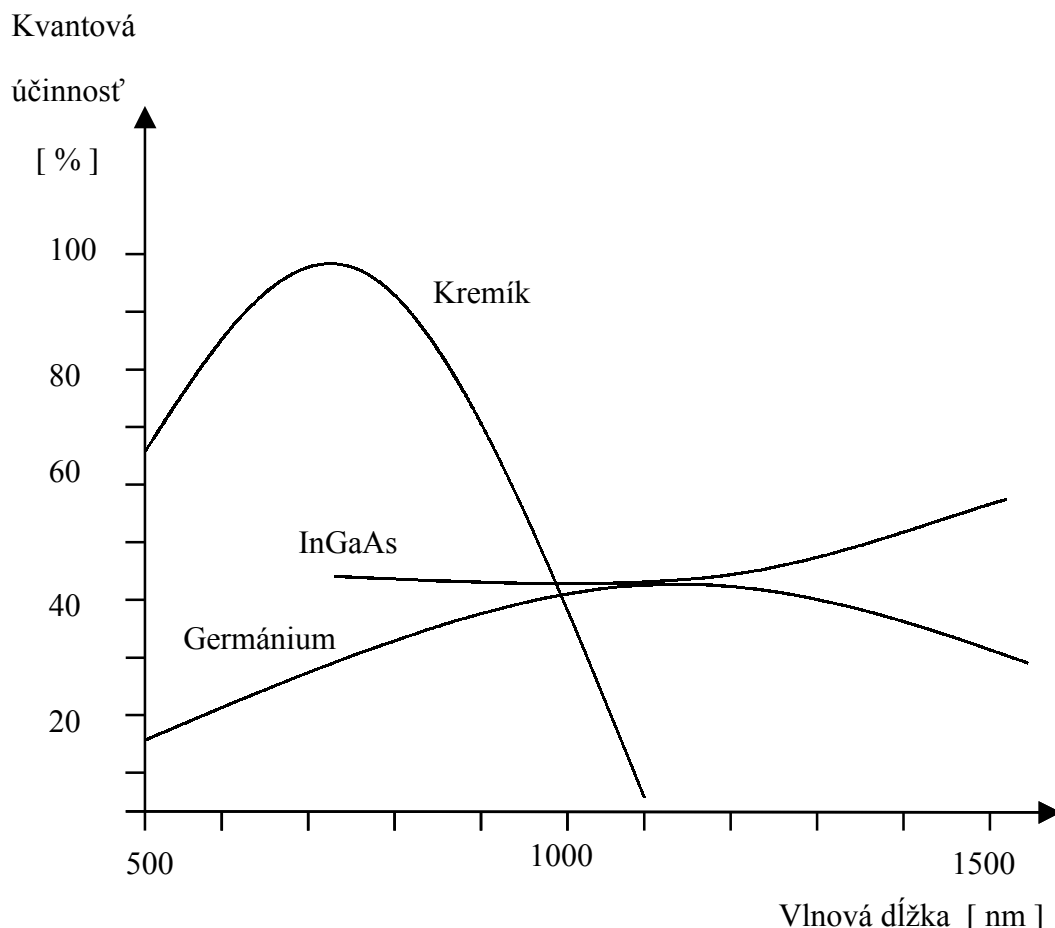
Detektory PN majú dlhý čas odozvy na zmenu svetla (až 30 µs). Majú aj veľký prúd za tmy, čo má za následok vysokú hladinu šumu. Sú vhodné len na detekciu svetla prenášaného na malé vzdialenosti.

## Polovodičové materiály pre fotodiódy

Dôležitým faktorom pri konštrukcii fotodiód (PN, PIN a lavínových diód), ktorý ovplyvňuje ich svetelnú účinnosť (kvantová účinnosť) pre danú vlnovú dĺžku prijímaného svetla, je aj druh polovodičového materiálu z ktorého sú vyrábané.

**Kvantová účinnosť** je určená percentom dopadajúcich fotónov, ktoré vytvárajú voľné nosiče náboja (elektróny a diery), schopné vytvárať tok prúdu.

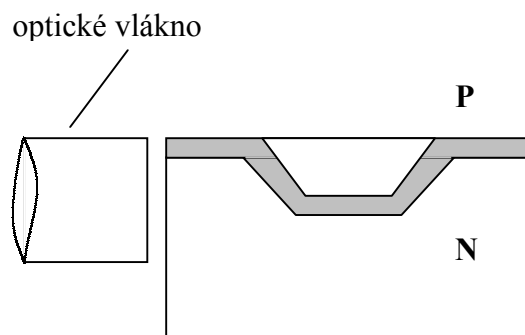
Najčastejšie používané polovodičové materiály sú kremík (silicon), germánium a InGaAs (Indium Gallium Arsenit). Pre vlnové dĺžky používané v súčasných prenosových systémoch (1000-1550 nm) sú najvhodnejšie zlúčeniny InGaAs.



Obr. 4.10 Kvantová účinnosť fotodiód vzhľadom na type materiálu

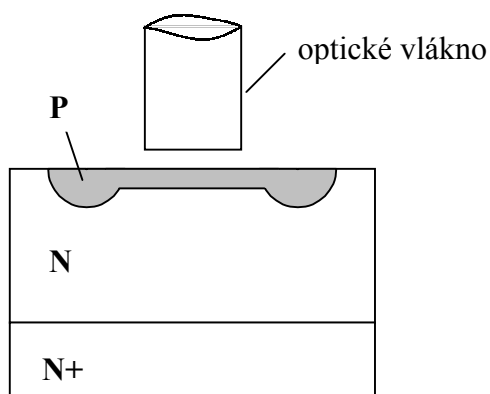
## Základné typy fotodiód PN

Z hľadiska usporiadania sa používajú fotodiódy s tzv. bočným osvetlením, ktoré zvýšili kvantovú účinnosť predovšetkým pre väčšie vlnové dĺžky svetla. Pritom veľkosť ochudobnenej oblasti nie je potrebné meniť.



Obr. 4.11 Fotodióda s bočným osvetlením

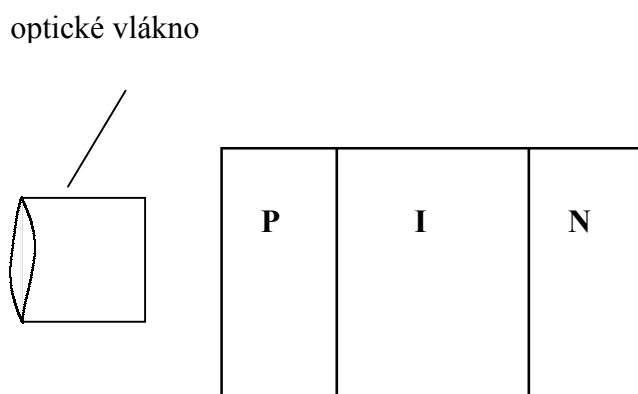
Ďalším používaným usporiadaním je fotodióda s ochranným prstencom. Ochranný prstenec zabraňuje pohlcovaniu fotónov na okraji prechodu. Pohlcovanie vo vnútri diódy spôsobuje lineárnejšiu odozvu fotodiódy. Príklady usporiadania fotodiód sú na obrázkoch.



Obr. 4.12 Fotodióda s ochranným prstencom

## 4.2.2 Fotodiódy PIN

Čím väčšia je vlnová dĺžka, tým hlbšie musí svetlo vniknúť, aby bolo pohltené. To znamená, že na detekciu svetla s veľkou vlnovou dĺžkou musí byť zväčšená hĺbka ochudobnenej oblasti. To je možné najúčinnšie realizovať vložení **strednej vrstvy** (intrinziekej) medzi vrstvy P a N. Táto vrstva je takmer nedotovaná. Vzniká štruktúra P - I- N, alebo fotodióda PIN.



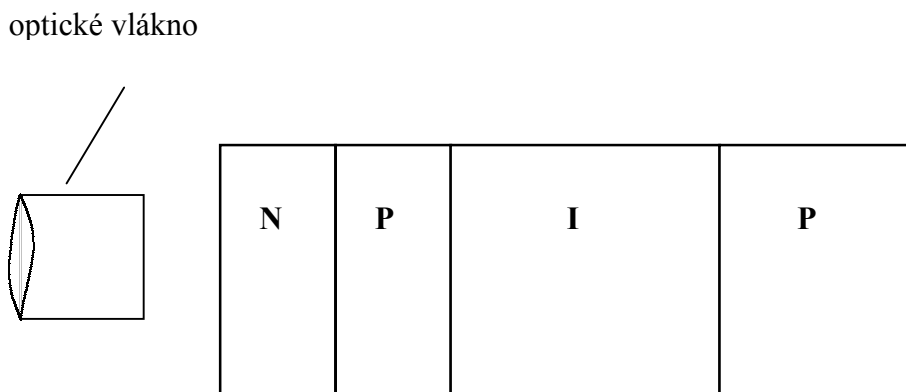
Obr. 4.13 Štruktúra vrstiev fotodiódy PIN

Pri privedení záverného napätia je I (intrizická vrstva) úplne ochudobnená. Širšie ochudobnené oblasti zväčšia kvantovú i spektrálnu účinnosť, ale aj nevhodne predĺžia čas odozvy.

Fotodióda PIN sa používa na detekciu svetla silnejšej intenzity, teda na kratšie prenosové vzdialenosti. Slabé svetelné signály nedetekujú. Zväčšovanie šírky vrstvy I súčasne znižuje maximálnu prenosovú rýchlosť.

### 4.2.3 Lavínové fotodiódy (APD – Avalanche Photodiodes)

Svetlo s nízkou intenzitou spôsobenou útlmom dlhých liniek nad 1 km diódy PN a PIN nedetekujú. Podstatne väčšiu citlivosť majú **lavínové fotodiódy**, vyvinuté pre dlhé prenosové linky. Ich štruktúra je dômyselnejšia.



Obr. 4.14 Štruktúra vrstiev lavínovej fotodiódy

Svetlo vstupuje, na rozdiel od predchádzajúcich typov PN a PIN, do vrstvy N a prechádza do vrstvy P. Polarita záverného napätia je preto opačná ako u fotodiód PN a PIN.

Fotóny dopadajú na spojené páry elektrón - diera a rozdeľujú ich. Voľné nosiče (elektróny) narážajú do ďalších spojených párov a znovu ich rozdeľujú. Tento proces sa lavínovite šíri. Na rozhraní N a P vzniká **lavínový efekt**. Takto generované elektróny sú pohlcované v intrinzičkej vrstve. Lavínový efekt je vyjadrený multiplikačným činiteľom.

**Multiplikačný činiteľ** vyjadruje priemerný počet párov vytvorených po dopade 1 fotónu. Za optimálnych podmienok dosahuje multiplikačný činiteľ hodnotu viac ako 104. Konkrétna hodnota závisí od záverného napätia a teploty. Na vyvolanie lavínového efektu je potrebné záverné napätie až 200 - 500V.

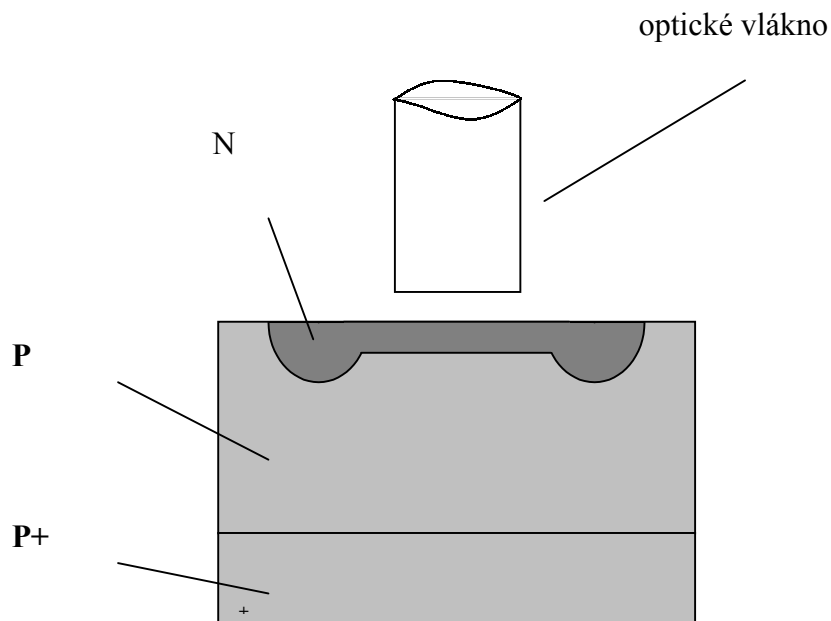


Počet voľných nosičov, teda veľkosť prúdu vyvolaná detekciou svetla, sa nesmie počas prenosu meniť, lebo dôjde k veľkým amplitúdovým rozdielom. Preto je potrebná tepelná a napät'ová stabilizácia.

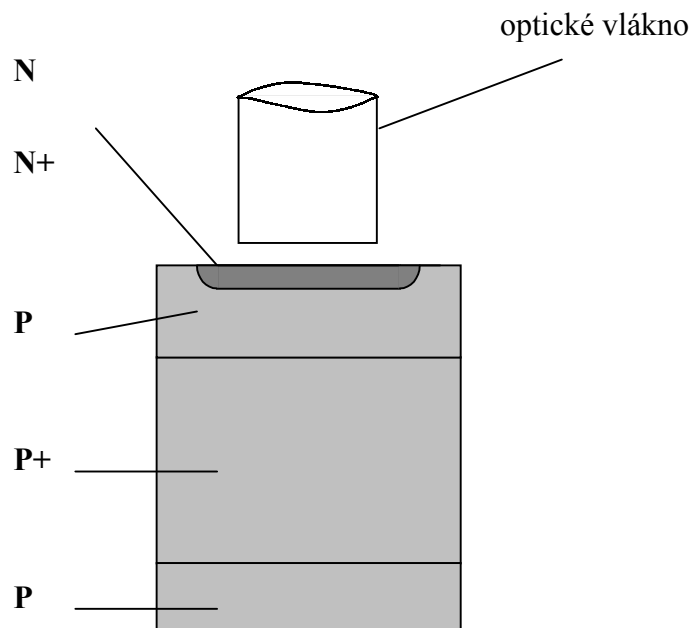
Veľký význam pre vlastnosti lavínovej fotodiódy má aj geometria jej usporiadania.

Na rozdiel od štandardného usporiadania štruktúry lavínovej fotodiódy boli postupným vylepšovaním vyvinuté dva najpoužívanejšie typy:

- ◆ RAPD,
- ◆ lavínová fotodióda s ochranným prstencom.



Obr. 4.15 Lavínová fotodióda s ochranným prstencom



Obr. 4.16 Lavínová fotodióda RAPD

Lavínová fotodióda RAPD (Reach Through APD):

- za ideálnych podmienok majú 100 percentnú účinnosť,
- sú menej citlivé na zmenu tepla,
- majú však menšiu šírku pásma ako lavínové fotodiódy s ochranným prstencom.

#### 4.2.4 Charakteristiky detektorov svetla

Parametre fotodiód sú obmedzené maximálne možnou prenosovou rýchlosťou a dosahom celého systému.

Okrem linearity charakteristiky elektrickej citlivosti je potrebné poznať aj ďalšie parametre ako:

- ◆ spektrálna citlivosť,
- ◆ kvantová účinnosť,
- ◆ čas odozvy (časová konštanta) a čas nábehu,
- ◆ kapacitancia,
- ◆ pomer signál / šum,
- ◆ linearita výstupu,
- ◆ spoľahlivosť a pod.

### a) Spektrálna citlivosť

Spektrálna citlivosť je vlastnosť ktorá vyjadruje pre aké široké spektrum vlnových dĺžok svetla je fotodióda citlivá, t.j. ktoré vlnové dĺžky svetla je schopná účinne detekovať.

Až použitie fotodiód PIN s bočným osvetlením zväčšilo kvantovú účinnosť pre vlnové dĺžky nad 1000 nm. Je potrebné vedieť že, multiplikačný činiteľ lavínovej fotodiódy sa mení s vlnovou dĺžkou prijímaného svetla. Napríklad kremíková lavínová dióda má pri vlnovej dĺžke 1000nm multiplikačný činiteľ 100. Pri vlnovej dĺžke 600nm a rovnakých podmienkach je multiplikačný činiteľ 250.

### b) Kvantová účinnosť

Kvantová účinnosť vyjadruje s akou účinnosťou je dopadajúce svetlo vo forme prúdu fotónov premenené na elektrický prúd. Všeobecne požadujeme vysokú kvantovú účinnosť, čo súčasne zabezpečí krátky čas odozvy.

Kvantovú účinnosť vypočítame ako:

$$\eta (\%) = (\text{počet uvoľnených elektrónov} / \text{počet dopadnutých fotónov}) \cdot 100$$

Pri lavínových fotodiódach:

$$\eta (\%) = (\text{počet prvotne uvoľnených el.} / \text{počet dopadnutých fotónov}) \cdot 100$$

Kvantová účinnosť naznačuje, aký slabý signál môže byť ešte detekovaný. Kvantová účinnosť môže byť použitá aj na určenie **dynamického rozsahu**.

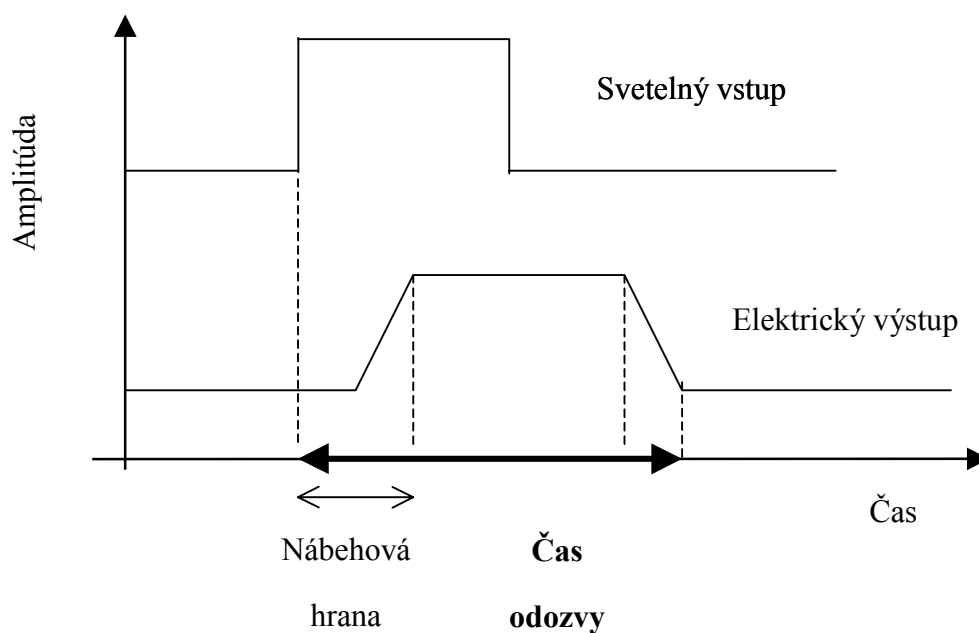
**Dynamický rozsah** je miera intenzity svetelného signálu, ktorý môže byť fotodiódou detekovaný. Určuje dolnú, ale aj hornú hranicu svetla, ktoré sme schopní detekovať. Slabý signál bude prekrytý šumom. Veľmi silný signál prijímač presýti a dôjde ku skresleniu signálu. Dynamický rozsah sa spravidla udáva v dB ako pomer výkonu najsilnejšieho signálu k výkonu najslabšieho signálu, ktorý ešte môžeme detekovať.

Fotodióda PIN má väčší dynamický rozsah ako lavínová. Je to spôsobené lavínovým nasýtením prvkov pri silnejšom svetelnom signále.

### c) Čas odozvy a čas nábehu

Čas odozvy (tzv. časová konštanta) podstatne ovplyvňuje prenosovú rýchlosť systému.

Čas odozvy je daný časom nábehu fotodektora, t.j. je to čas potrebný na úplné sformovanie elektrického impulzu od doby, keď svetlo dosiahlo fotodiódu.



Obr. 4.17 Doba odozvy a doba nábehu

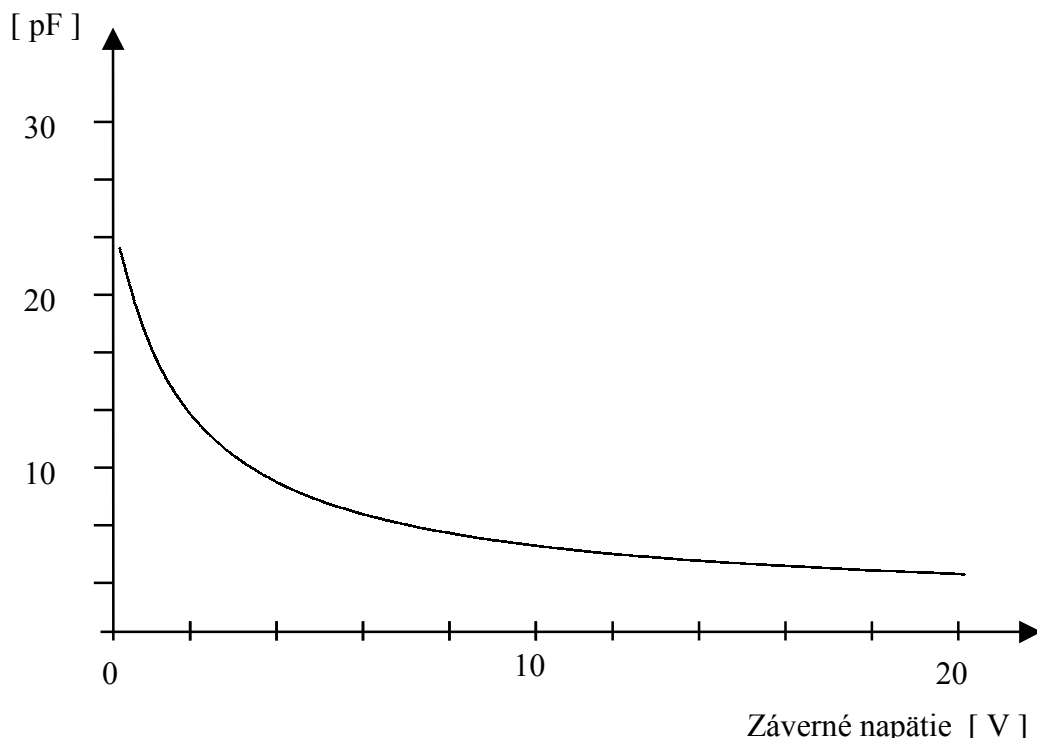
Čas odozvy a čas nábehu sú závislé od elektrického odporu vo fotodióde, obvodoch prijímača, ale sú ovplyvnené aj kapacitanciou fotodiódy. Doba nábehu u PIN diódy je 1-5 ns, u lavínovej 2-5ns. Aj napriek tomu lavínové diódy dosahujú väčšiu prenosovú rýchlosť.

#### d) Kapacitancia

Kapacitancia je schopnosť hromadiť elektrický náboj. Fotodiody majú kapacitanciu, ktorá klesá so vzrastom záverného napätia.

Elektrický prúd musí oblasť nahromadeného elektrického náboja prekonať. Na to je potrebný čas. Vo fotodiódach s veľkou kapacitanciou signály s nízkou frekvenciou prejdú. Signály s vysokou frekvenciou budú skreslené, alebo pohltené kapacitanciou. Veľká kapacitancia znižuje maximálnu prenosovú rýchlosť.

Celková kapacitancia



Obr. 4.18 Závislosť kapacitancie od záverného napätia

## e) Šum

Svetelné detektory sa podieľajú na väčšine šumu. Často používaný pojem je **ekvivalentný výkon šumu** (NEP - Noise Equivalent Power). Vyjadruje množstvo svetla, ktoré by vytvorilo taký veľký signál, ktorý je rovný množstvu šumu.

V ideálnom prípade by ekvivalentný výkon šumu mal byť zanedbateľný. Fotodiódy NP a PIN ho majú relatívne vysoký. Lavínové fotodiódy naopak veľmi nízky.

K šumu v prijímanom svetelnom signále sú pridávané ďalšie šumy samotnou fotodiódou a obvody prijímača.

Faktory spôsobujúce šum:

### **Prúd za tmy**

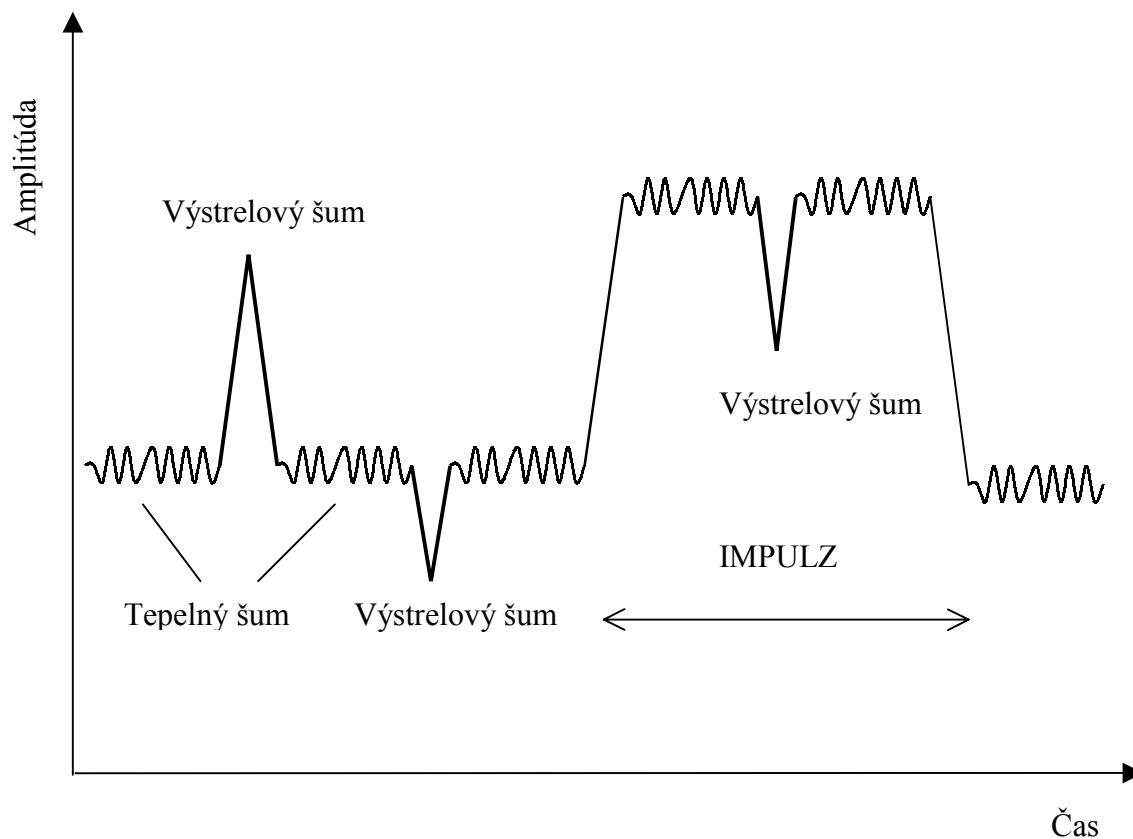
Záverný prúd tečúci fotodiódou za tmy je nežiadúcim signálom, teda šumom. Požadujeme fotodiódy s čo najmenším prúdom za tmy. Lavínové fotodiódy majú prúd za tmy veľmi malý (asi 1 nA). Fotodiódy PIN majú prúd za tmy podstatne vyšší a PN ešte vyšší. Môže byť znížený vložением ochranných prstencov do štruktúry fotodiódy.

### **Tepelný šum**

Tepelný šum je spôsobený vytvorením voľných párov elektrón - diera vplyvom tepla. Tepelný šum je možné znížiť udržaním nízkej teploty - tepelnou stabilizáciou.

### **Výstrelový šum**

Výstrelový šum je spôsobený náhodnou separáciou voľných párov elektrón - diera. Nie je však možné presne určiť okamih jeho vzniku. Ak dôjde v určitom veľmi krátkom časovom okamihu k dvojnásobnému počtu separácií oproti bežnému priemeru, nežiadúci prúd (spôsobený výstrelovým šumom) bude dvojnásobný a môže byť detektorom chybne identifikovaný ako svetelný signál.



Obr.4.19 Tvar výstrelového šumu

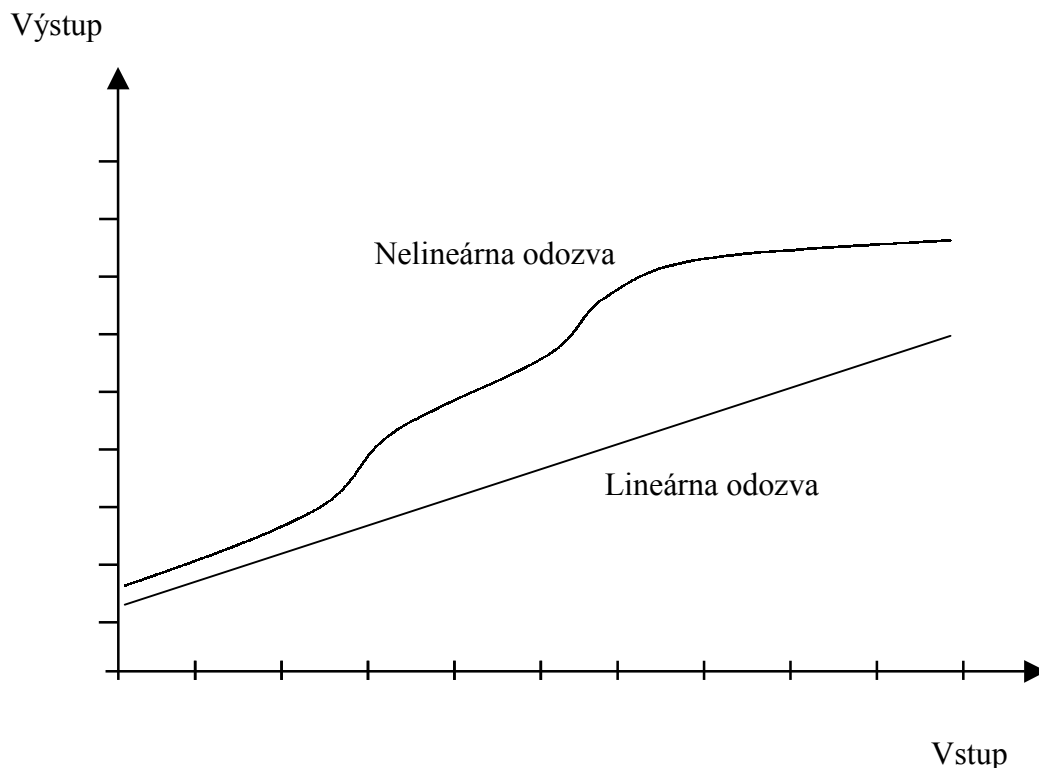
Hlavným zdrojom šumu v PN a PIN fotodiódach je prúd za tmy a výstrelový šum. V lavínových fotodiódach má najvýznamnejší vplyv tepelný šum. Množstvo šumu generované lavínovou fotodiódou je podstatne menšie ako v PN a PIN.

#### f) Linearita výstupu

Linearita výstupu predstavuje vlastnosť detektora, ktorá všetky zmeny svetelnej intenzity na vstupe úmerne (lineárne) prevedie na výstupe do formy elektrického prúdu.

Ochranné prstence zvyšujú linearitu. Základné typy lavínových fotodiód majú nedokonalú linearitu výstupu, ktorá sa zlepšuje rôznym usporiadaním štruktúry a ochrannými prstencami.

Z hľadiska malých rozmerov prierezu optického vlákna je pri výrobe fotodiód určených na detekciu veľmi dôležitá aj veľkosť oblasti citlivej na svetlo. Dnes sú už vyrobené lavínové fotodiódy a PIN fotodiódy, ktoré majú túto veľkosť ako jadro jednovidového vlákna.



Obr. 4.20 Lineárna a nelineárna charakteristika

### g) Spoľahlivosť

Fotodetektory sú oveľa spoľahlivejšie ako zdroje svetla. Majú životnosť viac ako  $10^9$  hodín. Životnosť fotodiód skracujú vysoké teploty. Fotodiódy PIN majú o niečo väčšiu životnosť ako lavínové fotodiódy.

### Obvody prijímača

Fotodiódy v prijímači optického signálu nepracujú samostatne. Spolupracujú s obvodmi pre zosilnenie výkonu a pre udržanie vysokej úrovne parametrov obnoveného signálu. Signály vytvorené fotodiódou sú spracovávané predzosilňovačmi a až potom vstupujú do ostatných



častí prijímača. Ku každému zosilňovanému signálu pridáva zosilňovač šum. Predzosilňovač pridáva len malé množstvo šumu, lebo jeho zosilnenie nie je príliš veľké. Úlohou predzosilňovača je zosilniť signál tak, aby bolo možné rozpoznať v ňom časové takty na základe ktorých je už možné obnoviť pôvodný signál, alebo pripraviť signál pre ďalšie zosilnenie.

Samotné digitálne prijímače sú relatívne jednoduché, lebo nepotrebujú komplikované riadenie amplitúdy. Vstavaním prvkov pre synchronizáciu bitov, napr. Schmittov obvod, sú vytvorené štandardné impulzy vhodnej amplitúdy. Ďalej už nasleduje spracovanie impulzov (informačných bitov) dátovými zariadeniami, alebo ich transformácia na hovorové signály.

## 5 MULTIPLEXORY S VLNOVÝM DELENÍM

V súčasnosti neustále narastajú požiadavky na šírku prenášaného pásma. Za účelom uspokojenia stúpajúceho dopytu operátori hľadajú nové zariadenia s vysokými prenosovými rýchlosťami. To spôsobuje stále rastúcu zložitosť systémov opierajúcich sa o multiplex s časovým delením TDM (Time Division Multiplexing). Riešenie poskytuje multiplex s vlnovým delením WDM (Wavelength Division Multiplexing). Pokiaľ technológia TDM umožňuje dosiahnuť na spoji dlhom 150 km prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s, potom technológia WDM dosahuje prenosovú rýchlosť až 80 Gbit/s a perspektívne aj viac.

### 5.1 Multiplexor s vlnovým delením – WDM

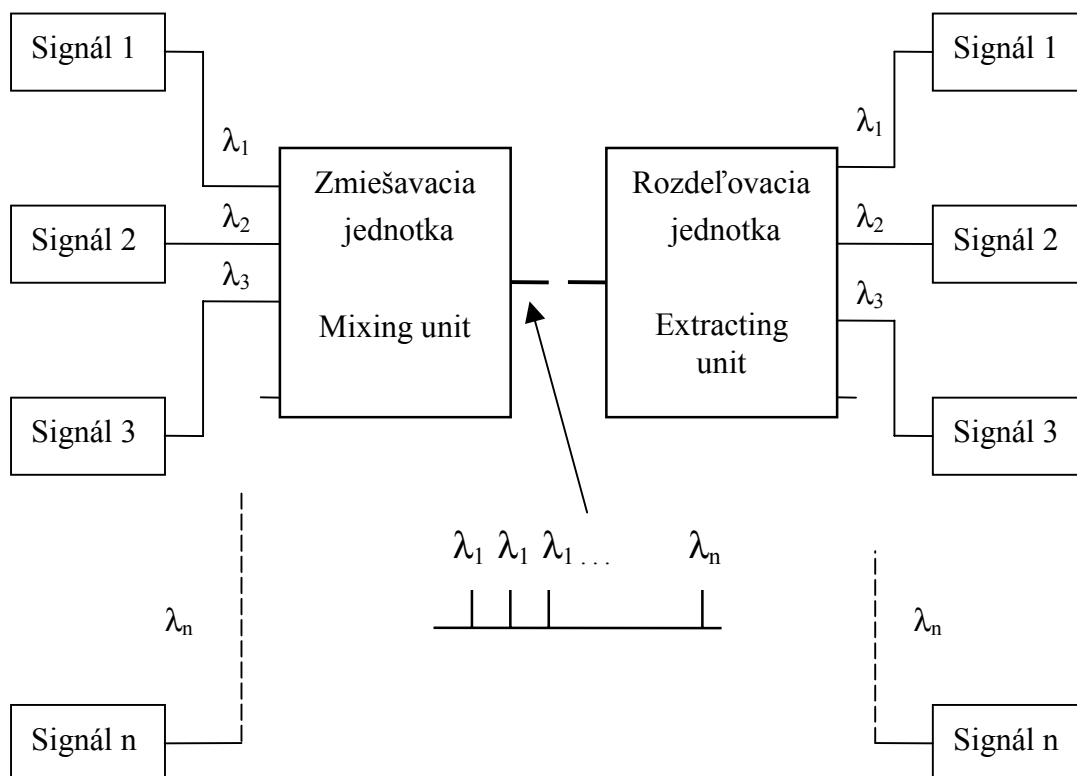
Multiplex s vlnovým delením WDM je optická metóda, ktorá umožňuje kombinovať rôzne vlnové dĺžky, ktoré sú vlnovo veľmi blízko seba (v rámci jedného optického okna, napr. 1550 nm) v tom istom vlákne. Rýchlosť prenosu dosahovaná pomocou optickej technológie napr. spoločnosti Alcatel, je 40-krát 10 Gbit/s (40-krát STM-64). To znamená, že prenos prebieha na 40-tich blízkych vlnových dĺžkach. Táto technológia je založená na použití komponentov nazývaných optický multiplexor (OM) a optický demultiplexor (OD). Úlohou optického multiplexoru je kombinovať rôzne vlnové dĺžky. Optický demultiplexor má za úlohu separovať vlnové dĺžky, ako je popísané na obrázku 5.1.

Na vyrobenie týchto typov komponentov môžu byť použité rôzne technológie. **Optický multiplexor** nemusí byť nevyhnutne citlivý na vlnovú dĺžku a teda nemôže byť vytvorený pomocou pasívneho optického združovača.

**Optický demultiplexor** musí byť na vlnovú dĺžku citlivý, aby bolo možné rozdeliť odlišné optické signály, ale môže byť vyrobený aj združením pasívneho optického združovača a optických vlnových filtrov. Zosilňovač (booster) zosilní signál, a tým zvýši jeho optický výkon, aby bolo možné budiť opticky zosilňujúcu linku s vhodnou výkonovou úrovňou. Počas šírenia signálu klesá jeho optický výkon z dôvodu útlmu optického vlákna.

Aby bolo možné sa s týmto efektom vyrovnáť, sú pozdĺž optickej linky rozmiestňované **prídavné zosilňovače**, čím dochádza k zväčšeniu dĺžkového limitu vlákna spôsobeného uvedenými stratami v optickom vlákne. Na prijímacom konci systému je signál

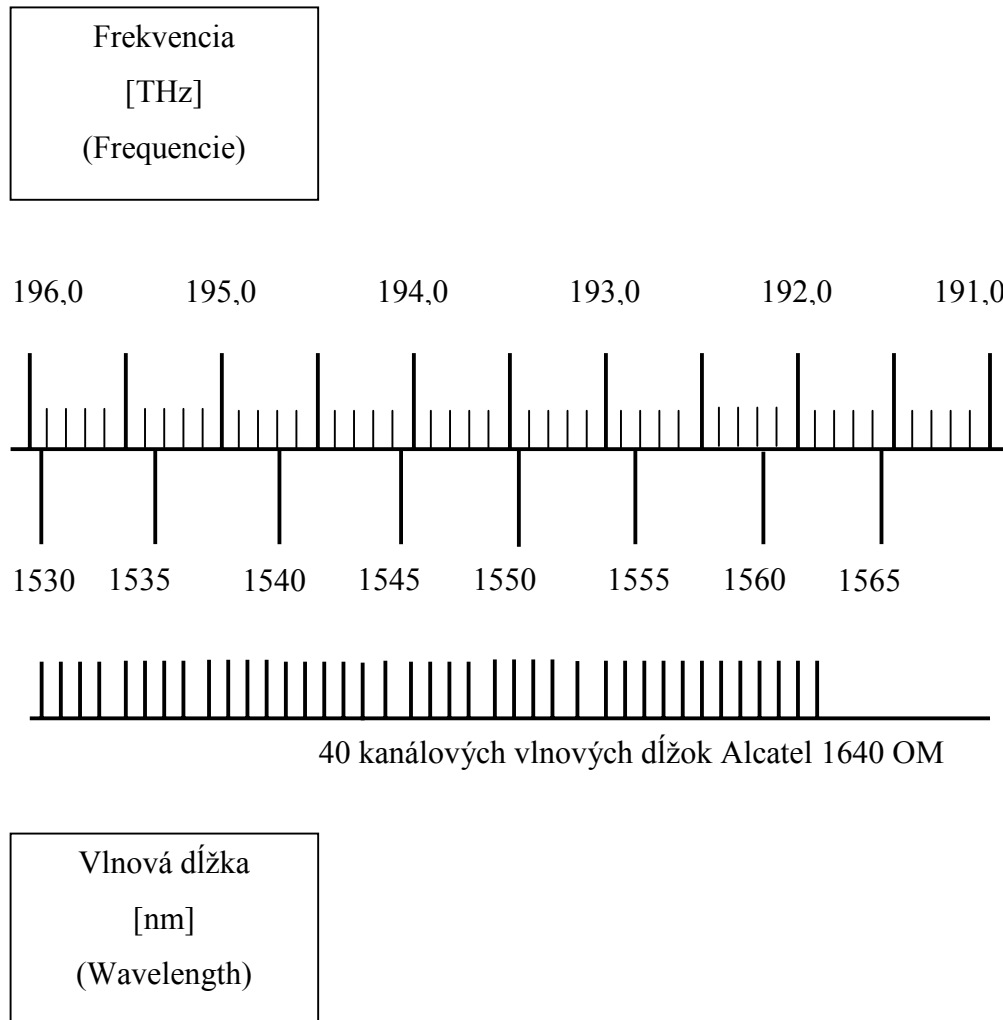
najskôr zosilnený pomocou predzosilňovača. Potom demultiplexor oddelí všetky vlnové dĺžky a pošle ich do prijímacieho vlnového adaptéra. Pretože OM a OD pracujú výhradne v optickej oblasti, optický signál môže byť teoreticky akéhokoľvek typu (t.j. ATM, SDH, analógový).



Obr. 5.1 Multiplexná a demultiplexná funkcia

Vzhľadom na to, že prenos na veľké vzdialenosti je zložitý, bude mať typ prenášaného signálu vplyv na optickú výkonnosť WDM.

Ak sú jednotlivé vlnové dĺžky určené na zlúčenie vhodne zvolené, napríklad v tret'om optickom okne (t.j. dĺžka 1550 nm), potom je ich možné prostredníctvom **WDM optického zosilňovača (OA)** prenášať na veľké vzdialenosti.



Obr. 5.2 Príklad použitých vlnových dĺžok vo WDM

Počet prenášaných signálov závisí iba od konfigurácie OM a OD. Výstupný výkon závisí od množstva prenášaných signálov. Pri použití optických zosilňovačov ich zisk závisí od vstupného výkonu a môže byť problematické udržať rovnaký zisk pre každý signál, pokiaľ ich počet bude premenlivý.

Ďalší problém, ktorý sa môže vyskytnúť pri použití tohto typu zapojenia v telekomunikačnom zariadení je riadenie takéhoto systému. Pretože teoreticky je možné prenášať akýkoľvek druh signálu, vždy nastane otázka - kde integrovať prenosové zariadenia založené na princípe multiplexora s vlnovým delením?

Optické multiplexory a optické demultiplexory môžu byť vyrobené rôznymi technológiami, ktoré zabezpečia plnenie multiplexovacích a demultiplexovacích funkcií. V optických systémoch vyrábaných napr. firmou Alcatel sú OM a OD založené na použití pasívneho zariadenia citlivého na vlnovú dĺžku nazývaného multiplexor s vlnovým delením. Toto zariadenie určuje, ktorá vlnová dĺžka má byť prenášaná a ktorá musí byť blokovaná aby sa predišlo skresleniu jedného kanálu inými. Je to relatívne jednoduché zariadenie, vďaka ktorému sa nemusí použiť optický filter a súbor elektronicky ovládaných obvodov na ovládanie toho optického kanála, ktorého vlnové dĺžky sú použité.

Toto zariadenie má nízke vložné straty a disperziu polarizačného vidu.

### **Vlnová dĺžka saturácie**

**Charakteristiky optických zosilňovačov** sa môžu zmeniť v závislosti od celkovej bitovej rýchlosti, pretože **celkový optický výkon** závisí od počtu prenášaných vlnových dĺžok. Napríklad pokiaľ sa počet vlnových dĺžok zdvojnásobí, výstupný výkon OM vykazuje kolísanie 3 dB. Systém založený na princípe multiplexora s vlnovým delením môže pracovať bez degradácie pri zohľadnení možného vysokého kolísania optického výkonu.

Druhý aspekt sú pracovné podmienky optických zosilňovačov. Vstupný výkon priamo za OM sa zmení o 3 dB kedykoľvek sa počet kanálov zdvojnásobí. Preto zisk optického zosilňovača prestane byť vyrovnaný a výstupný výkon na kanál sa tiež zmení. Kolísanie bude závisieť od konfigurácie optického zosilňovača. Ak zosilňovač pracuje v konfigurácii s riadeným výstupným výkonom, potom sa zisk zníži, ak sa zvýši počet kanálov. Výkon na kanál sa tiež zníži a bude mať určitý vplyv na prenosovú kvalitu v jednotlivých kanáloch.

Aby sa tieto nevýhody odstránili bola zavedená tzv. saturovaná vlnová dĺžka (saturation wavelength). Zmyslom uvedeného kroku je poskytnúť rezervu optického výkonu, (nádrž) ktorá bude kompenzovať zvyšovanie počtu kanálov. Počet prenášaných vlnových dĺžok bude vždy o jeden vyšší ako je počet vstupných signálov. Ak sa počet prenášaných kanálov

zdvojnásobí, výstupný výkon saturovanej výstupnej dĺžky sa zníži o 3 dB, aby sa zachoval konštantný výstupný výkon OM. Takže vstupný výkon prvého optického zosilňovača je udržiavaný na rovnakej úrovni bez ohľadu na počet kanálov a jeho pracovný bod sa nezmení. Pretože optické zosilňovače pracujú v režime riadenia výstupného výkonu, ich zisk zostane konštantný, ako aj výkon na kanál.

Uvedený spôsob zaistí poskytovateľom telekomunikačných služieb rýchly a bezpečný rast kanálov s obmedzenými zásahmi, urobenými operátorom iba na koncovej stanici. Ďalej zabezpečí, že na už existujúcich spojoch rušenie kvôli pridaniu nového kanálu nenastane.

Vlnová dĺžka saturovaného kanálu je 1545 nm.

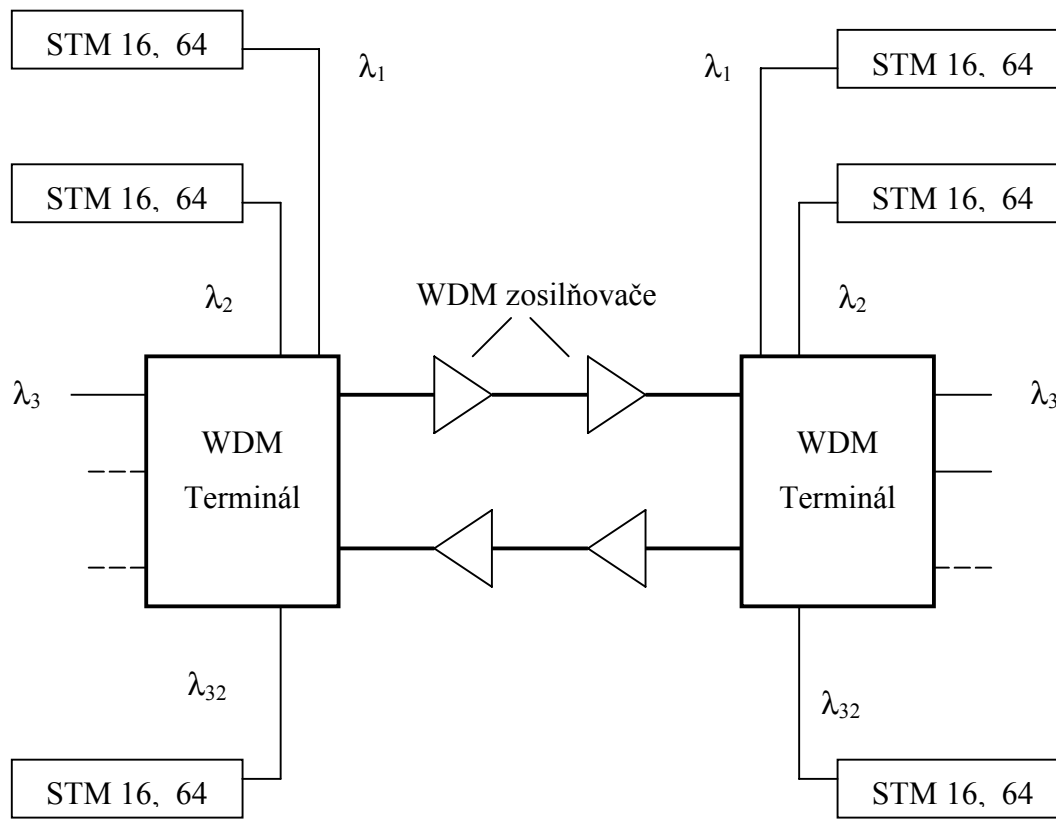
Za účelom zavedenia optickej vrstvy v prenosovej sieti implementujú najdôležitejší výrobcovia špičkové technológie. Napríklad Alcatel zaviedol rodinu produktov Optinex katalóg (Optinex catalogue), ktoré pokrývajú optickú vrstvu.

Priblíženie k uvedenému cieľu je realizované v troch krokoch. Prvým krokom je sledovanie koncepcie optického prenosového systému, v ktorom produkty WDM poskytujú funkcie optického multiplexu s vlnovým delením a prenosové funkcie na linkách bod - bod s možnosťou ich integrácie do vrstvy SDH.

Vzájomná komunikácia je potom zaručená použitím tzv. farebnej optiky v zariadení SDH, alebo použitím adaptérov vlnovej dĺžky v termináli WDM. Tento krok bol uskutočnený s 1686 WM.

### **Aplikácia viac bodov – viac bodov (multi - point to multi - point)**

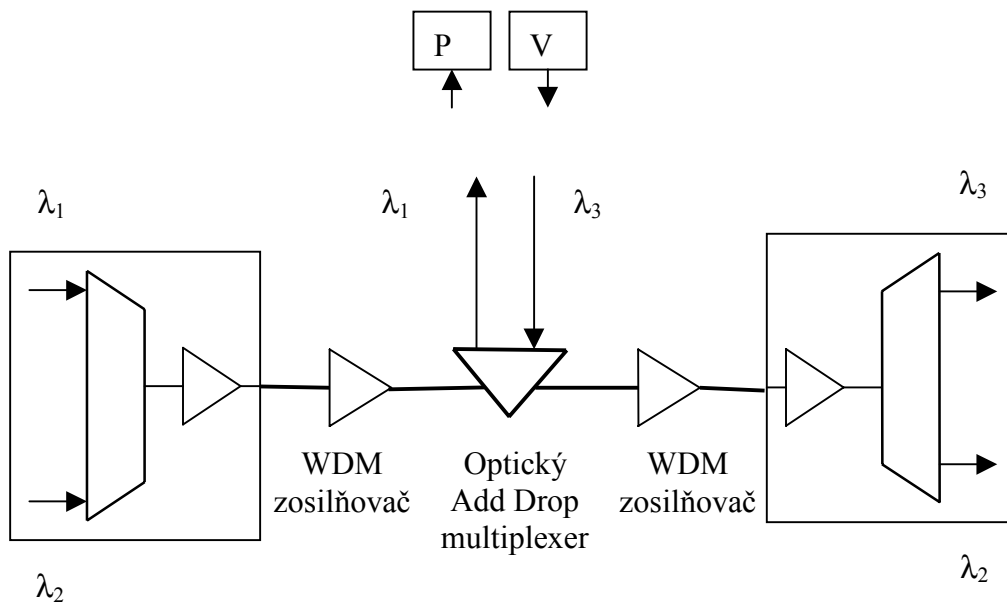
Rozšírenie prvej koncepcie na **optický multiplexor s pevným pridaním a odpojením** (Fixed Optical Add Dropp Multiplexer- F-OADM). Zaradením F-OADM do siete sa z prenosu bod - bod (point to point) stane linka prenosu z viacerých bodov do viacerých bodov. Toto rozšírenie reprezentuje produkt Alcatel 1640WM. Systém 1640WM je prenosový systém multivlnových dĺžok so schopnosťou pevného prídania a odpojenia (Fixed Add and Drop) pre terestriálne aplikácie. Na páre vlákna môže tento systém prenášať až 40 kanálov, ktoré môžu podporovať akúkoľvek bitovú rýchlosť v rozsahu od 100 Mbit/s do 10 Gbit/s. Použitím príslušných adaptérov vlnovej dĺžky sú ich vstupné a výstupné rozhrania štandardizované v zhode s odporúčaniami SDH a signálmi PDH.



Obr. 5.3 Funkcia WDM na linke bod – bod.

Na trasách založených na erbiom dopovaných vláknových zosilňovačoch (Erbium Doped Fibre Amplifiers – EDFA) poskytuje F-OADM maximálnu dĺžku preklenutia na ktoromkoľvek štandardnom vlákne, nulových či nenulových typoch. V prenosovej sieti tiež umožňuje použiť rovnaký systém riadenia ako zariadenie Alcatel SDH.

Zmodernizovanie konfigurácie prídavného optického zosilňovača umožňuje „Add drop funkcia“. Funkcia umožňuje vybrať, alebo vložiť až 4 predurčené kanály. To dáva operátorovi možnosť rozhodnúť sa zaradiť optickú zosilňovaciu stanicu do aktívnej prenosovej (traffic) stanice bez nutnosti modifikovania architektúry zostavajúcej časti siete a pridať, alebo odobrať až 40 Gbit/s v každej medzistancii. „Add drop funkcia“ má prechodný význam, operátor môže na diaľku rozhodnúť, či predmetná vlnová dĺžka má cez túto stanicu prechádzať, alebo má byť tejto stanici odobratá. Vysielač a prijímač jednotka adaptéru vlnovej dĺžky, umiestnená v „Add drop stanici“, je tá istá, ako v predchádzajúcej aplikácii.



Obr. 5.4 Aplikácia viac bodov - viac bodov

## 5.2 Manažment systémov s vlnovým delením

### Optický kanál dohľadu

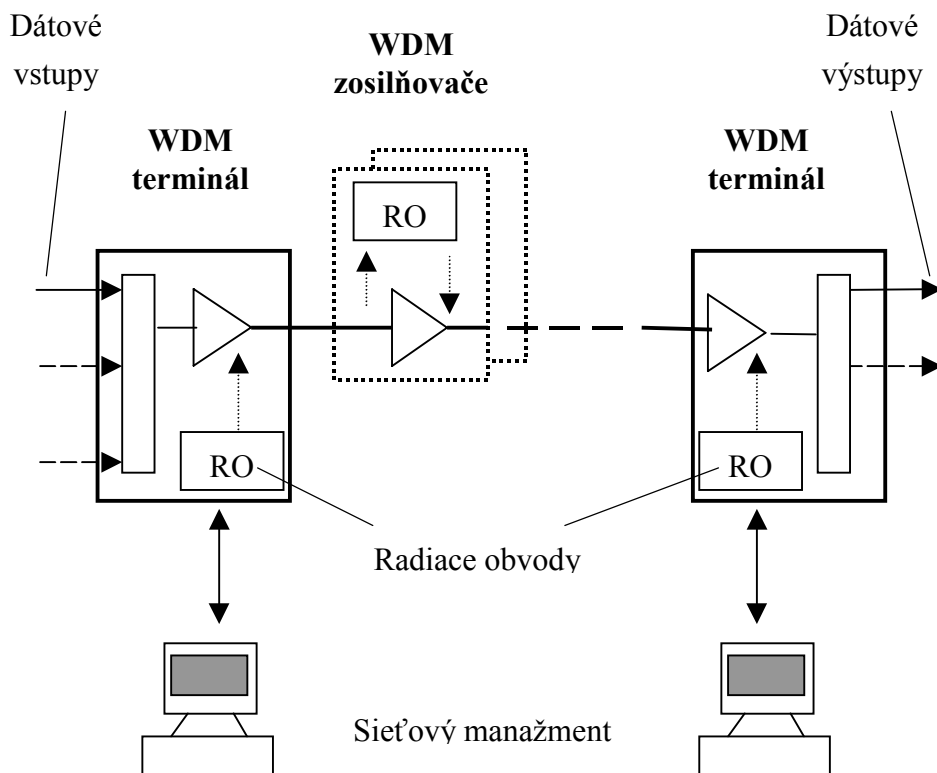
Architektúra WDM zahŕňa vzdialené optické zosilňovače a „Fixed Add drop“ optické prostriedky. Operátor potrebuje poznať presný stav zariadení v každej vzdialenej stanici. Pretože všetky funkcie, ktoré vykonáva WDM, sú v optickej oblasti, kanál na prenos riadiacich informácií do rôznych častí systému nie je k dispozícii.

Tento problém je riešený prostredníctvom optického kanálu dohľadu. Je to ďalší samostatný kanál, prenášaný v pásme 1510 nm, ktorý nesie všetky riadiace informácie. Prenášajú sa v ňom aj niektoré dátové kanály, inžinierske spoje, služobný kanál, niektoré externé alarmy a administrácia.



Kanál dohľadu umožňuje lokalizovanie porúch. V prípade prerušenia kábla indikuje linkový zosilňovač umiestnený hneď za prerušením stratu vstupného signálu a pošle túto informáciu cez kanál dohľadu do systému riadenia. Medzi tým je v dvoch zosilňovačoch v blízkosti poškodenia aktivované automatické odpojenie výkonu (Automatic Power Shut Down – APSD), aby sa do vlákna nedostal vysoký optický výkon. Kanál dohľadu je nezávislý od stavu linkového zosilňovača. V prípade poruchy linkového zosilňovača je kanál dohľadu stále dostupný. Informácia o poruche je odoslaná do riadiaceho systému.

V prípade poruchy v jednotke riadenia, alebo v systéme kanálu dohľadu, v termináli, alebo v linkovom zosilňovači, zostáva WDM prenos v činnosti. Nasledujúce zariadenie pozdĺž linky spustí alarm indikujúci stratu kanálu dohľadu.



Obr. 5.5 Optický kanál dohľadu

## **Aplikácia riadenia (management application)**

Prenosová kapacita podporovaná WDM je veľmi veľká. Kritický problém preto je v reálnom čase nájsť a lokalizovať všetky problémy, ktoré sa môžu v systéme vyskytnúť. Optický kanál dohľadu je linka z jedného terminálu smerom k vzdialenému zariadeniu. Poskytuje kompletné riadenie iba z jednej časti systému WDM.

V katalógu Optinex sú k dispozícii dve možnosti riadenia. Prvá je založená na štandardnom osobnom počítači PC (1320 IM). Druhá je integrovaná vnútri systému centralizovaného riadenia (centralised management system – 1353 SH) s nápovedou popisu info-modelu a Q3 rozhraním poskytnutým v zariadení. Obe poskytujú rovnakú úroveň z hľadiska funkcií a môžu tiež riadiť SDH zariadenia daného producenta. Pri tomto spôsobe je pre optickú vrstvu a prenosovú sieť požadovaný iba jeden typ riadiaceho systému.

WDM element manager – zahŕňa tieto aplikácie :

- Prevádzka a údržba (Operation and Maintenance).
- Lokalizácia chýb (Full Location).
- Diaľkový inventár (Remote Inventory).
- Inštalovanie softvéru (Software Down Loading).

## **Aplikácia „Prevádzka a údržba“**

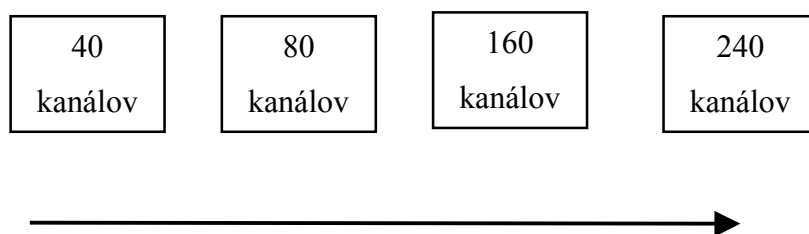
Účelom aplikácie prevádzky a údržby je inicializácia a sledovanie systémovej konfigurácie počas jej života. Poskytuje možnosť robiť údržbu a opravy, aby sa predišlo možnosti degradácie prenosovej kvality.

Táto aplikácia zabezpečuje definovanie počiatočnej systémovej konfigurácie, v ktorej operátor definuje architektúru vybavenia. Operátor tiež definuje alarmy, ktoré budú aktivované, ich dôležitosť, názov a úroveň v ktorej budú generované.

Aplikácia ďalej podporuje funkciu monitorovania výkonnosti založenú na identifikácii kanálu a funkciu monitorovania optickej úrovne. Periodické spúšťanie tejto funkcie pomáha operátorovi sledovať pracovné podmienky optických zosilňovačov a rozhodnúť, pokiaľ je potrebné, vykonať určité činnosti potrebné na udržanie prenosovej kvality.

Tretím krok priblíženia k zavedeniu optickej vrstvy v prenosovej sieti je dynamická rekonfigurácia. Poskytuje pre transportnú sieť dynamickú rekonfiguráciu, obnovu a ochranu na vysokej úrovni, uskutočniteľnú na úrovni optickej vrstvy. Transparentná servisná vrstva je navrhnutá s uplatnením rekonfigurovateľných optických „Add and Drop“ multiplexorov (Reconfigurable Optical Add and Dropp Multiplexers) a optických prepínacích polí (Optical Cross-Connects). Linky typu viac bodov – viac bodov sa potom môžu stať sieťami s kruhovou, alebo zmiešanou konfiguráciou, v ktorých optické smerovanie zabezpečí všetky vyššie uvedené funkcie.

Budúci vývoj s ohľadom na rast prenosovej kapacity vlákna je zobrazený na obrázku 5.6.



Obr. 5.6 Vývoj počtu kanálov na vlákno prostredníctvom WDM

Dodávatelia technológie pre prenosové siete vkladajú obrovské úsilie do rozvoja špičkových optických zariadení, kde uplatňujú posledné dostupné výsledky základného výskumu. Tento trend napomáha úplne uspokojovať všetky požiadavky svetových sieťových operátorov, ako na rozľahlé transoceánske siete, tak aj na malé, zmiešané metropolitné siete. Siete vybudované uvedenou technológiou umožnia prenos dát od malých až po vysoké rýchlosti.

## 6 MERANIE PARAMEROV OPTICKÝCH VLÁKIEN

### 6.1 Prenosové charakteristiky optických vlákien

Najdôležitejšou charakteristikou optických vlákien je tlmenie.

**Tlmenie** - predstavuje prenosové straty. Rozvoj optických vlákien nastal až vtedy, keď ich prenosové straty boli menšie, ako straty koncových vedení (t.j. menej ako 5 dB/km<sup>-1</sup>). Celkové tlmenie signálu  $\alpha_t$  (dB) je definované pre určitú vlnovú dĺžku, ktoré sa vyjadruje vzťahom:

$$\alpha_t (dB) = 10 \log \frac{P_i}{P_0}$$

$P_i$  - je vstupný a  $P_0$  je výstupný výkon optickej trasy.

Tlmenie optického vlákna sa väčšinou vyjadruje v jednotkách dB/km<sup>-1</sup> podľa vzťahu:

$$\alpha (dB) = \frac{10}{L} \log \frac{P_i}{P_0} = \frac{\alpha_t}{L}$$

$L$  – je dĺžka optického vlákna.

Tlmenie v optickom vlákne je spôsobené najmä materiálými absorbčnými stratami, lineárnym a nelineárnym rozptylom a stratami spôsobenými ohybom.

#### A) MATERIÁLOVÉ A ABSORBČNÉ STRATY

Sú spojené so zložením materiálu a technológiou výroby optických vlákien. Stratený optický výkon sa mení na teplo pohltené v objeme optických vlákien.

### **Absorbcia svetla intrinzická (vlastná)**

Aj absolútne čisté sklo má v blízkej infračervenej oblasti určitú vlastnú absorbciu. V oblasti vlnových dĺžok 0,8 až 1,7  $\mu\text{m}$  má tento mechanizmus dve zložky. Ultrafialovú absorbciu spôsobenú elektrónovými prechodmi v skle a infračervenú absorbciu spôsobenú interakciou fotónov s vibračným spektrom molekúl skla. Vplyv týchto procesov možno minimalizovať vhodnou voľbou zloženia materiálov jadra a plášťa OV. Vhodnejšie ako oxidové sklá sú preto fluoridové a chloridové sklá.

### **Absorbcia extrinzická (nevlastná)**

Táto absorbcia je spojená s absorpciou najmä na kovových nečistotách (Cr, Cu, Fe, V, Ni, Mn) a na hydroxidových molekulách (OH) zvyškovej vody v skle. Zdokonalené technológie prípravy skla, ako napr. usadzovanie z plynnej fázy umožňuje znížiť koncentráciu nečistôt na úroveň 1 častica z  $10^{10}$  častíc (to postačuje). Taktiež vzniká určitá koncentrácia zvyškovej (kryštalickej) vody. Postačujúca je 1 častica z  $10^7$  častíc.

## **B) STRATY LINEÁRNYM ROZPTYLOM**

Sú to hlavne útlmové mechanizmy spôsobené lineárnym prechodom častí, alebo celého optického výkonu z jedného vedeného vidu do iného vidu (v telefónii poruchy). Lineárny rozptyl delíme do dvoch skupín :

- a) Raeyleighov rozptyl: je spôsobený nehomogenitami menšími ako vlnová dĺžka preneseného svetla v materiáli optického vlákna. Sú dôsledkom nehomogenít hustoty a zloženia svetla pri jeho tuhnutí. Reprezentované sú koeficientom Raeyleighovho rozptylu. Nedajú sa eliminovať.
  
- b) Mieho rozptyl vzniká nehomogenitami, ktorých rozmery sú porovnateľné , alebo väčšie ako vlnová dĺžka prenášaného signálu. Je spôsobený nedokonalou geometriou OV, poruchami rozhrania jadro - plášť, trhlinami a bublinami v optickom vlákne.

## **C) STRATY NELINEÁRNYM ROZPTYLOM**

Vznikajú najmä pri vyšších hustotách optického výkonu v OV. Spôsobujú prechod optického výkonu z jedného vidu do iného vidu, ktorý sa šíri rovnakým, alebo opačným smerom a pri inej frekvencii. Vzniká nad prahovou hodnotou tohto výkonu. Najmä v dlhých jednovidových OV.

### **Niektoré typy nelineárneho rozptylu:**

#### **a) Brillouinov rozptyl**

Modulácia svetla tepelnými vibráciami molekúl v optickom vlákne. Spôsobuje posunutie frekvencie optického signálu, čo je závislé od uhla rozptylu. Je maximálny pre spätný smer a nulový pre priamy smer.

#### **b) Ramanov rozptyl**

Podobný ako Brillouinov rozptyl. Vznikajú len u jednovidových optických vlákien a pri veľkých hustotách naviazaného optického výkonu.

## **D) STRATY OHYBOM OPTICKÉHO VLÁKNA**

Vznikajú zväčšením relatívneho rozdielu indexu lomu jadra a plášťa optického vlákna, voľbou čo možno najkratšej pracovnej vlnovej dĺžky. Pri vedení optického vlákna vznikajú tzv. mikro ohyby. Najhoršie sú tie, ktoré sú blízke k priemeru optického vlákna.

## **E) NIEKTORÉ ĎALŠIE STRATY**

Medzi ďalšie parazitné zložky, ktoré spôsobujú straty patria predovšetkým vidový šum vznikajúci v analógových prenosových systémoch a polarizácia svetla v jednovidových optických vláknach.

## Vidový šum

Nebezpečný hlavne pre širokopásmové analógové prenosové systémy. Je to fluktuácia v prenášanom signále, ktorého charakteristický čas je dlhší ako rozlišovacia doba fotodetektora.

Zvýšenie vidového šumu spôsobuje :

- a) použitie koherentného zdroja s úzkou spektrálnou šírkou a veľkou koherentnou dĺžkou,
- b) nehomogenity pozdĺž optického vlákna,
- c) fázová korelácia medzi vidmi.

## Polarizácia svetla

Vzniká v jednovidovom optickom vlákne s valcovou symetriou kde sa môžu šíriť dva navzájom ortogonálne polarizované vidy  $HE_{11}^x$   $HE_{11}^y$  , ktoré majú rôzne konštanty šírenia  $B_x$  a  $B_y$  .

To spôsobuje nekontrovateľný prenos energie z jedného ortogonálneho vidu na druhý .

## 6.2. Metódy merania tlmenia v optokomunikačných systémoch

### 1) METÓDA VLOŽNÝCH STRÁT

Medzi prijímač a vysielač sa vloží krátke optické vlákno (referenčné vlákno), potom sa vloží merané vlákno a rozdiel je tlmenie na meranom vlákne.

Výsledná hodnota tlmenia meraného vlákna sa určí na základe rozdielu výkonových úrovní.

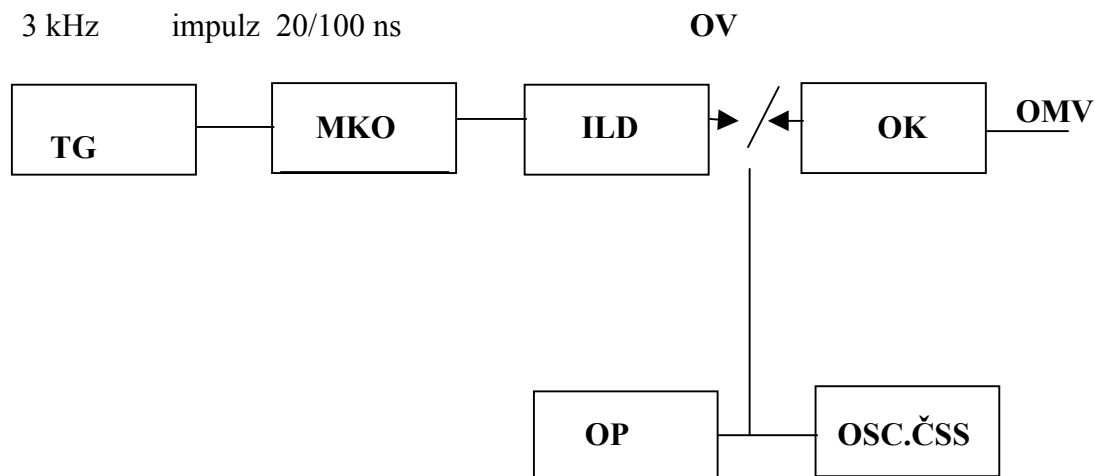
### 2) METÓDA DVOCH DĹŽOK

Táto metóda je presnejšia ako prvá (metóda vložných strát). Zmeria sa dlhé vlákno a potom sa zlomí asi 1m od zdroja a rozdiel výkonových úrovní sa rovná tlmeniu. Je samozrejmosťou, že vstupný naviazaný výkon  $P_1$  pri oboch meraniach zostáva

nezmenený. Výsledné tlmenie je opäť stanovené rozdielom výkonových úrovní medzi meraniami.

### 3) METÓDA SPÄTNÉHO ROZPTYLU (REFLEKTOMETRICKÁ METÓDA) – OTDR (OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETRY)

Do optického vlákna je z reflektometra vysielaný optický impulz asi 10ns s veľkou opakovacou frekvenciou (strieda) niekoľkých GHz. Meria sa spätne rozptýlený výkon (signál). Výkon je rádovo 1 W.



TG – taktovací generátor (astabilný klopný obvod)

MKO – monostabilný klopný obvod (spúšťanie aj externe)

ILD – impulzná Zenerova dióda

OK – optický konektor

OMV – merané vlákno

OV – optická výhybka (hranol)

OP – optický prijímač (fotodetektor, zosilnovač)

ČSS – číslicové spracovanie signálu

Obr. 6.1 Meranie metódou OTDR

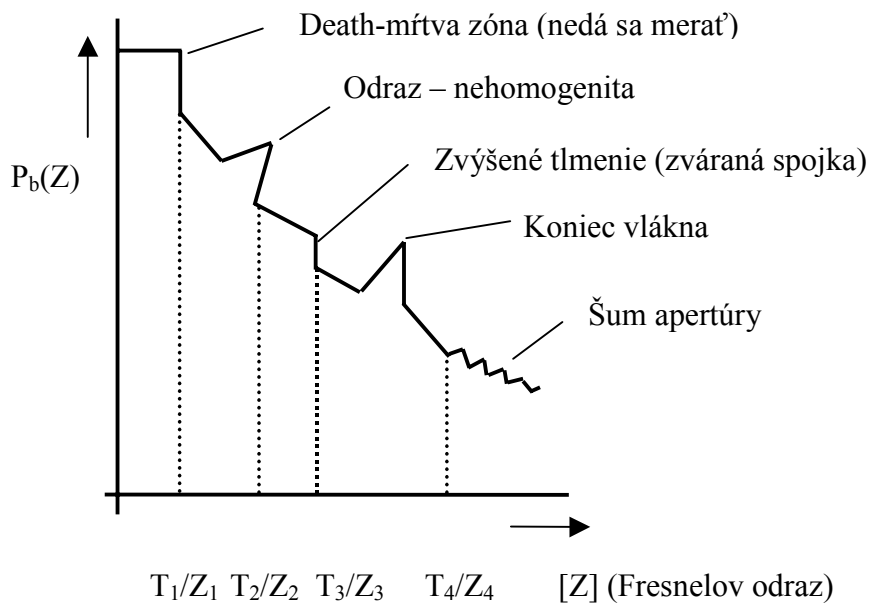


Spätné šírenie od začiatku sa vypočíta takto :

$$P_b(z) = 0,5 \cdot P_0 \Delta t \cdot s \cdot \alpha_\kappa \cdot v_g \cdot e^{-2\alpha z} \quad [W]$$

$$P_b(z) = K \cdot e^{-2\alpha z} \quad [W]$$

- kde:  $P_b(z)$  - spätné šírenie od začiatku vlákna,  
 $P_0 \Delta t$  - výkon vysielaného impulzu v čase,  
 $s$  - činiteľ spätného rozptylu,  
 $\alpha_\kappa$  - činiteľ strát,  
 $v_g$  - skupinová rýchlosť šírenia.



Obr. 6.2 Ukážka spätného šírenia v závislosti od Fresnelovho odrazu

Reflektomerickou metódou je možné monitorovať v reálnom čase stav optickej trasy, zamerať polohu prerušeného vedenia s presnosťou rádovo na centimetre. Je možné merať tlmenie medzi dvoma konkrétnymi bodmi na trase. Vykonáva sa to porovnaním napäťových úrovní medzi meranými bodmi, výpočet uvádza nasledujúci vzorec:

$$a_{1-2} = 5 \log \frac{u_1}{u_2} \text{ [dB]}$$

Pri využívaní číslicového spracovania signálu osciloskopickou metódou (ČSS), je často využívaný spôsob „Box-car-integrator“, čo je spôsob spracovania kriviek pri ich výslednom zobrazení. Konkrétne sa jedná o vyhladenie krivky – eliminácia šumu.

Pri praktickom meraní metódou OTDR sa môžeme niekedy stretnúť s nežiadúcimi tzv. viacnásobnými odrazmi. Eliminácia tohto javu je možná znížením vysielaného výkonu do vlákna z reflektometru, alebo zmenšením periódy opakovania. Pri testovaní, prípadne odovzdávaní novej optickej trasy, by mal jej realizátor vykonať (zabezpečiť) záverečné protokolárne meranie takejto optickej trasy. Meranie musí byť vykonané z oboch koncov vlákna, pričom výsledné tlmenie optickej trasy je aritmetickým priemerom oboch meraní. Ak je na trase optický konektor, alebo zvar, je potrebné vykonať meranie pred konektorom (zvarom) a za konektorom (zvarom).

### **Výhody metódy OTDR**

V každom mieste vlákna máme presný obraz priebehu tlmenia a to nielen v dvoch bodoch, ale aj v celej dĺžke vlákna! Metóda je nedeštruktívna. Pri tejto metóde netreba vlákno lámať, preto reflektometrická metóda je jediná vhodná pre prax.

### **Nevýhody metódy OTDR**

Vysoká cena reflektometrov, výsledky merania tlmenia sa môžu lišiť od metódy dvoch dĺžok.

## 6.3 Laboratórne cvičenie

### 6.3.1 Zadanie

#### Meranie č. 1

##### Skupina č. 1

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 102513** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

##### Skupina č. 2

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 102514** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

##### Skupina č. 3

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 102515F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

##### Skupina č. 4

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103616F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

##### Skupina č. 5

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103618** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### Skupina č. 6

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103615F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### Skupina č. 7

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103617** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### Skupina č. 8

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 102513F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### **Skupina č. 9**

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 102514F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### **Skupina č. 10**

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103616** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

#### **Skupina č. 11**

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103617F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

## Skupina č. 12

Zmerajte tlmenie optického vlákna na konkrétne zadanej optickej trase – **vlákno č. 103618F** a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty). Meranie vykonajte podľa rozdelenia do skupín na uvedených optických vláknach:

### Pokyny k úlohe č.1.:

Zmerajte tlmenie optického vlákna na zadanej optickej trase a straty medzi bodmi A, B (dvojbodové straty).

Meranie vykonajte pre vzdialenosti rovné násobkom 0,5 km. Meranie uskutočnite pomocou software pre meranie metódou OTDR.

Z merania vypracujte písomný elaborát doplnený tabuľkami nameraných hodnôt a grafickým vyjadrením výsledkov merania.

### Postup merania pomocou softvéru PCOTDR (Popis programu PCOTDR):

1) Po spustení **C:\FIBEROPT\OTDR\pcotdr.exe**, vyberte disk na ktorom sú uložené súbory s charakteristikami. Disk **C**.

*Ak ste sa náhodou pomýlili (vybrali nesprávny disk) na ďalšej obrazovke sa po stlačení písmena **L** (log disk) znova ukáže požiadavka na zadanie pracovného disku,*

2) Šípkami vyberte pracovný adresár **OTDR** a písmenom **D** (directory) potvrdíte vybraný adresár (OTDR).

3) Kurzorom vyberte číslo meraného vlákna (súbor \*.CAO), výber potvrdíte stlačením **T** (Trace),

Na pracovnej obrazovke sú možné nasledujúce voľby:

- A (attribute) - zmena atribútov označeného súboru,
- C (copy) - skopírovanie súboru na zadanú cestu,
- D (dump traces to LP1) - vypíše na tlačiareň,
- E (erase) - vymazanie súboru,

O (overlay)	- výber (načítanie) dvoch kriviek a práca s nimi,
P (print text)	- vytlačí na tlačiareň,
T(trace)	- výber jednej krivky a práca s ňou,
V(view text)	- zobrazí sa hlavička vybraného súboru.

#### 4) Nastavenie podmienok merania

Na tejto obrazovke sú dva kurzory označené A a B.

Môžeme s nimi pohybovať jemne a skokom.

##### **Pohyb kurzorom bodu A:**

Šípka vľavo	- jemný pohyb kurzora A k začiatku krivky,
Šípka dolu	- jemný pohyb kurzora A ku koncu krivky,
F1	- skokový pohyb k začiatku krivky kurzorom A,
F2	- skokový pohyb ku koncu krivky kurzorom A,

##### **Pohyb kurzorom bodu B:**

Šípka hore	- jemný pohyb kurzora B k začiatku krivky,
Šípka vpravo	- jemný pohyb kurzora B ku koncu krivky,
F9	- skokový pohyb k začiatku krivky kurzorom B,
F10	- skokový pohyb ku koncu krivky kurzorom B.

##### **Posun krivky:**

A - posunutie začiatku krivky do stredu zobrazovacieho poľa,

B - posunutie začiatku krivky do  $\frac{1}{4}$  zobrazovacieho poľa,

O - vráti začiatok krivky na začiatok zobrazovacieho poľa.

##### **Zmena horizontálnej škály (merítka):**

> - zväčšenie detailu,

< - zmenšenie detailu.

**Zmena vertikálnej škály (citlivosti):**

X - zväčšenie citlivosti

Y - zmenšenie citlivosti.

**Merané veličiny (prepočty strát):**

D - tlmenie (straty) na nejakom úseku v dB/km,

T – dvojbodová strata - rozdiel úrovní medzi 2 bodmi (kurzormi A a B),

S - strata zlepením.

**Ďalšie funkčné klávesy:**

H (header) - vypíše hlavičku,

L (lock) - uzamknutie určitého rozmeru medzi kurzormi A - B.

Pohyb sa uskutočňuje klávesmi

F9, F10 a šípkami hore a vpravo.

P - výstup na tlačiareň,

R (redirect) - priamy výstup do súboru,

W (swap) -

+ - vytlačí na tlačiareň obrazovku.

**Zmena jednotiek dĺžky:**

M - meter,

F - stopy,

E - míle.

**Ukončenie programu:**

1) ENTER – výstup na hladinu výberu vlákna,

2) ENTER – výstup na prvú hladinu,

3) Q (quit) - ukončenie práce s programom.

## Meranie č. 2

Zmerajte straty, tlmenie a rozdiel úrovní (diferenciu) optických vlákien reálne položených medzi miestami:

Optické vlákna: Vavrišovo – Matiašovce (1213, 1215)

Optické vlákna: Trnovec – Matiašovce (0613, 0615)

Optické vlákna: Važec – Poprad (0413, 0415)

### Dĺžka optického vlákna pre jednotlivé skupiny:

#### Skupina č. 1:

Optické vlákna: Vavrišovo – Matiašovce (1213, 1215) - merať celé vlákno.

#### Skupina č. 2:

Optické vlákna: Vavrišovo – Matiašovce (1213, 1215) - merať na dĺžke 7 km.

#### Skupina č. 3:

Optické vlákna: Vavrišovo – Matiašovce (1213, 1215) - merať na dĺžke 6 km.

#### Skupina č. 4:

Optické vlákna: Vavrišovo – Matiašovce (1213, 1215) - merať na dĺžke 5 km.

#### Skupina č. 5:

Optické vlákna: Trnovec – Matiašovce (0613, 0615) - merať celé optické vlákno.

#### Skupina č. 6:

Optické vlákna: Trnovec – Matiašovce (0613, 0615) - merať na dĺžke 7 km.



Skupina č. 7:

Optické vlákna: Trnovec – Matiašovce (0613, 0615) - merať na dĺžke 6 km.

Skupina č. 8:

Optické vlákna: Trnovec – Matiašovce (0613, 0615) - merať na dĺžke 5 km.

Skupina č. 9:

Optické vlákna: Važec – Poprad (0413, 0415) - merať na celej dĺžke vlákna.

Skupina č. 10:

Optické vlákna: Važec – Poprad (0413, 0415) - merať na dĺžke 7 km.

Skupina č. 11:

Optické vlákna: Važec – Poprad (0413, 0415) - merať na dĺžke 6 km.

Skupina č. 12:

Optické vlákna: Važec – Poprad (0413, 0415) - merať na dĺžke 5 km.

Straty a tlmenie merajte v  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  a na konci zadaného úseku optického vlákna. Meranie uskutočnite pomocou softvéru OTDRBA.

**Pokyny k úlohe č.2.:**

Zmerajte straty, tlmenie a rozdiel úrovní (diferenciu) optických vlákien položených medzi miestami so zadanou dĺžkou podľa rozdelenia skupín. Dĺžka optického vlákna je upresnená pre jednotlivé skupiny.

Straty a tlmenie merajte v  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  a na konci optického vlákna.

## Postup merania (Popis programu OTDRBA):

### a.) Meranie strát a tlmení:

- 1) Výber ponuky MS – DOS pri štarte PC,
- 2) Spustenie softvéru C:\FIBEROPT\OTDRBA\g.bat
- 3) Po spustení programu sa zobrazí tabuľka, z ktorej volíme Emulation <E>
- 4) Stlačením klávesy F2 a následne klávesy R sa zobrazí ponuka výberu cesty k adresáru ( C:\FIBEROPT\OTDRBA\DATA\), z ktorého sa načíta požadovaná krivka ( VIMO1213.dat ),
- 5) Zobrazí sa daná krivka a pomocou kláves < ← → > nastavíme požadovaný koncový bod B ( 7,0698 km – na osi ),
- 6) Stlačením klávesy F1 a následne klávesy M, šípkou < ↑ > zvolíme prácu s počiatočným bodom. Pomocou kláves < ← → > nastavíme polohu počiatočného bodu A ( 40,89 m – na osi, LSA = 7,66610 km).
- 7) Úsek (LSA), na ktorom sa meria, rozdelíme podľa zadania na 4 časti ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ , 1), pričom na každom pod úseku postupne zmeriame tlmenie (DISP) a stratu (LOSS). Do vopred pripravenej tabuľky zaznamenáme aj hodnotu vlnovej dĺžky  $\lambda$ .
- 8) Body 4 – 7 opakujeme pre ďalšiu krivku (VIMO1215.dat).

**b.) Meranie diferencie:**

- 3) Podľa bodu 4 (zadania) načítame prvú krivku (VIMO1213.dat),
- 4) Stlačíme klávesu F10 (Menu) a následne klávesu C (Waveform comparison),
- 5) Stlačíme klávesu F2 (Function) a následne klávesu R čím sa zobrazí menu, kde označíme druhý (porovnávací) súbor (VIMO1215.dat), potvrdíme <ENTER>. Ďalej stlačíme G (Execute),
- 6) Stlačíme klávesu F2 (Function) a následne klávesu D (Waveform of difference). Klávesov <ENTER> vyberiem danú krivku a stlačením klávesy G (Execute) potvrdíme výber (druhej) krivky (VIMO1215.dat), čím sa zobrazí rozdiel medzi dvoma krivkami (diferencia),
- 7) Diferenciu (DIFF) merajte na zadaných úsekoch dĺžky vlákna  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ , 1, alebo na vzdialenosti zadanej priamo na LC.

Návrh tabuľky pre meranie straty a tlmenia na jednotlivých úsekoch:

Tabuľka 6.1

Vlákno VI-MO 1213				
Trasa [km]	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
Straty [dB]				
Tlmenie [dB/km]				
$\lambda$ [SM]				

Tabuľka 6.2

Vlákno VI-MO1215				
Trasa [km]	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
Straty [dB]				
Tlmenie [dB/km]				
$\lambda$ [SM]				

Návrh tabuľky pre meranie diferencie na jednotlivých úsekoch:

Tabuľka 6.3

Trasa [km]	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
Diff [dB]				

## 7 PERSPEKTÍVI OPTICKEJ VLÁKNOVEJ KOMUNIKÁCIE

Súčasná možnosti a perspektívy optickej vláknovej komunikácie sú v použití všade namiesto metalických vodičov, vrátane koaxiálnych káblov a podobne.

V súčasnosti sa ako zdroje svetla pre optické komunikačné systémy používajú LED, alebo polovodičový (prípadne iný) laser. Optické vlákna sú celá sklenená na báze SiO<sub>2</sub>, alebo celá plastová a PCS (Plastic Clad Silica), kde je jadro optického vlákna zo skla a plášť zo silikónu. Dnes bežná dĺžka optického vlákna bez spojovania je väčšia, ako 10 km. Ako detektor sa používa PIN (Positive Intrinsic Negative) fotodióda, alebo lavínová fotodióda APD (Avalanche Photo Diode).

Vo vysielači sa elektrický signál nesúci informáciu konvertuje na optický signál, nasleduje jeho prenos a v prijímači sa naspäť konvertuje z optického na elektrický signál. Modulácia môže pritom byť **digitálna**, kde optická informácia sa prenáša v binárnom tvare. Vysielač pracuje, ako elektro - optické hradlo, ktoré emituje svetlo len keď je na výstupe úroveň H a neemituje svetlo, keď je úroveň L. Modulácia môže byť aj **analogová**, kde intenzita svetelného lúča z lasera, (alebo LED) sa mení spojité v závislosti od pôsobiaceho modulačného signálu. Vyžaduje sa však dobrá linearita výstupných charakteristík zdrojov svetla a je treba povedať, že pri analogovej modulácii, pri rovnakom výkone vysielača sa signál prenesie na menšie vzdialenosti, ako pri digitálnej modulácii. Na dlhých optických trasách je niekedy nutné zaradiť tzv. **retranslátory**, ktoré sú zložené z optického prijímača, impulzného zosilňovača, regenerátora optického signálu a optického vysielača. Dnes bez retranslátorov môžeme vďaka kvalitným optickým vláknám preklenúť vzdialenosť rádovo až stovky kilometrov.

### 7.1 Výhody optických prenosových systémov oproti klasickým metalickým

#### PRIMÁRNE VÝHODY:

- 1) Možnosť prenášať extrémne veľkú šírku pásma (napr. 3 – 10 Gbit/s).
- 2) Malý priemer a malá hmotnosť.
- 3) Odolnosť voči prepočutiam (pri paralelne vedených vláknach).

- 4) Odolnosť voči elektro magnetickému rušeniu, vlákno nepôsobí ako anténa. Vlákno je odolne voči RFI (Radio Frequency Interference), EMI (Electro Magnetic Interference), EMP (Electro Magnetic Pulses).
- 5) Neustále klesajúca cena. Optické vlákno je z kremičitého piesku ( $\text{SiO}_2$ ), prípadne plastických materiálov v porovnaní s metalickými (zvyšujúce sa ceny drahých kovov). Optické sú dnes už cenovo porovnateľné s metalickými. U optických je však ešte dosť drahá technológia výroby super čistých skiel.

### **SEKUNDÁRNE VÝHODY:**

- 1) Väčšia utajenosť prenášaných správ:
  - a) na rozdiel od koaxiálnych káblov, optické sú bez nežiadúceho elektro - magnetického vyžarovania,
  - b) v optických komunikačných systémoch nie je možné zaradiť do trasy „odbočku“ či iný prvok, bez vedomia možnosti ho detekovať (optická časová reflektometria – OTDR).
- 2) Väčšia bezpečnosť – nevznikne elektrická iskra (požiar).
- 3) Elektrická izolácia a jednosmerný prenos.
- 4) Väčšia životnosť optických systémov okolo 20 – 30 rokov (za použitia koaxiálnych káblov 12 – 15 rokov).
- 5) Lepšia odolnosť voči teplotám, korozívnym plynom, vlhkosti a chemickým kvapalinám.
- 6) Väčšia spoľahlivosť a jednoduchšia údržba (na výstavbu trasy nie je potrebné toľko opakovačov).
- 7) Neovplyvňuje iné optické, či neoptické prenosy (nevyžarujú signály) a nezhoršujú životné prostredie.
- 8) Možnosť jednoduchého rozšírenia prenosovej kapacity.
- 9) Šetrenie vzácnych materiálov.

## **NEVÝHODY:**

- 1) Vlákno je zo skla, preto je pri použití krehkejšie, ako metalické vedenia.
- 2) Nie sú údaje o dlhodobej napr. 20 ročnej stabilite.
- 3) Zložitá technológia výroby super čistých skiel.
- 4) Nutná dôslednosť a presnosť výroby.

## POUŽITÉ SKRATKY A SYMBOLY

<b>OV</b>	optické vlákno
<b>eV</b>	elektrónvolt
<b>We</b>	žiarivá energia
<b><math>\Phi_e</math></b>	žiarivý tok
<b><math>\omega</math></b>	priestorový uhol
<b>Ie</b>	žiarivosť bodového zdroja
<b>Ee</b>	intenzita ožiarenia
<b><math>\lambda</math></b>	vlnová dĺžka
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LD</b>	laserová dióda
<b>PCM</b>	pulzne kódová modulácia
<b>n</b>	index lomu
<b>SI – MM</b>	Step Index Multy Mode
<b>GI – MM</b>	Gradet Index Multy Mode
<b>SI – SM</b>	Step Index Singl Mode
<b>m</b>	azimutálne vidové číslo
<b>TM</b>	transverzálne magnetické vidy
<b>TE</b>	transverzálne elektrické vidy
<b>v</b>	normovaná frekvencia
<b><math>\Delta</math></b>	relatívny rozdiel indexov lomu jadra a plášťa
<b>a</b>	vzdialenosť určujúca rozhranie jadra od plášťa
<b><math>v_c</math></b>	hodnota kritickej normovanej frekvencie
<b><math>M_s</math></b>	vidový objem
<b>LP<sub>01</sub></b>	vedenie dominantného (základného) vidu pre jednovidový režim
<b>NA</b>	numerická apertúra
<b><math>\gamma_{vst}</math></b>	maximálny uhol vstupujúceho lúča



<b>NA<sub>c</sub></b>	numerická apertúra pre iné prostredie než vzduch
<b>NA<sub>z</sub></b>	numerická apertúra zdrojového vlákna
<b>NA<sub>p</sub></b>	numerická apertúra príjímacieho vlákna
<b>S<sub>z</sub></b>	prierez jadra zdroja
<b>S<sub>p</sub></b>	prierez jadra prijímacieho vlákna
<b>OPK</b>	optický kábel
<b>SDH</b>	synchrónna digitálna hierarchia
<b>ADM</b>	add/dropp multiplexor
<b>DTÚ</b>	tranzitná ústredňa
<b>HOST</b>	hlavná ústredňa
<b>RSU</b>	vzdialené účastnícke jednotky
<b>S-LED</b>	čelne emitujúce diódy
<b>E-LED</b>	hranovo emitujúce diódy
<b>P</b>	materiál typu P
<b>N</b>	materiál typu N
<b>PN</b>	polovodičový prechod medzi materiálmi, (typ fotodiódy)
<b>PIN</b>	typ fotodiódy (ako PN, ale s vložením intrinzickej vrstvy)
<b>I</b>	intrinzičná vrstva
<b>B-LED</b>	dióda typu Burrus
<b>ILD</b>	Injection Laser Diodes
<b>LASER</b>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<b>DFB</b>	Distributed Feedback Lasers
<b>APD</b>	Avalanche Photodiodes
<b>RAPD</b>	lavínová fotodióda s ochranným prstencom
<b>η</b>	kvantová účinnosť
<b>NEP</b>	Noise Equivalent Power
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing

<b>STM</b>	Synchronous Transfer Mode
<b>OM</b>	optický multiplexer
<b>OD</b>	optický demultiplexer
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>OA</b>	WDM optický zosilňovač
<b>F-OADM</b>	Fixed Optical Add Dropp Multiplexer
<b>PDH</b>	Plesiochronous Digital Hierarchy
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fibre Amplifiers
<b>APSD</b>	Automatic Power Shut Down
<b>RO</b>	radiace obvody
<b>PC</b>	Personal Computer
<b>Q3</b>	normalizované rozhranie
$\alpha_t$	celkové tlmenie signálu
$P_i$	vstupný výkon optickej trasy
$P_0$	výstupný výkon optickej trasy
<b>L</b>	dĺžka optického vlákna
$HE_{11}^x HE_{11}^y$	dva navzájom ortogonálne polarizované vidy
$B_x$ a $B_y$	konštanty šírenia
<b>OTDR</b>	Optimal Time Domain Reflectometry
<b>TG</b>	taktovací generátor (astabilný klopny obvod)
<b>MKO</b>	mono stabilný klopny obvod
<b>OK</b>	optický konektor
<b>OMV</b>	merané optické vlákno
<b>OV</b>	optická výhybka (hranol)
<b>OP</b>	optický prijímač (fotodetektor)
<b>ČSS</b>	číslicové spracovanie signálu
$P_b(z)$	spätné šírenie od začiatku vlákna
$P_0 \Delta t$	výkon vysielaného impulzu v čase

<b>s</b>	činiteľ spätného rozptylu
<b><math>\alpha_{\kappa}</math></b>	činiteľ strát
<b><math>v_g</math></b>	skupinová rýchlosť šírenia
<b>Z</b>	Fresnelov odraz
<b><math>a_{1-2}</math></b>	tlmenie medzi dvoma bodmi na trase
<b><math>U_1, U_2</math></b>	napät'ová úroveň medzi meranými bodmi
<b>PCS</b>	Plastic Clad Silica
<b>RFI</b>	Radio Frequency Interference
<b>EMI</b>	Electro Magnetic Interference
<b>EMP</b>	Electro Magnetic Pulses

## Zoznam použitej literatúry

- [ 1] STRNAD, Stanislav: Optická vlákna a telekomunikace. Elcom Education s.r.o. - Štolba. 1993, ISBN 80-900721-4-3.
- [ 2] TURAN, Ján: Optoelektronika. Bratislava, Alfa 1989.
- [ 3] ČUCHRAN, J.: Digitálne prenosové systémy. Bratislava, STU, FEI, 1995.
- [ 4] DAVID, Ivo: Výběr optického vlákna. Telekomunikace, Roč. 36, č.6, 1999, s.3-6. ISSN 0040-2591
- [ 5] DUBOVSKÝ, Pavel - PATRICK Stibor: Optická vlákna pro vysokokapacitní přenosové systémy. Telekomunikace, Roč. 35 č.12, 1998, s.10-13. ISSN 0040-2591
- [ 6] DAVID, Ivo: Parametry optické přenosové trasy. Telekomunikace, Roč. 34, č.10, 1997, s.13-16. ISSN 0040-2591
- [ 7] ZIEGLER, Miroslav: Optické technologie nás přivádějí do epochy internetu. Telekomunikace, roč. 37, č.6, 2000, s.3-7. ISSN 0040-2591
- [ 8] Alcatel s.r.o.: Optická sieť. Telekomunikácie a podnikanie. č.6, 1998, s.31-32. ISSN 1211-5525
- [ 9] Prezentácia s. r. o. SITEL: Optické prenosové trasy. 1999.
- [10] NOHEJL, Ladislav: Aplikovaná optoelektronika. Amatérské rádio, č.3, Série B, 1984, s.82-84.

**Názov : TELEKOMUNIKAČNÉ SIETE IV.  
(Opokomunikačné systémy)**

**Autori : Ing. Igor ČERNÁK, PhD.  
Ing. Michal JENČO, PhD.**

**Vydala : Vojenská akadémia v Liptovskom Mikuláši**

**Náklad : 60 ks**

**Počet strán : 120**

**Vydanie : prvé**

**Formát : A5**

**Vydané : 2000**

**ISBN 80 – 8040 – 137 - 3**