

Optické komunikácie

Optoelektronické prvky

Dr.h.c. Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

2. ZÁKLADNÉ OPTOELEKTRONICKÉ PRVKY V OPTICKÝCH KOMUNIKAČNÝCH SYSTÉMOCH

Kľúčové zariadenia pre optický prenos:

- n Laserová dióda (LD), nízko - stratové optické vlákna, optické káble, spojky, konektory, fotodiódy (PD), vláknové väzobné prvky, WDM multiplexory
- n Rubínový laser - T. H. Maiman v r. 1960
- n V súčasnosti pre optický prenos dostupné LD s λ : 0,8 μm ; 1,3 μm ; 1,5 μm
- n V súčasnosti straty optických vlákien pod 0,2 dB/km pri 1,55 μm

2.1 OPTICKÉ VLÁKNA A OPTICKÉ KÁBLE

2.1.1 OPTICKÉ VLÁKNA

- n **Základný materiál** na výrobu OV: SiO_2
Index lomu SiO_2 je okolo 1,45 - 1,46 pri $1 \mu\text{m}$
- n Základným javom vedenia svetla v OV je **totálny odraz**
- n **Jadro** - vyšší index lomu
- n Jadro je obklopené **plášťom**

Vo všeobecnosti vlákna s konštantným indexom lomu jadra $n_1(r)$ sa nazývajú:

Optické vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. **stupňovité optické vlákno – SI (Step - Index)**.

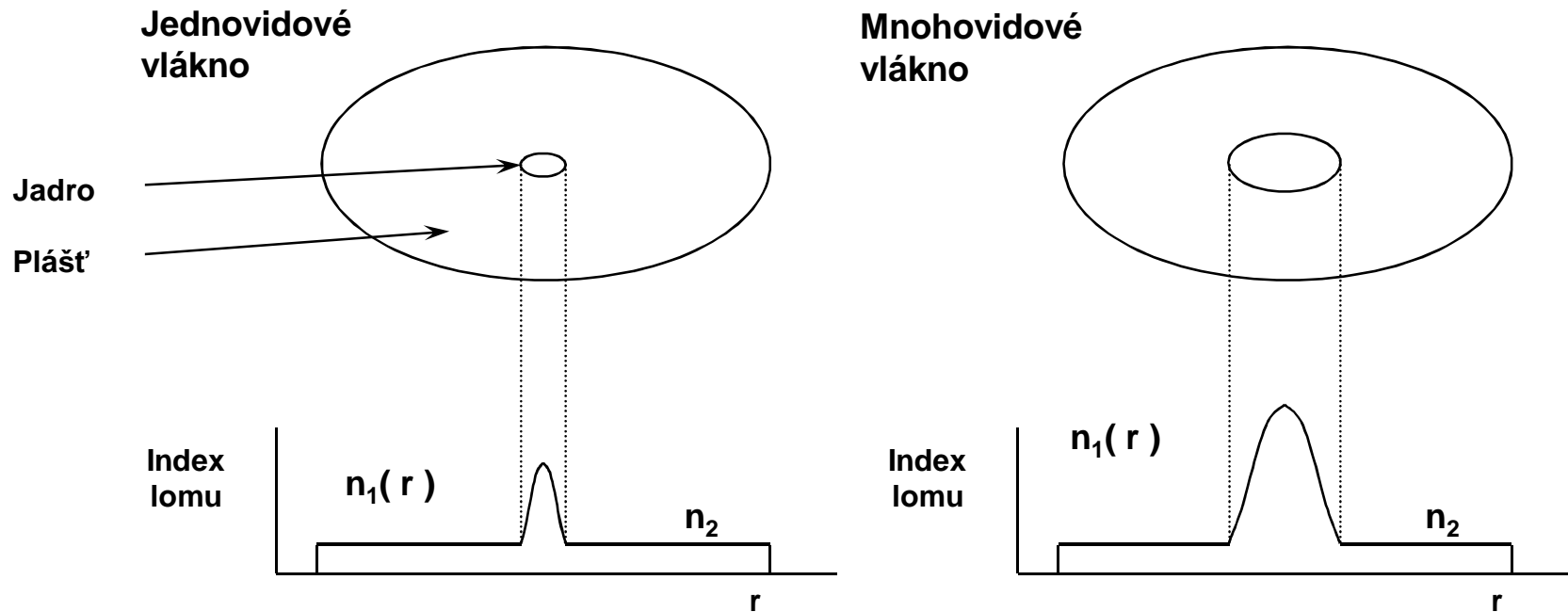
Metódy na výrobu preformy usadzovaním z plynnej fázy:

- n **OVD** (Outer Vapor Deposition)
- vonkajšie usadzovanie z plynnej fázy

- n **MCVD** (Modified Chemical Vapor Deposition)
- modifikované chemické usadzovanie z plynnej fázy

- n **VAD** (Vapor Axial Deposition)
- axiálne usadzovanie z plynnej fázy

Prierezová oblasť



Obr. 2.1 Štruktúra optického vlákna.

Typické hodnoty		
	Jednovidové vlákno	Mnohovidové vlákno
Priemer jadra	8 – 10 mm	50 mm
Priemer plášťa	125 mm	125 mm
Relatívny rozdiel indexu lomu D	0,2 % - 0,3 %	1 %

Profil indexu lomu pre slabo vedúce **OV**:

$$n_1(r) = n_0 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

pričom:

$$\Delta = \frac{(n_0 - n_2)}{n_0}$$

- kde
- a je polomer jadra ($2a$ je priemer jadra)
 - n_2 je index lomu plášťa
 - Δ je relatívny rozdiel indexu lomu ($\Delta \ll 1$), $\Delta = 0,1 - 0,3\%$
 - α je parameter profilu indexu lomu **OV**

Pre **SI** vlákno je $\alpha \rightarrow \infty$

Normalizovaná frekvencia OV:

$$V = 2p.a \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}}{l} \approx 2p.a.n_0 \frac{(2\Delta)^{\frac{1}{2}}}{l}$$

kde l je vlnová dĺžka voľného prostredia

- prenáša sa iba 1 vid, ak $V < 2,405$
- $V_c = 2,405$, **medzná frekvencia** pre vid HE_{11} alebo LP_{01}
- Jednovidový prenos: $V < V_c$
- Mnohovidový prenos: $V > V_c$

Mnohovidové optické vlákna - MM (Multi - Mode)

Gradientné mnohovidové optické vlákno, tzv. optické vlákno s **gradientným (spojitým) profilom indexu lomu - GI - MM (Graded - Index Multimode)**

– najčastejšie má tzv. **parabolický profil indexu lomu, $a = 2$**

Straty optického vlákna zahŕňajú **vlastné materiálové straty** $\alpha(\lambda)$, krivku spektrálneho tlmenia vyjadríme:

$$a(l) = \frac{C_1}{l^4} + C_2 + A(l)$$

- kde
- C_1 a C_2 sú konštanty
 - $A(l)$ je funkcia vlnovej dĺžky

1.člen výrazu: **Rayleighove** rozptylové straty spôsobené nehomogenitami v materiáli **OV**, ktorého rozmery sú menšie ako λ prenášaného svetla

Konštanta $C_1 = 0,6 - 0,8 \mu\text{m}^4 \text{ dB} / \text{km}$

2.člen výrazu: straty spôsobené nepravidelnosťou štruktúry **OV** - **mikroohyby** a rozhranie jadro - plášť

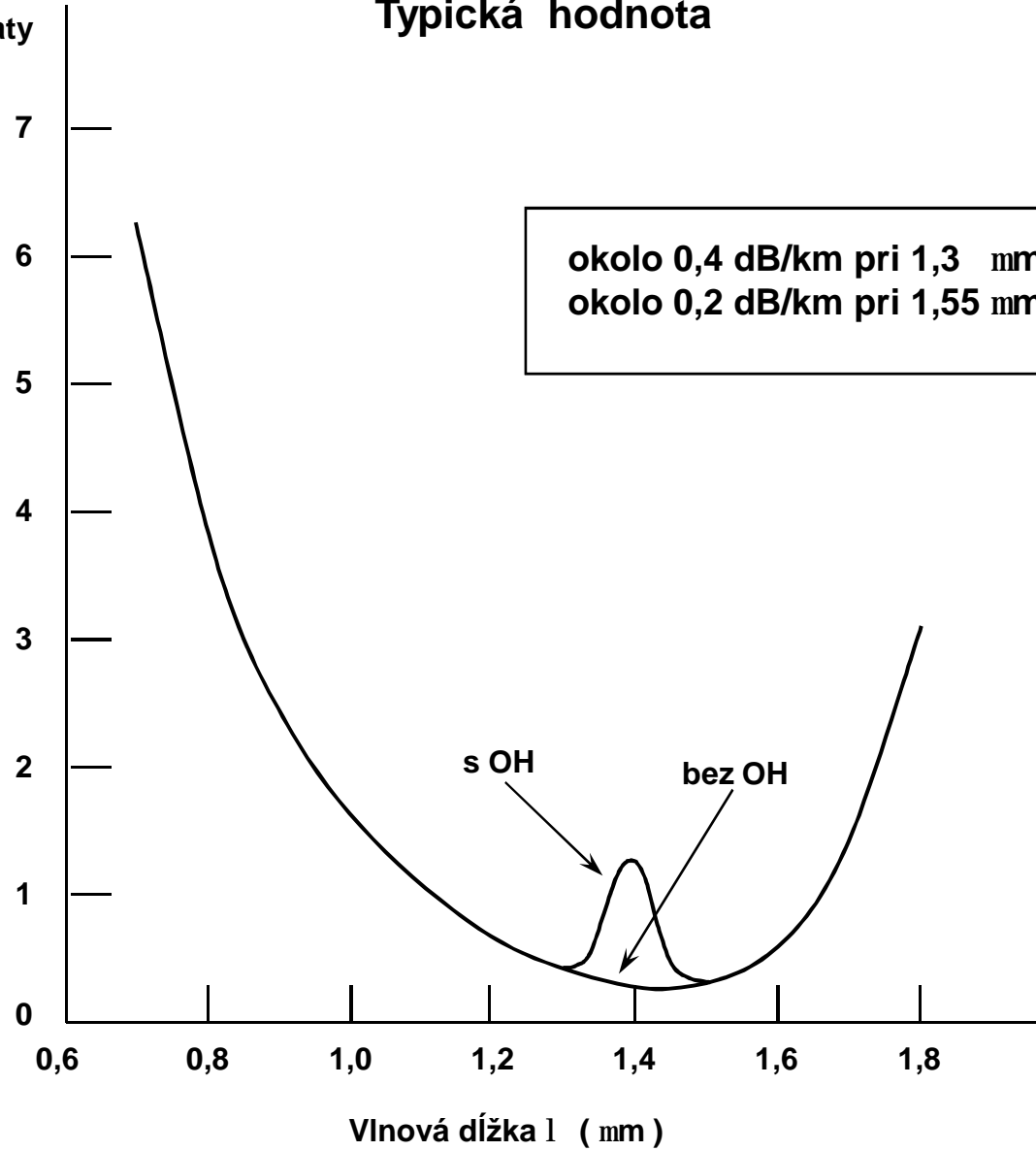
Konštanta C_2 - veľmi malá hodnota a možno ju zanedbať

3. člen výrazu: straty na nečistotách, absorpcia na **OH** molekulách (**OH** a kovové ióny sú majoritné nečistoty pre vlákno)

Straty spôsobené **OH** molekulami existujú pri vlnových dĺžkach 0,95; 1,13; 1,24; 1,39; 1,9 μm

Prenosové straty
(dB / km)

Typická hodnota



- n **DISPERZIA** - dôležitý parameter pri návrhu optických prenosových systémov
- rôzne spektrálne zložky signálu sa šíria rôznou rýchlosťou

- n Skupinové oneskorenie t_g , na jednotku dĺžky:

$$t_g = \frac{1}{v_g} = \frac{db}{d\omega}$$

- kde
- v_g je skupinová rýchlosť
 - b je konštanta šírenia
 - ω je kruhová frekvencia

- n **Vidová disperzia** - súvisí s rôznou rýchlosťou šírenia jednotlivých vidov v MM OV, kde je dominantná
- n **Materiálová disperzia** - index lomu jadra a plášťa je závislý od vlnovej dĺžky
 - vzniká v dôsledku rôznych v_g spektrálnych zložiek signálu
- n **Vlnovodová disperzia** - spôsobená vlnovodovou štruktúrou
 - vzniká v dôsledku závislosti konštanty šírenia od frekvencie
- n **Profilová disperzia** - vzniká v dôsledku rôzneho profilu indexu lomu OV

Materiálová a vlnovodová disperzia sú dôležité v jednoividových optických vláknach (hodnota materiálovej je väčšia)

Impulzy svetla, ktoré sa šíria jednovidovým vláknom sa rozširujú na impulzy so šírkou d_T :

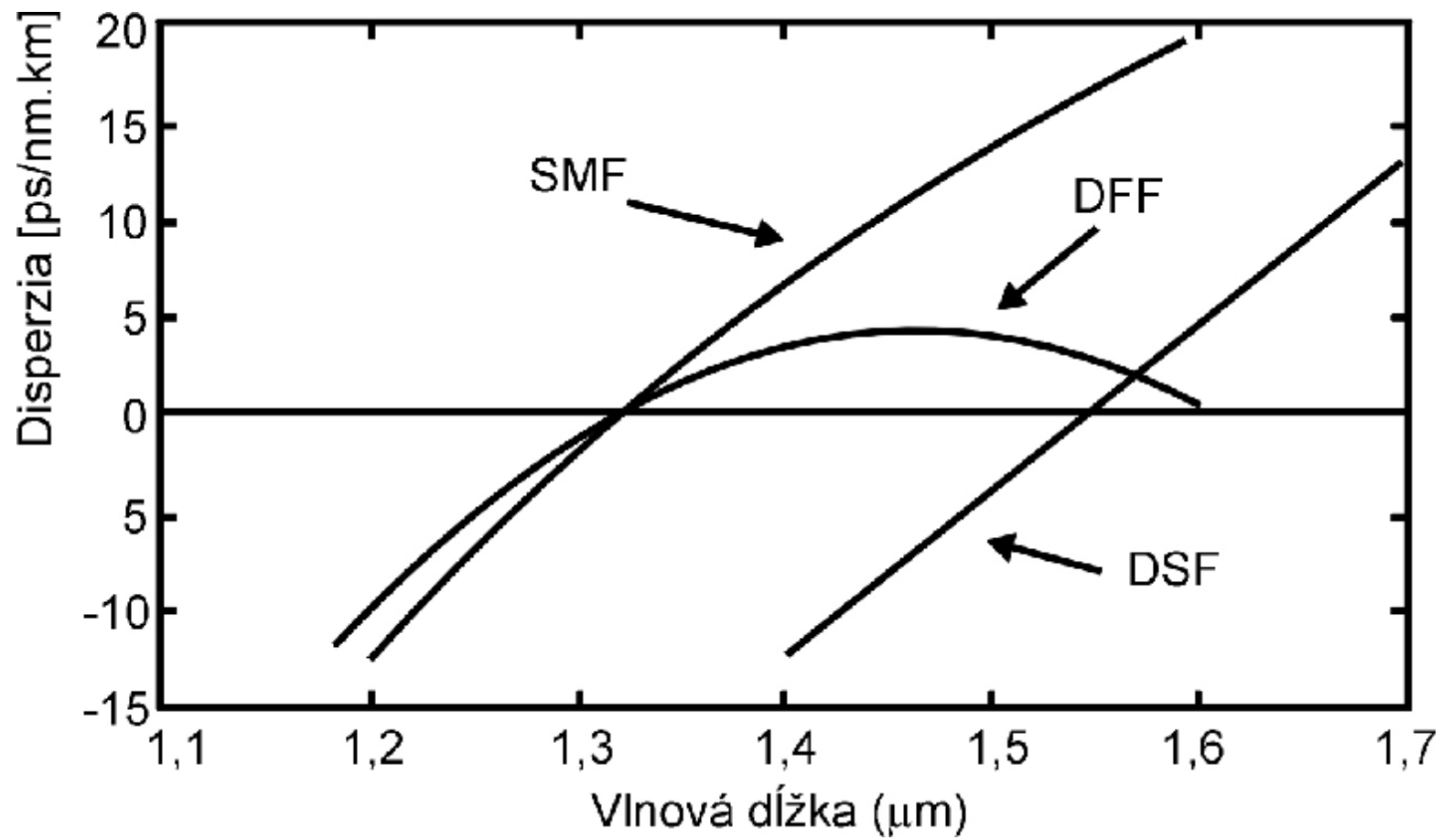
$$d_T = (s_m + s_w) d_l$$

- kde
- d_T je šírka impulzu
 - s_m je materiálová disperzia
 - s_w je vlnovodová disperzia
 - d_l je spektrálna šírka zdroja

- n **Materiálová disperzia je nulová** pre určitú vlnovú dĺžku λ_0
 - Pre SiO_2 vlákna je $\lambda_0 = 1,3 \mu\text{m}$

- n Vlákna s $\lambda_0 = 1,5 \mu\text{m}$ sa nazývajú:
Vlákna s posunutou disperziou ,
tzv. **DSF vlákna (Dispersion - Shifted Fibers)**

- n Disperzia zahŕňa materiálovú aj vlnovodovú disperziu



Frekvenčná odozva $H(f)$ je Fourierovou transformáciou impulznej odozvy $h(f)$:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

kde • $h(t)$ je v tomto prípade nahradená svetelným pulzom so šírkou δ_T

$$H(f) \approx \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt - 2\pi f^2 \int_{-\infty}^{\infty} t^2 h(t) dt = H(0) \left[1 - 2\pi f^2 s_t^2 \right]$$

kde • s_t je stredná kvadratická šírka $h(t)$

3 - dB šírku pásma f_{3dB} získame ak použijeme $\pi f^2 \sigma_t^2 = 1/4$

Výsledkom je:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2ps_t}$$

Kvalita OV:

$$B_{opt} \cdot L = \frac{0,55}{(s_m + s_w) d_l}$$

2.1.2 OPTICKÉ KÁBLE

- n Optické vlákna sú pre optické prenosové systémy používané vo forme optického kábla

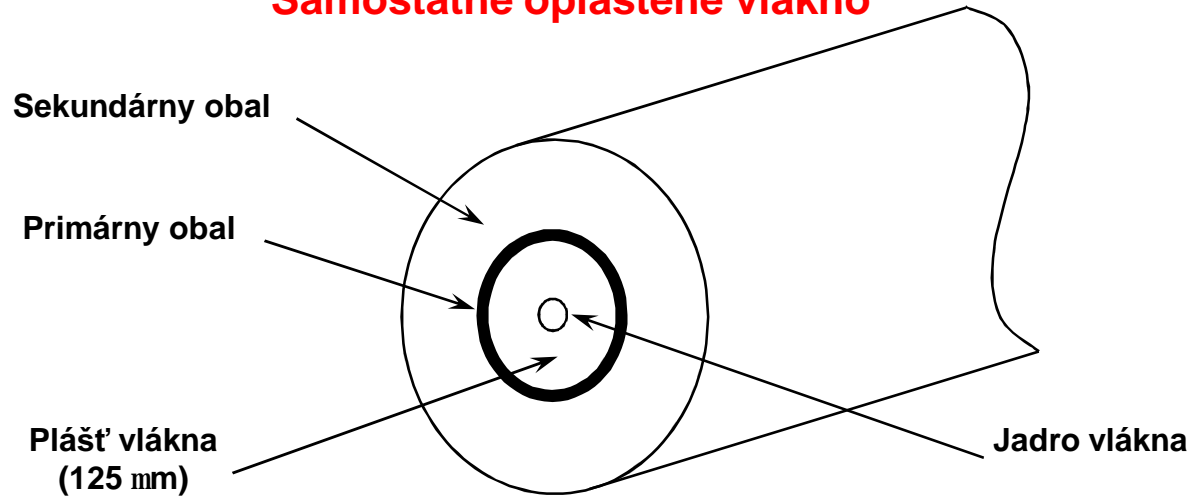
Typy optických káblov:

- 1.) **Jednotlivé optické vlákna** pokryté ochrannými vrstvami
- 2.) Optické káble **s optickou vláknovou jednotkou** -
- viac usporiadaných plochých optických káblov

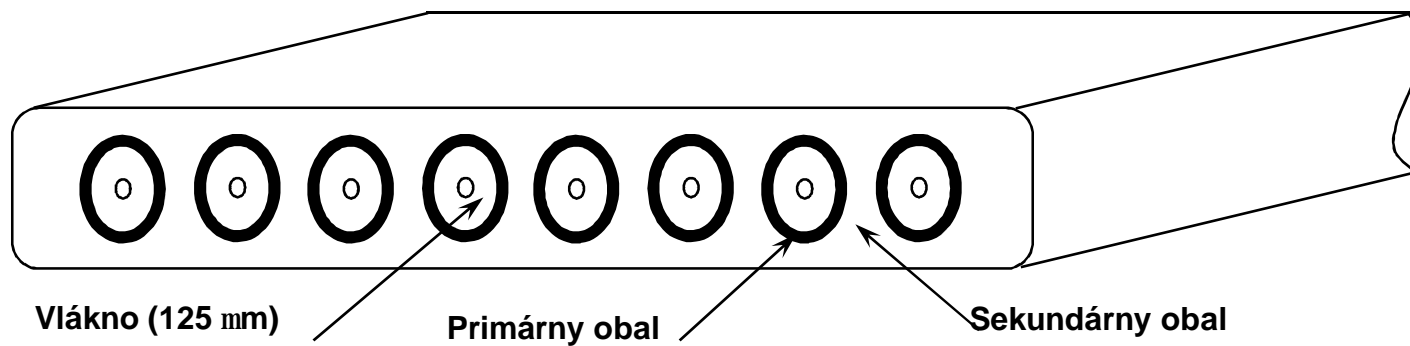
Káblované vlákno (125 mm) je pokryté dvoma ochrannými vrstvami:

- n **Primárnou**
- n **Sekundárnou**

Samostatne opláštené vlákno



Plochý optický kábel (8 – vláknový)



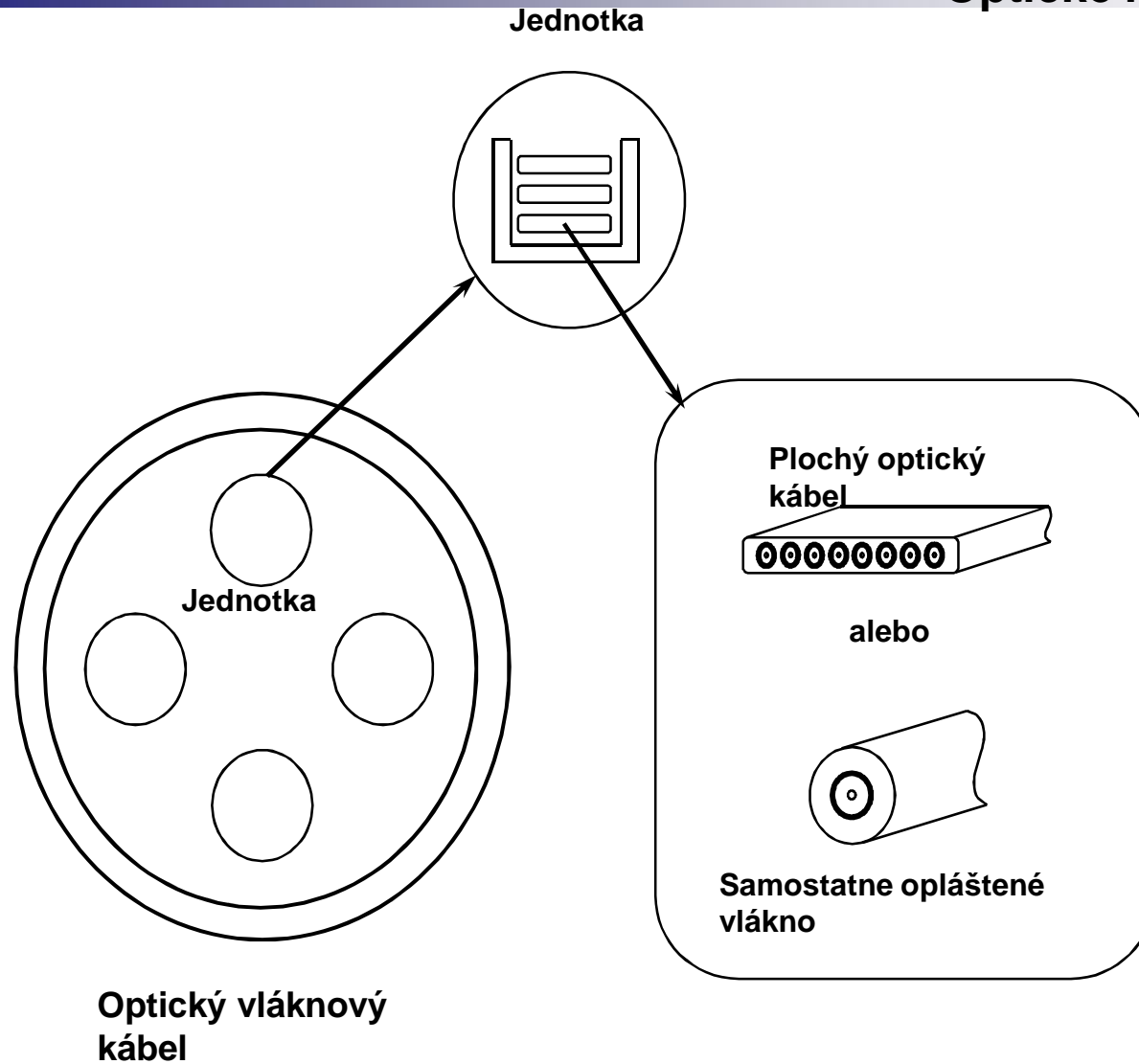
Obr. 2.4 Štruktúry optického kábla.

Priemer **OV** je potom v rozmedzí 0,5 - 1 mm

- n **Optické káble s optickou vláknovou jednotkou** majú štruktúru optických vlákien usporiadanú v riadku a sekundárne vrstvy vlákien majú podobu akýchsi pásikov
- n **Optický vláknový kábel s veľkým počtom optických vlákien** vytvára jednotku (celok), ktorá obsahuje niekoľko optických káblov typu 1.) alebo 2.)
- n Obyčajne sú optické káble **samonosné**
- n Ťahové prvky sú **dielektrické**

Podľa odolnosti voči požiaru sa delia na:

- **Indoor** (do budov)
- **Outdoor** (vonkajšie)



Obr. 2.5 Štruktúra optického vláknového kábla.

Najdôležitejšie parametre optického prenosového systému:

- n Vlnová dĺžka
- n Prenosová rýchlosť
- n Prekľnutelná dĺžka
- n Zdroj svetla
- n Optický detektor a iné

Návrh káblovej trasy a technická inštalácia kábla

- n Inštalácia kábla, spojenie optických vlákien káblov sa robí postupne (sekvenčne)
- n Po konštrukcii káblovej siete: testovanie meraním optických strát
Vo všeobecnosti sa používa metóda:
OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)
- n Spolu s káblovou sieťou je inštalované aj prenosové zariadenie
- n Nakoniec sa celý optický prenosový systém testuje

Tabuľka 2.1 :

	100-Optický vláknový kábel	1.000-Optický vláknový kábel	Optický verzus * kovový kábel
Vonkajší priemer	~ 15 mm	~ 40 mm	~ 1 / 3 - 1 / 2
Hmotnosť	~ 0,2 kg / m	~ 1,4 kg / m	~ 1 / 15 - 1 / 8
Prenosové straty #			~ 1 / 1.000
<p>* Keď porovnáваме 100 - párový a 1.000 - párový kovový kábel</p> <p># Predpokladaná prenosová rýchlosť je 100 MB / s</p>			

2.1.3 CELOPLASTOVÉ (POF - Plastic Optical Fibers) A POLYMER - PLÁŠŤ - KREMÍK (PCS - Polymer - Clad - Silica) OPTICKÉ VLÁKNA

JARDO:

1. Polymetylmetakrylát (PMMA - Perspex)

- n Lepšie mechanické vlastnosti
- n Odolnosť voči chemickému pôsobeniu

2. Polystyrén (PS)

- n Ľahšia výroba
- n Nepotrebuje iniciátor
- n Menej hygroskopický

- Plášť** - fluorokarbónový polymér
- silikónový polykarbonát (PC)

Výhodné vlastnosti:

- n Veľmi lacné
- n Ľahko sa spájajú
- n Ľahko sa s nimi pracuje
- n Veľký priemer 0,5 - 1 mm
- n Veľká numerická apertúra 0,54
- n Relatívne veľké tlmenie a disperzia
- n Menia svoje vlastnosti s teplotou
- n Horný teplotný limit

Minimálne tlmenie v oblasti vlnových dĺžok 0,5 - 0,8 μm

Vlákna s jadrom **PC** 700 dB / km pri $\lambda = 760 \text{ nm}$

Vlákna s jadrom **PMMA** 55 dB / km pri $\lambda = 570 \text{ nm}$

Vlákna s jadrom **PS** 114 dB / km pri $\lambda = 670 \text{ nm}$

Ak vymeníme vodík H[®] za deutérium D[®] PMMA - D₂
PMMA - D₂ vlákna 20 dB / km pri $\lambda = 650 - 680$

Tabuľka 2.2 :

PARAMETER		POF			PCS
JADRO : materiál index lomu	PMMA 1,49	PS 1,59	PS 1,59	PC 1,586	Kremík 1,46
PLÁŠŤ : materiál index lomu	Fluorokarbón 1,39	PMMA 1,49	Silikónová živica 1,40	Lak 1,491	Silikónová živica 1,40
Numerická apertúra	0,54	0,55	0,75	0,54	0,41
Disperzia [ns / km . nm]	340	340	640	340	200
Šírka pásma [Mbit / s] km	3	3	1,5	3	3
a_f [dB / km]	55	114	150	700	8

2.2 VLÁKNOVÉ SPOJKY A KONEKTORY

- n K využívaniu výborných vlastností nízko - stratových optických vlákien v prenosových systémoch potrebujeme spojky a **konektory** s malým tlmením
- n Straty **spojky** 0,3 dB sa zhodujú asi so stratami 1 km dlhého optického vlákna

Straty spojky alebo konektora L jednovidového optického vlákna spôsobené **priečnym posunutím** d:

$$L = 4,34 \cdot \left(\frac{d}{w} \right)^2 \quad [dB]$$

kde w je polomer základného vidu
 n Pre straty pod 0,25 dB, hodnota d musí byť menšia ako $1 \mu\text{m}$
 n V praxi straty nezávisia iba od veľkosti d , ale aj od uhlovej výchyľky

ODRAZ - je tiež dôležitým faktorom pre aplikácie, ako je:

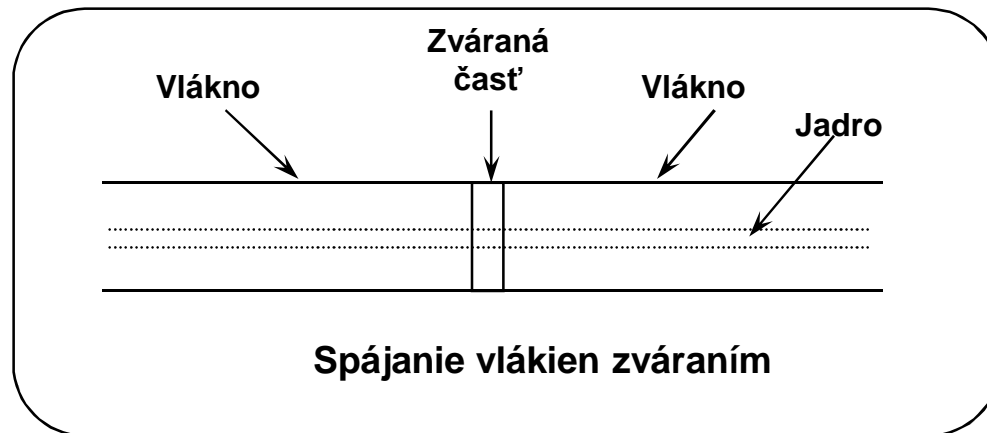
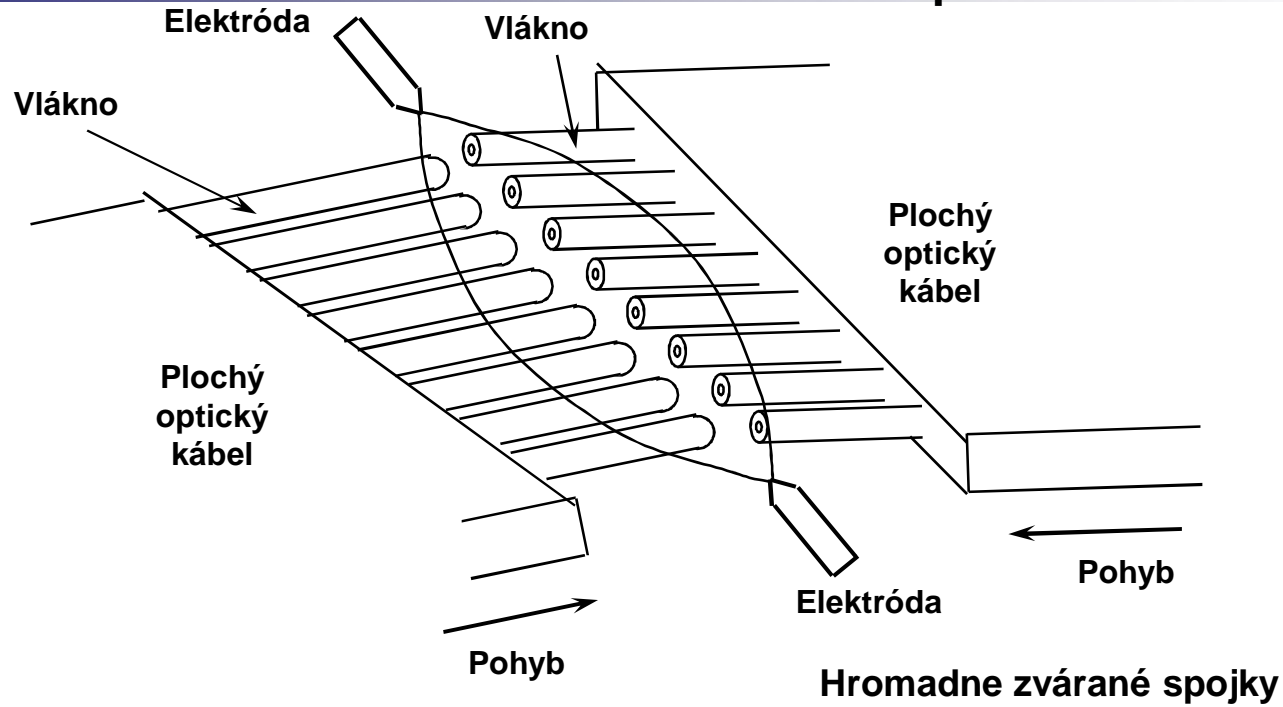
- Vysoká prenosová rýchlosť
- Analógový prenos
- Koherentné prenosové systémy

Odraz môže blokovat' **optický izolátor**, ktorý je ale veľmi drahý

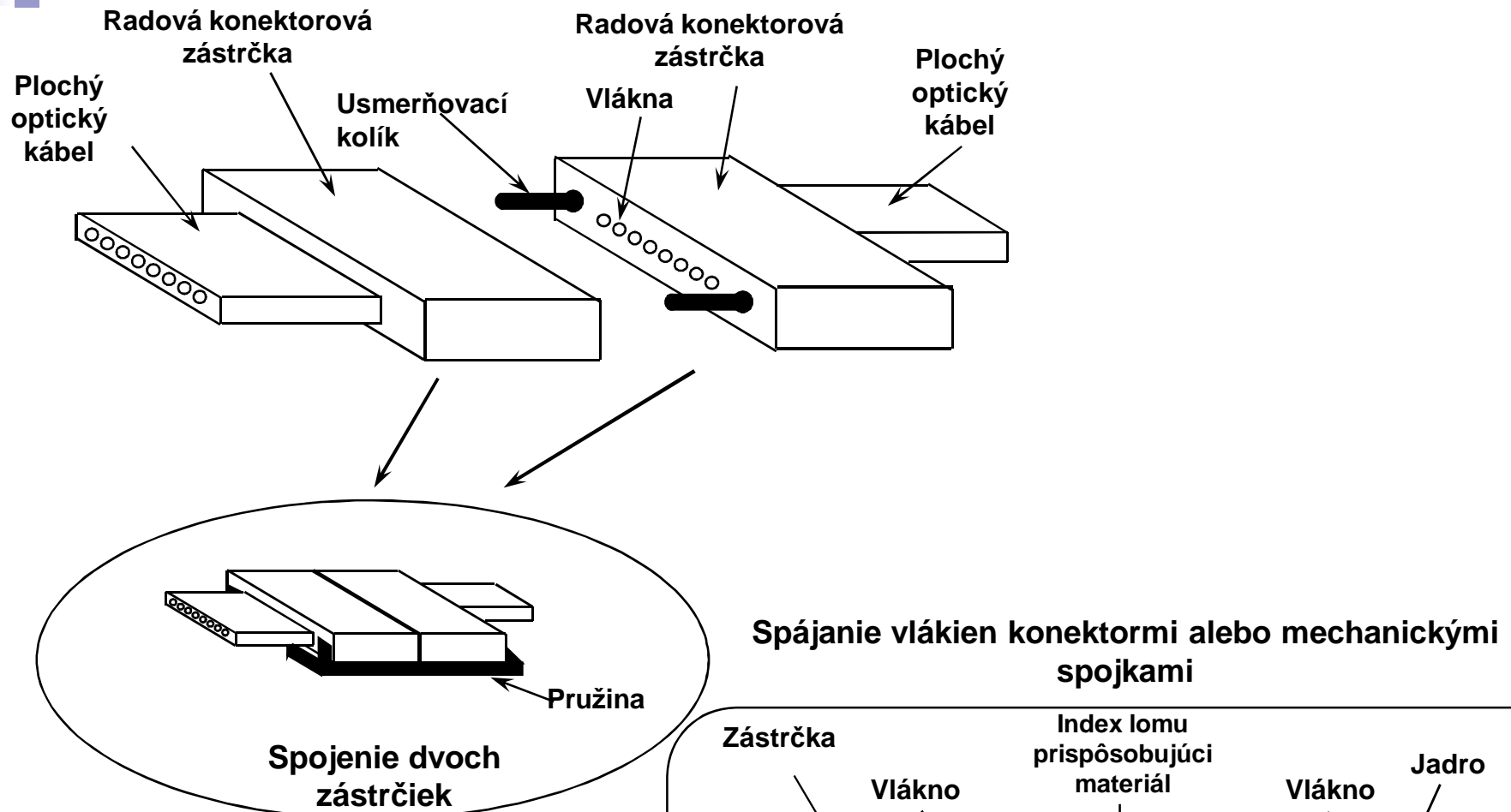
Odraz spojok alebo konektorov spôsobený rozdielnymi indexami lomu:

$$F = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2$$

kde F je **Fresnelov odraz** (straty) - **Ideálne:** $n_1 = n_2$



Obr. 2.8 Zvárané spojky optických vlákien.

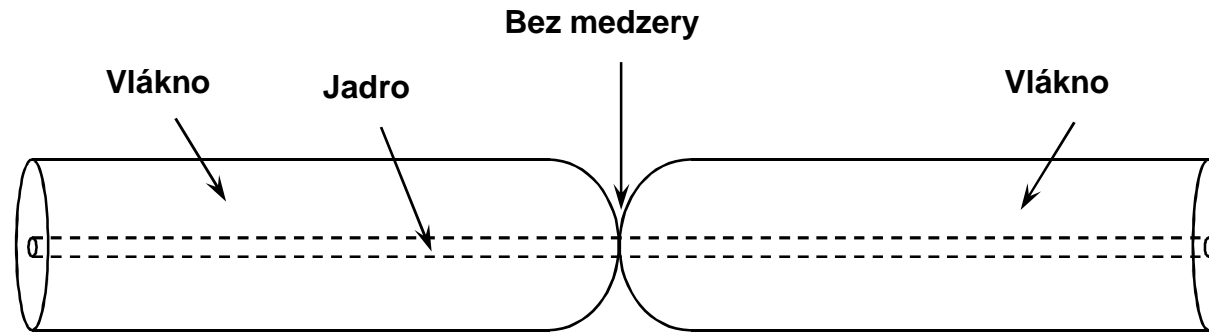


Obr. 2.9 Rad konektorov.

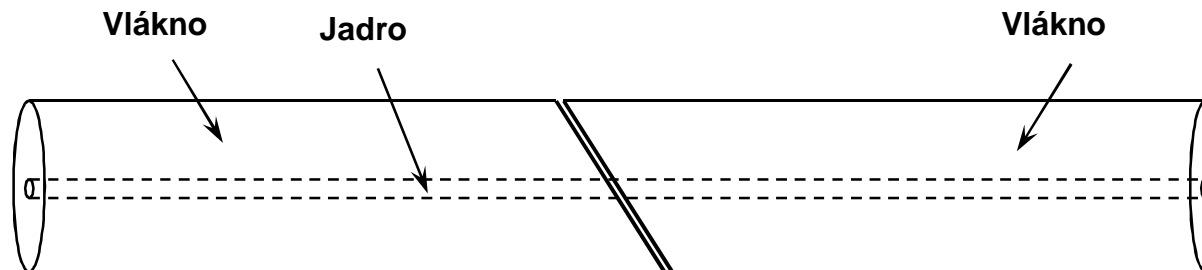
Odrazy zváraných spojok sa vypočítajú pomocou Δ podľa Fresnelovho vzťahu:

$$F = \left[\frac{(n_1 - n_2)}{2n_1} \right]^2 = \frac{\Delta^2}{4}$$

- n Odraz 12 kaskádnych spojok so stratami 5 dB je okolo - 50 dB a odraz zváraných spojok gradientných optických vlákien so stratami 0,1 dB je asi - 68 dB
- n Pre jednovidové OV so stratami spojky pod 0,1 dB, je odraz pod - 70 dB
- n Pre konektor vyrobený technológiou odlievania z plastu je odraz odhadnutý podľa **Fresnelovho vzťahu**
- n Prakticky je možné získať odraz s hodnotou - 45 dB



Fyzický kontakt
(Nízke straty a malá reflexia)



Šikmý kontakt
(Nízka reflexia)

Nízkoodrazové a nízkostratové metódy pre optické konektory.

Nízko odrazové metódy pre optické konektory bez použitia imerzného materiálu:

1.) Fyzický kontakt - dve zástrčky spájané bez vzniku štrbiny
- prakticky odraz okolo - 45 dB

2.) Šikmý zdokonalený konektor - nízke odrazy (okolo - 60dB)

- má vo všeobecnosti väčšie straty ako obyčajný konektor

2.3 LASEROVÉ DIÓDY - LD

- n LD sa používa ako **zdroj svetla**
- n Najskôr sa LD zdokonaľovali pre vlnové dĺžky 0,8 - 0,9 μm , neskôr pre 1,3 - 1,6 μm
- n Pre systémy používajúce jednovidové OV sú výhodnejšie ako LED - dosahuje sa lepšie naviazanie optického výkonu do optického vlákna

Parametre zohľadnené pri návrhu optického prenosového systému:

- n **Vlnová dĺžka**
- n **Modulačný formát**
- n **Šírka spektrálnej čiary**
- n **Mód laserovania (jednovidový, mnohovidový)**

LD určené pre prenosové systémy:

Pre vlnové dĺžky $0,8 - 0,9 \mu\text{m}$

(oblasť krátkych vlnových dĺžok):

- **AlGaAs** s aktívnou vrstvou
- GaAs pre substráty

Pre vlnové dĺžky $1,3 - 1,6 \mu\text{m}$

(oblasť dlhých vlnových dĺžok):

- **InGaAsP** s aktívnou vrstvou
- InP pre substrát

Základné laserové diódy (LD):

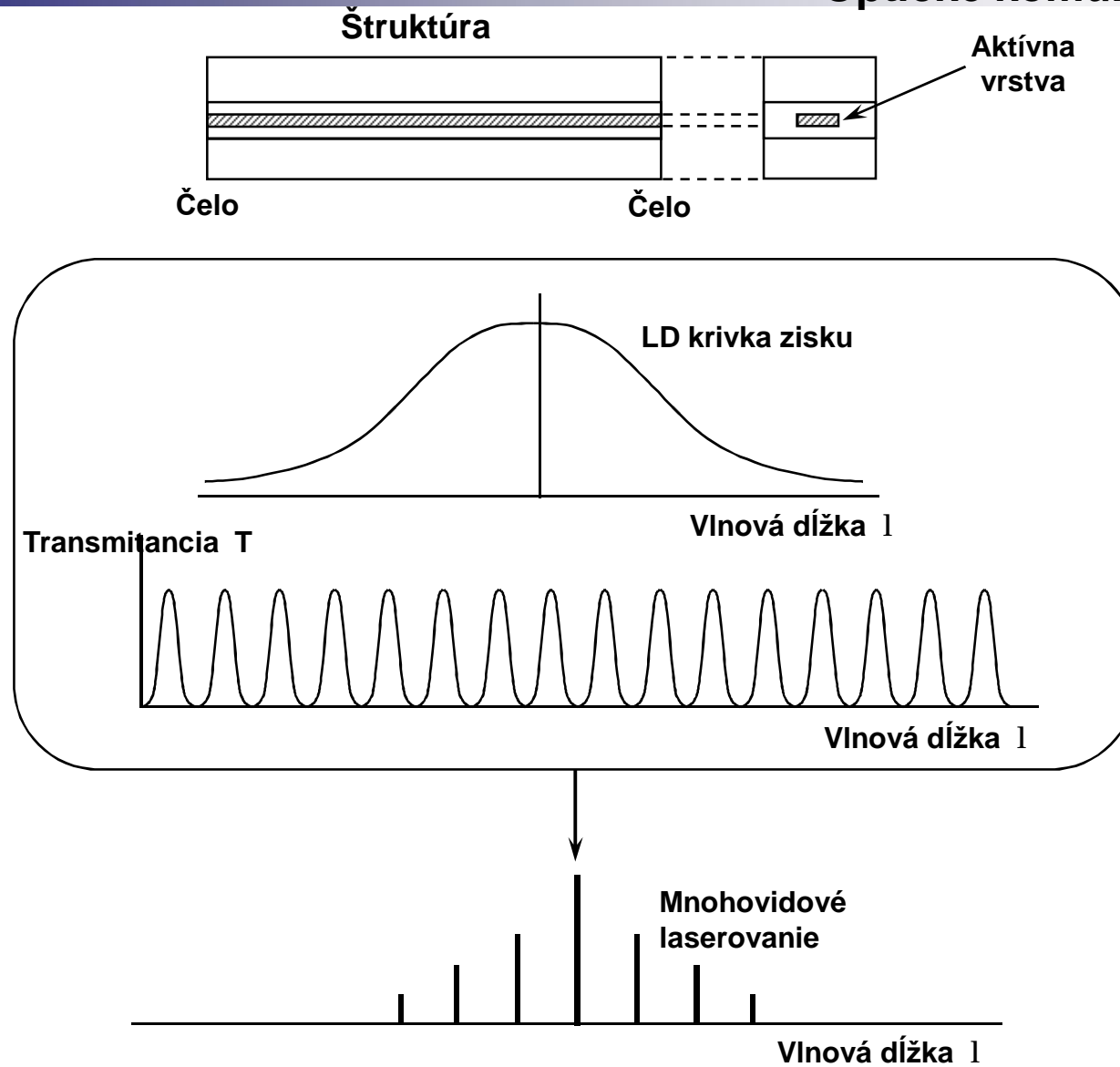
n Fabry - Perotová laserová dióda (**FP - LD**)

n Laserová dióda s distribuovanou spätnou väzbou

- **Distributed Feedback LD (DFB - LD)**

n Laserová dióda s distribuovaným Braggovým reflektorom

- **Distributed Bragg Reflector (DBR - LD)**



Obr. 2.12 Fabryho – Perotova laserová dioda.

2.3.1 FABRY PEROTOVÁ LASEROVÁ DIÓDA - FP LD

n Fabryho - Perotov rezonátor

tvorený dvoma čelami - zrkadlami

Zisk rezonátora (dutiny):

$$\exp(2\Gamma gL)$$

Výkonové straty:

$$\frac{1}{R^2} \exp [2a_1\Gamma L + 2a_2(1 - \Gamma)L]$$

- kde
- g je optický zisk na jednotku dĺžky lasera
 - G je faktor vyplnenia (pomer výkonu v aktívnej oblasti ku celkovému výkonu)
 - a_1 sú straty v aktívnej oblasti
 - a_2 sú straty mimo aktívnej oblasti
 - R je koeficient odrazu zrkadlovej plochy
 - L je dĺžka aktívnej vrstvy

Predpokladajme, že $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, potom:

$$\frac{1}{R^2} \exp(2aL)$$

n Prahový zisk g_{th} :

$$\Gamma g_{th} = a + \frac{1}{L \cdot \ln \frac{1}{R}}$$

Zisk LD:

$$g = A_g (N_e - N_o)$$

- kde
- A_g je diferenciálny koeficient zisku
 - N_e vyjadruje koncentráciu injektovaných nosičov
 - N_o vyjadruje koncentráciu injektovaných nosičov pri nulovom zisku ($g = 0$)

Prahová hustota prúdu:

$$J_{th} = \frac{e(2d)}{t} \left(N_0 + \frac{a + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}}{\Gamma A_g} \right)$$

- kde
- e je náboj elektrónu
 - $2d$ je hrúbka aktívnej vrstvy
 - N_{th} je hustota injektovaných nosičov , ktorá zodpovedá prahovému zisku
 - t je čas života nosičov

2.3.2 DFB A DBR LASER

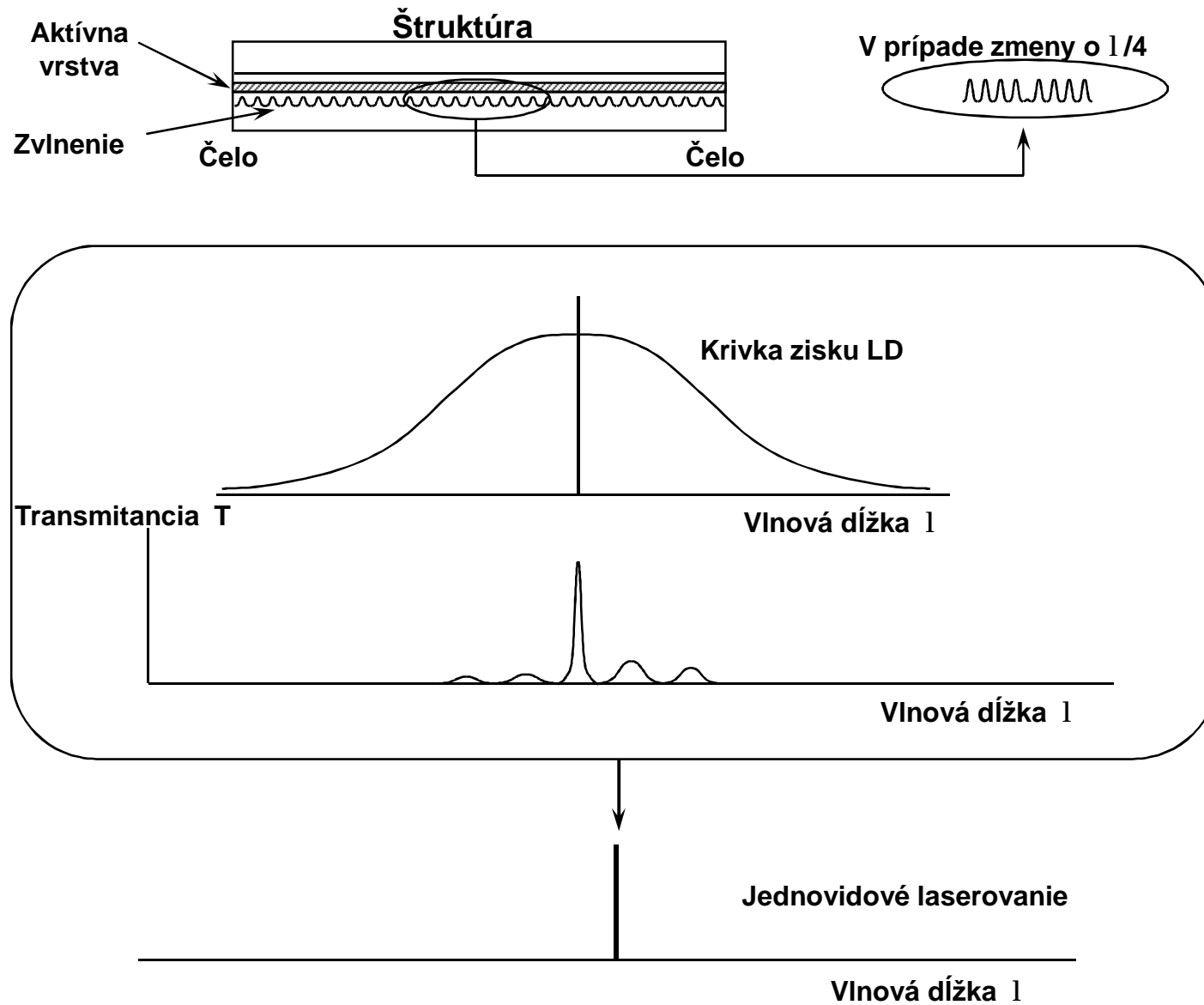
n **DFB laser** má pozdĺžne zvlínenú aktívnu vrstvu, ktorá musí splniť podmienku Braggovej reflexie:

$$l_B = \frac{2n_e \Lambda}{p}$$

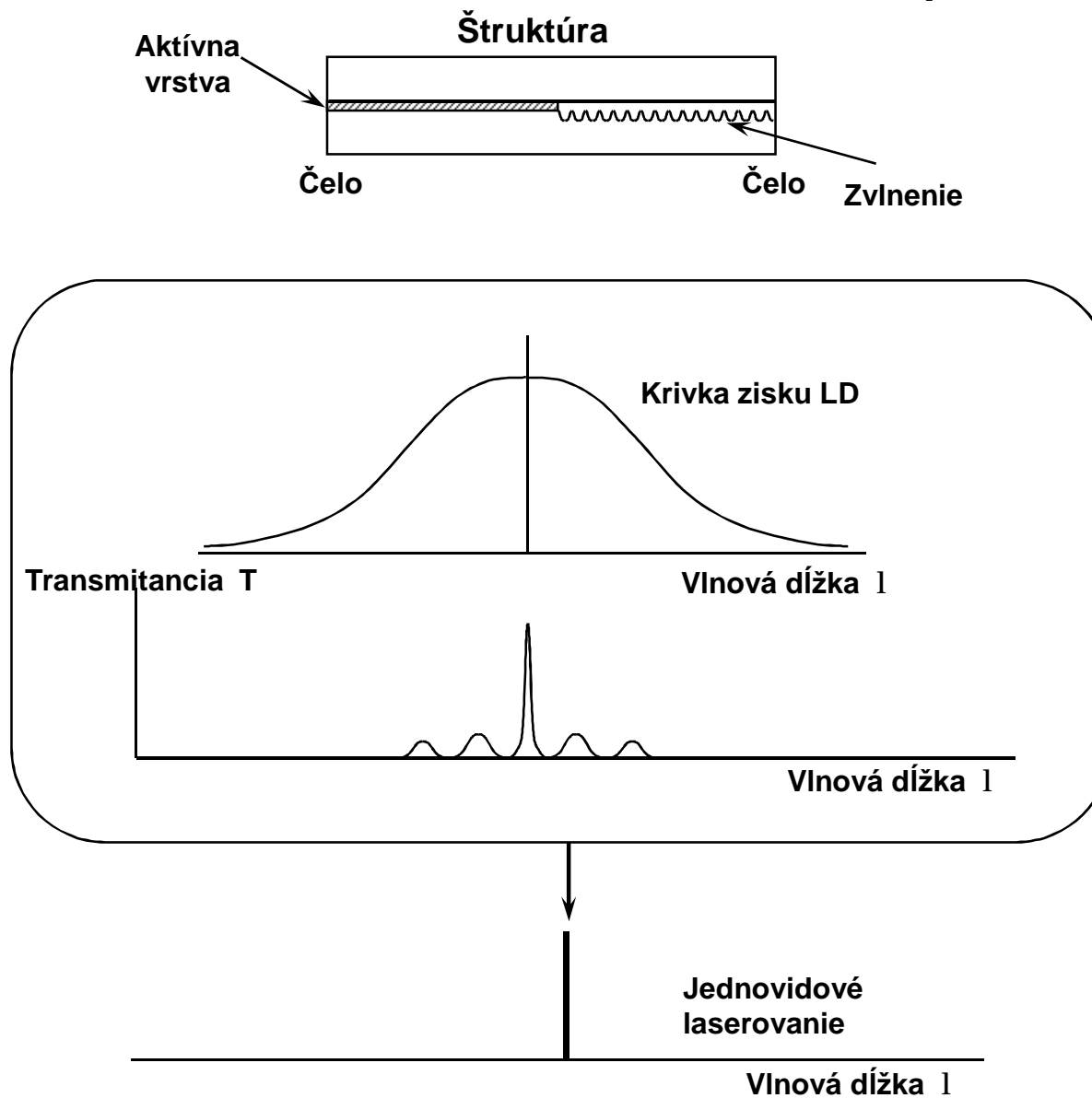
kde

- L je perióda mriežky
- n_e je efektívny index lomu
- p je rád reflexie
- l_B je Braggová vlnová dĺžka

n **Dynamický laser s prahovým reflektorom**, tzv. **DBR LD**
- má zvlínenie len v určitej časti priechodu



Obr. 2. 13 DFB laserová dioda.



Obr. 2. 14 DBR laserová dioda.

2.3.3 MODULAČNÁ CHARAKTERISTIKA LASERA

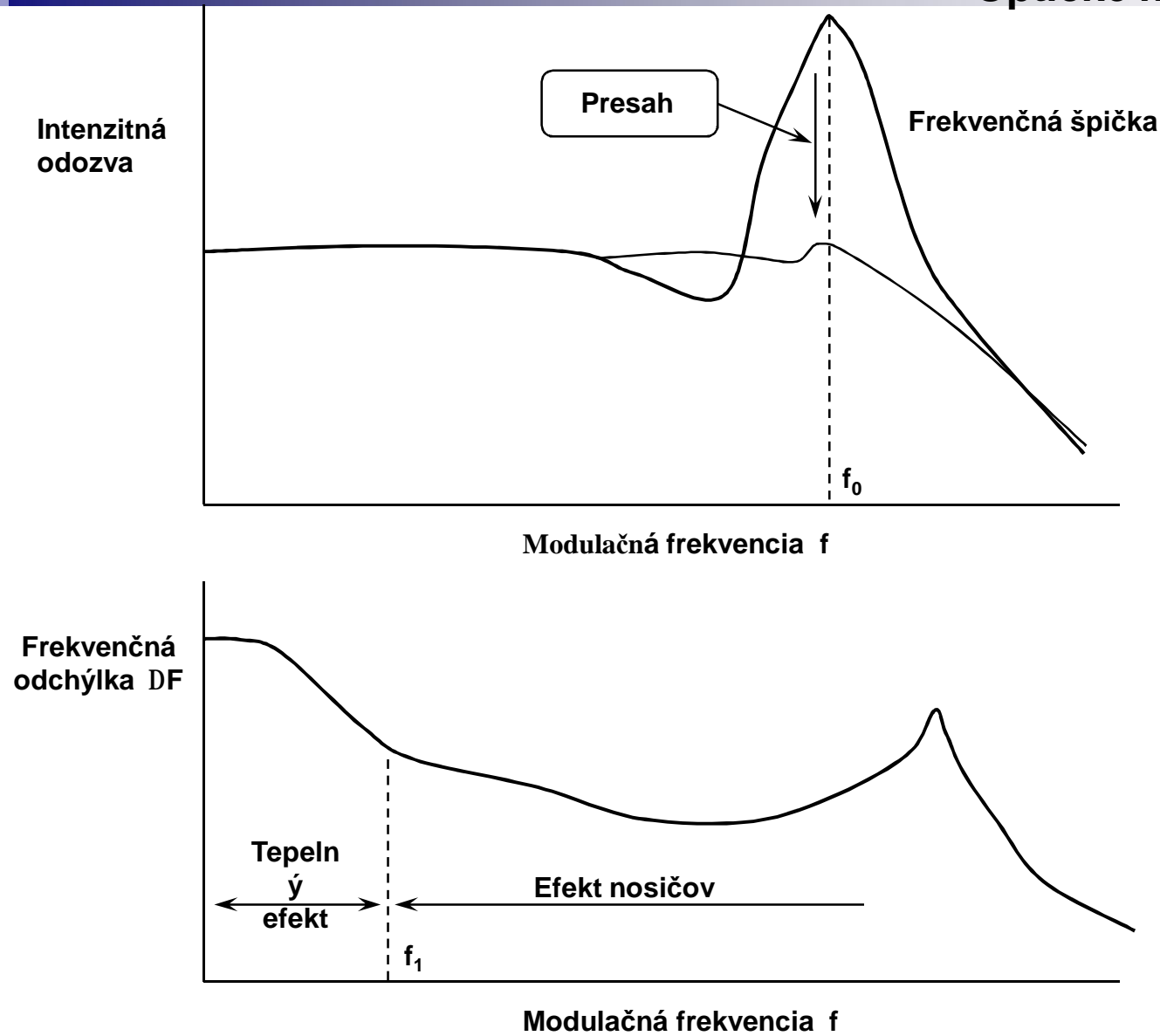
- n Charakteristiky LD s priamou moduláciou určujú hornú **modulačnú rýchlosť** (modulačná frekvencia)
- n Možnosť modulovať svetlo z LD aj s **externou moduláciou** (LiNbO_3 modulátor)

Frekvenčná odozva má špičku pri relaxačnej frekvencii f_0 , ktorú dostaneme riešením **tzv. rýchlostných rovníc** pre fotóny a elektróny

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{eV} \frac{N}{t_c} - A_g v_g (N - N_0) S$$

$$\frac{dS}{dt} = A_g V_g \Gamma (N - N_0) S - \frac{S}{t_p} + \frac{b\Gamma N}{t_c}$$

- kde • N je hustota nosičov vo vnútri dutiny
- S je hustota fotónov vo vnútri dutiny
- I je injektovaný prúd
- e je náboj elektrónu
- V je objem aktívnej vrstvy
- A_g je diferenciálny ziskový koeficient
- v_g je skupinová rýchlosť vo vnútri dutiny
- Γ je vidový faktor obmedzenia
- b je spontánny emisný faktor
- t_c, t_p je čas života nosičov, fotónov



Obr. 2.15 Modulačná odozva laserovej diódy.

Čas života fotónov τ_p je určený stratami zrkadiel lasera a stratami v aktívnej vrstve

$$t_p = v_g^{-1} \left[a - \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right]^{-1}$$

kde • v_g je grupová rýchlosť

Relaxačnú frekvenciu f_0 aproximujeme:

$$f_0 = \frac{1}{2p \sqrt{\frac{A_g V_g S}{t_p}}}$$

kde • S je plocha aktívnej vrstvy

n Typická hodnota f_0 pre LD je 2 - 7 GHz pri budiacom prúde 15 - 25 mA

n Pre Fabryho - Perotové LD s $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ je f_0 okolo 2 GHz

Maximálna modulačná frekvencia pre intenzitnú moduláciu:

$$f_{\max} = \frac{2\sqrt{2}pf_0^2}{g}$$

kde g je faktor prevýšenia

n typická hodnota f_{\max} pre LD je okolo 15 GHz

Frekvenčný rozptyl DF je spôsobený dvoma faktormi:

n Teplotou

n Nosičmi

- Teplotný účinok je zmena indexu lomu v aktívnej vrstve vplyvom teploty
- Účinok nosičov je zmena indexu lomu vplyvom injektovaných nosičov

Hraničnú frekvenciu medzi nimi definujeme frekvenciou f_1

n typická hodnota je 10 MHz a normalizované frekvenčné odchýlky sú:

n $\Delta F/\Delta I = 3 \text{ GHz/mA}$ pre frekvencie pod f_1

n $\Delta F/\Delta I = 0,1 \text{ GHz/mA}$ pre frekvencie nad f_1

2.3.4 ŠÍRKA SPEKTRÁLNEJ ČIARY

- n Dôležitý parameter pre optické multiplexné systémy (**OFDM**)
- n Pre typické polovodičové LD:
 - v Bez externých filtrov je od niekoľko MHz do niekoľko GHz
 - v Použitím externých filtrov sa zmenší až na 100 kHz

2.3.5 CHIRPING

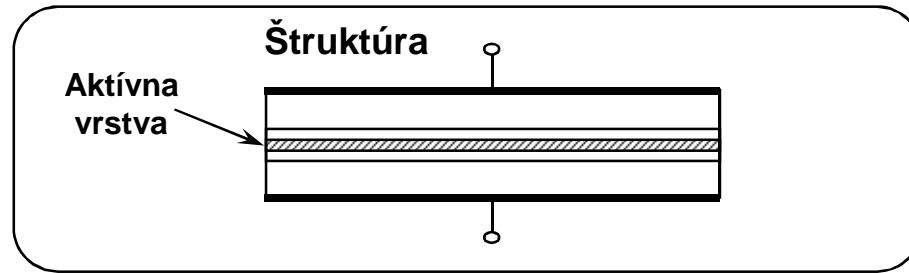
- n Frekvenčný **chirping** je **zmena frekvencie** LD pri zmene optického vyžarovaného výkonu
- n Tieto charakteristiky sú dôležité pre vysoké prenosové rýchlosti
- n Kombináciou chirpingu a disperzie **OV** - degenerácia krátkych prenosových impulzov

2.3.6 EKVIVALENTNÝ OBVOD

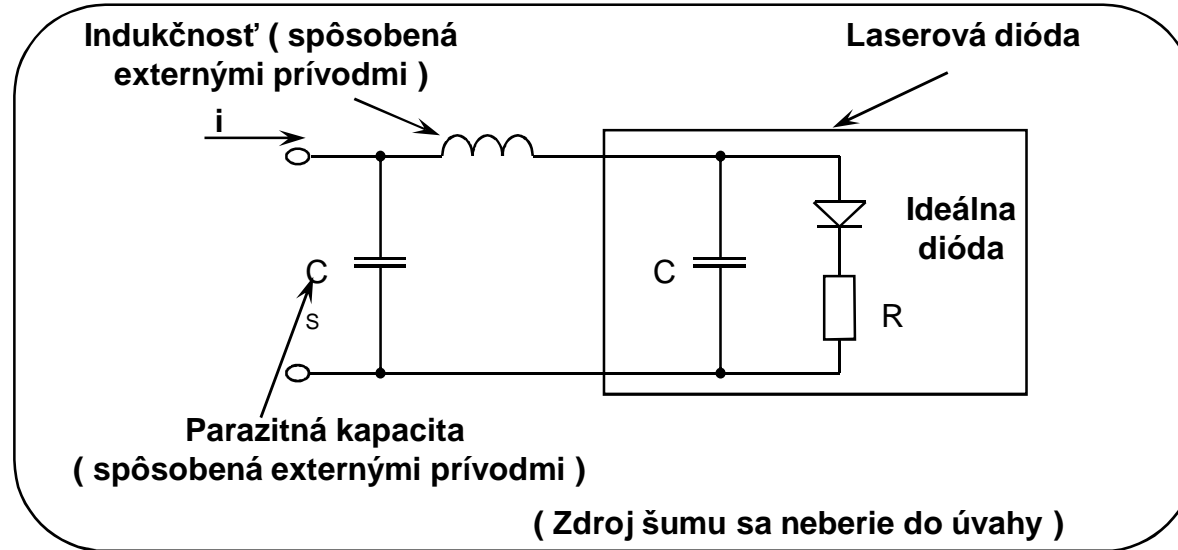
Typické hodnoty **pre ekvivalentný obvod LD** sú:

- $R = 5 \Omega$
- $C = 20 \text{ pF}$
- $L = 1 \text{ nH}$
- $C_s = 1 \text{ pF}$

n R je malé - pri zapojení k štandardnému zdroju je potrebná aj vonkajšia prispôbovacia impedancia



Ekvivalentný obvod



Obr. 2.16 Ekvivalentný obvod laserovej diódy.
2. kap. OVKS KEMT TU Košice

2.4 FOTODIÓDA - PD

Najčastejšie používané fotodiódy:

- **PIN dióda** (P - vrstva - polovodič typu P,
I - vrstva - vlastná vrstva polovodiča
N - vrstva - polovodič typu N)
- **APD dióda** - (Avalanche PD - **lavínová dióda**) -
- využíva vnútorný lavínový jav

Základné parametre fotodiódy:

n Citlivosť R

n Kapacita C

n Prúd za tmy I_d

n Lavínový zisk M

n Prídavný šum vplyvom lavínového javu (len pre APD) -
vyjadruje sa tzv. šumovým faktorom x

n **NEP (Noise Equivalent Power)** - výkon PD potrebný k tomu,
aby výstupný signál bol ekvivalentný šumu

Detektivita $D = 1 / \text{NEP}$, resp. D^* - detektivita normovaná
na plochu

2.4.1 CITLIVOSŤ A FOTOPRÚD

Fotoprúd:

$$I_p = h \frac{e}{hf} P_0 = R P_0$$

pričom :

$$R = h \frac{e}{hf}$$

- kde
- h je Plancková konštanta - $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js
 - f je frekvencia
 - e je náboj elektrónu
 - h je kvantová účinnosť (ako účinne sa menia fotóny na páry elektrón - diera)
 - P_0 je optický výkon dopadajúci na detektor
 - R je citlivosť
- Výraz hf je **energia fotónu**

Citlivosť' R pre rôzne λ pri rovnakej kvantovej účinnosti:

$$R = 1,05 \eta \quad \text{pre } \lambda = 1,3 \mu\text{m}$$

$$R = 1,25 \eta \quad \text{pre } \lambda = 1,55 \mu\text{m}$$

Pre APD je fotoprúd:

$$I = \langle M \rangle h \frac{e}{hf} P_0 = \langle M \rangle I_P$$

kde • $\langle M \rangle$ je stredná hodnota lavínového zisku

(má náhodný charakter a spôsobuje vznik šumu, ktorý sa prenáša do reťazca optického prijímača)

Prúd, ktorý tečie PD alebo (APD):

$$i = I_p + I_d$$

$$i = \langle M \rangle I_p + I_d$$

kde I_d je **prúd za tmy**, ktorý je teplotne závislý:

$$\exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

kde E_g je šírka zakázaného pásma
 k je Boltzmannova konštanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
 T je teplota

Typické hodnoty prúdu za tmy pri izbovej teplote:

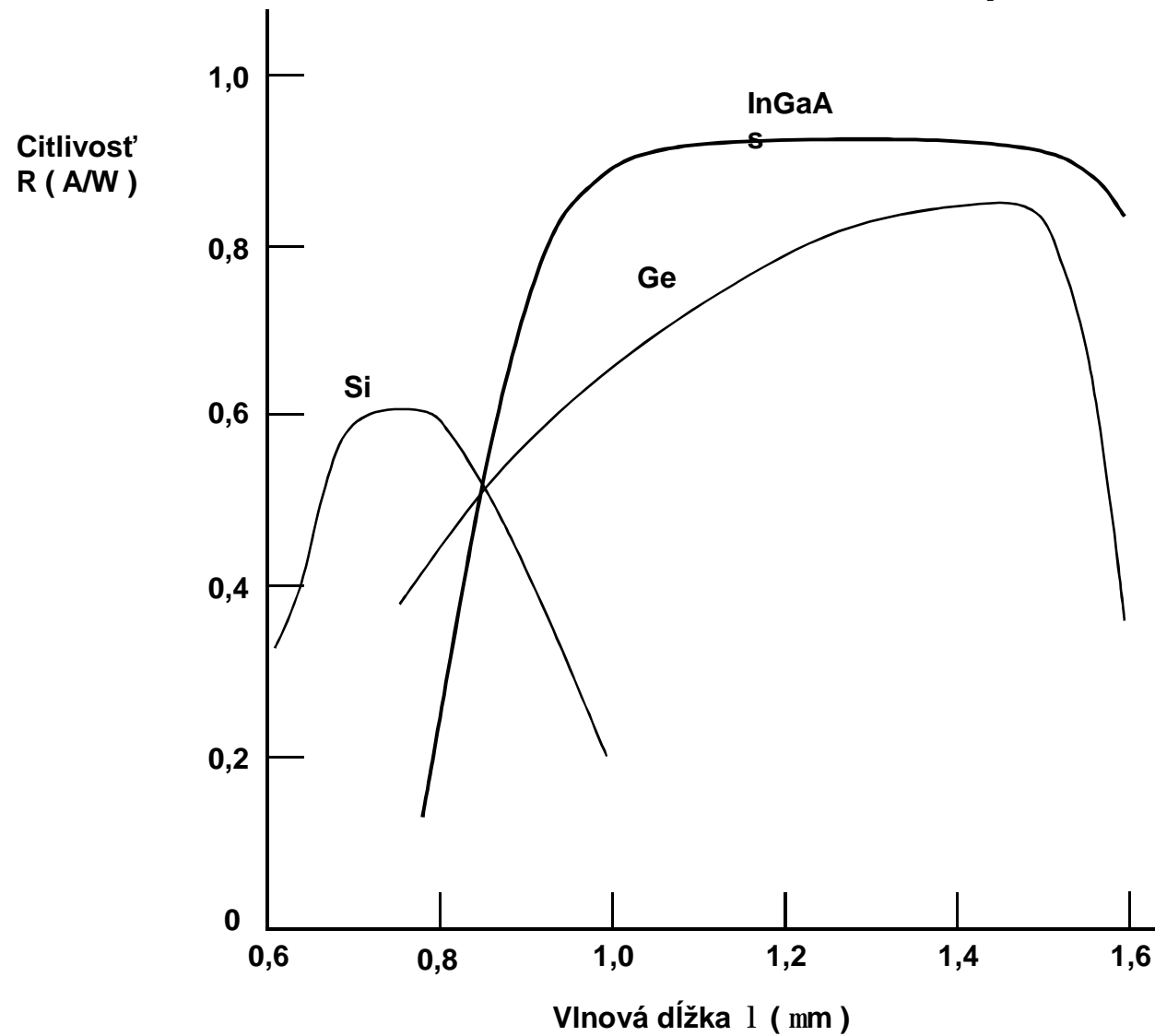
$I_d = 0,05 \text{ nA}$	pre Si PIN - PD	
$I_d = 5 \mu\text{A}$	pre Ge PIN - PD	vystačíme s napätím
$I_d = 0,1 \text{ nA}$	pre InGaAs PIN - PD	niekoľko V

Porovnanie PIN - PD a APD z hľadiska optického prijímača:

- n APD je citlivejšia , ale vyžaduje vyššie napájacie napätie (okolo 70V pre InGaAs)
- n InGaAs PIN - PD vyžaduje omnoho menšie napätie

2.4.2 ZÁVISLOSŤ CITLIVOSTI R OD VLNOVEJ DĹŽKY λ

- n Citlivosť R sa zväčšuje s rastúcou hodnotou vlnovej dĺžky pre rovnakú kvantovú účinnosť η
- n Skoro rovnaké hodnoty kvantovej účinnosti $\eta = 0,8 - 0,9$ majú Si a InGaAs



Obr. 2.17 Závislosť citlivosti od vlnovej dĺžky.

2.4.3 EKVIVALENTNÝ OBVOD

Kapacita paralelných doštičiek: $C = \frac{eS}{d}$

- kde
- e je dielektrická konštanta
 - S je plocha doštičky
 - d je vzdialenosť medzi dvoma doštičkami

C_t je kapacita prechodu - má vzťah s priemerom fotodetekcie D PD
- C_t je úmerné D^2

- Typické hodnoty C_t pre **InGaAs PIN - PD**, **InGaAs APD - PD** pre optický prenos s jednojádrovými optickými vláknami sú okolo 1 ÷ 2 pF

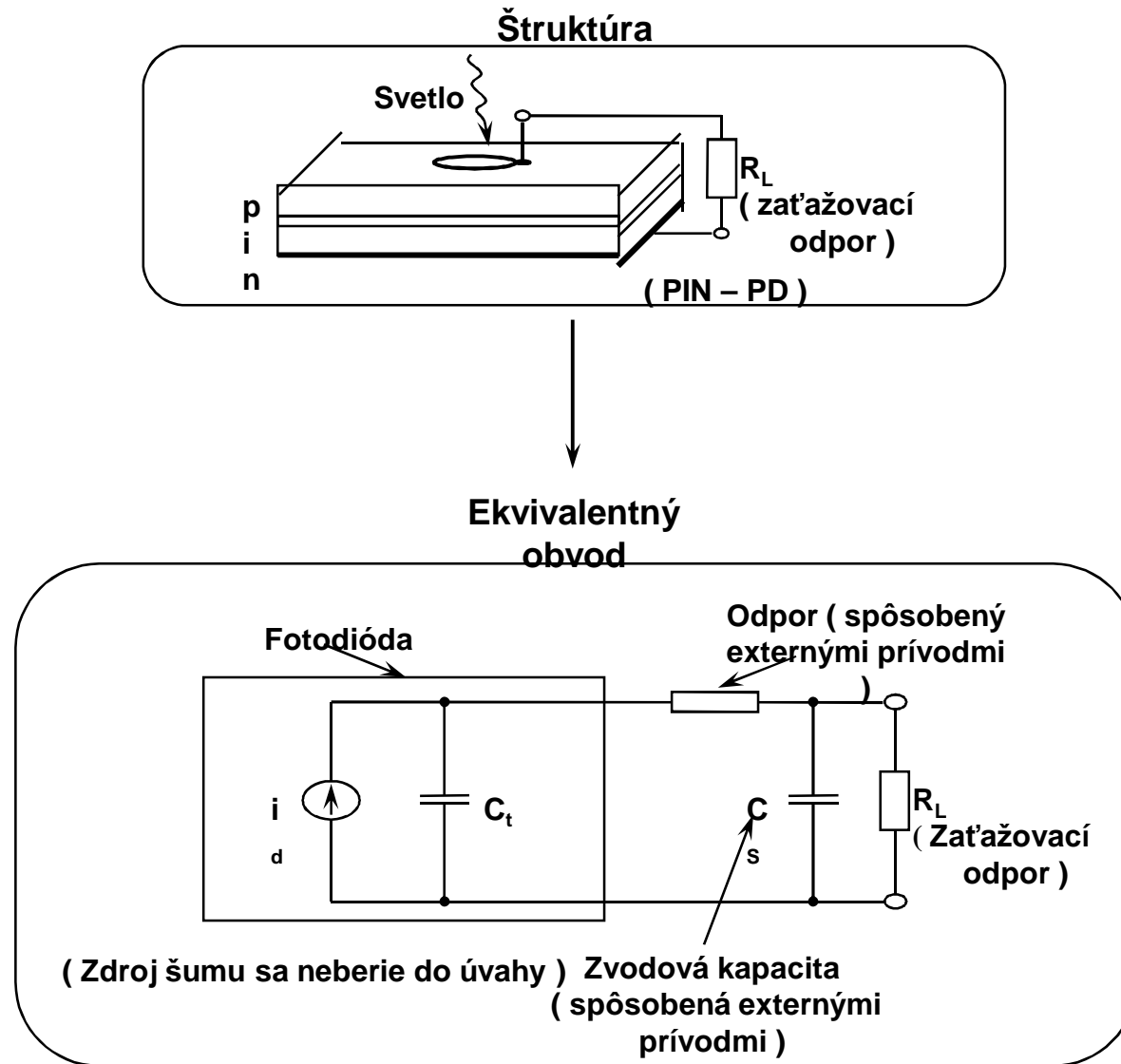
2.4.4 ŠUM FOTODIÓD

- n Fotodetekcia je **štatistický proces**, ktorý vyhovuje **Poissonovej distribúcii** (štatistike)
1. **Výstrelový šum** - fluktuácie detekovaného fotoprúdu , ktoré sú spôsobené **Poissonovou štatistikou**
 2. **Tepelný šum** - dominantný šum v optickom prijímači , ak šum predzosilňovača a zaťažovacieho rezistora (PD , APD) nie je malý

Poissonová distribúcia P(n):

$$P(n) = \frac{(\Lambda T)^n e^{-\Lambda T}}{n!}$$

- Kde
- n je počet fotónov
 - L je intenzita
 - T je časový interval [0, T]
 - L T je priemerný počet fotónov pre časový interval T



Obr. 2.18 Ekvivalentný obvod fotodiódy.

Elektróny generované fotónmi tiež sledujú Poissonovú distribúciu $P(n)$ so stredným počtom elektrónov $\eta \Lambda T$:

$$P(n) = (\Lambda h T)^n \frac{e^{-\Lambda h T}}{n!}$$

kde • h je kvantová účinnosť

Generovaný fotoprúd $i_n(t)$:

kde • e je náboj elektrónu

• $d(t)$ je **Diracova distribúcia**, tzv. delta funkcia

$$i_n(t) = \sum_{j=1}^n e d(t - t_j)$$

Stredná hodnota prúdu:

$$\bar{i} = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) i_n(t) = h\Lambda e$$

Stredná kvadratická odchýlka hodnoty prúdu zodpovedá šumu:

$$\langle i^2 \rangle = \left\langle \left(i - \bar{i} \right)^2 \right\rangle = 2h\Lambda e^2 \int_0^{\infty} dt$$

Pre frekvenčne ohraničený prípad $\Delta f = B$ získame použitím vzťahu:

$$I_p = h\Lambda e$$

n Vzťahy pre strednú kvadratickú hodnotu šumového prúdu

$$\langle i^2 \rangle = 2eI_p B \quad \text{PIN - PD}$$

$$\langle i^2 \rangle = 2eI_p \langle M \rangle^2 F(M) B \quad \text{APD}$$

- kde
- $\langle i^2 \rangle$ je stredná kvadratická hodnota výstrelového šumu
 - I_p je fotoprúd
 - B je šírka frekvenčného pásma
 - $F(M)$ je šumový prídavný faktor spôsobený náhodným lavínovým procesom, pre ktorý platí:

$$F(M) \approx \langle M \rangle^x$$

kde šumový faktor :

$x \approx 0,3 \div 0,5$	pre Si - APD
$x \approx 1$	pre Ge - APD
$x \approx 0,7$	pre In Ga As – APD

Využitím tohto vzťahu dostaneme vzťah pre $\langle i^2 \rangle$:

$$\langle i^2 \rangle = 2eI_p \langle M \rangle^{2+x} B$$

Prúd za tmy:

$$\langle i_d^2 \rangle = 2eI_d B \quad \text{(PD)}$$

$$\langle i_d^2 \rangle = 2e(I_m \langle M \rangle^{2+x} + I_n) B \quad \text{(APD)}$$

kde • I_m a I_n sú konštanty

2.5 OPTICKÝ VLÁKNOVÝ VAZOBNÝ A WDM PRVOK

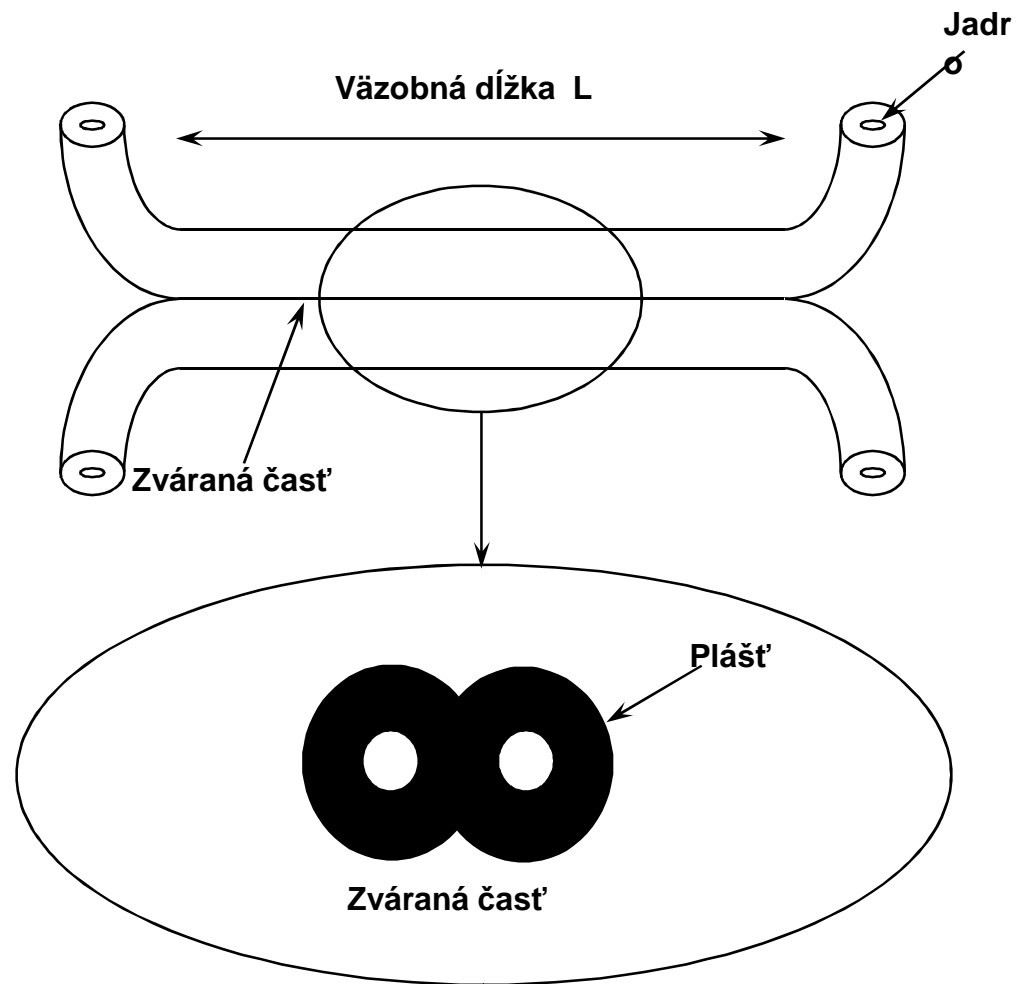
n Druhy zariadení používané pre jednoividové optické vlákna

1. Zvárané vlákno
2. Vlnovodové
3. Diskrétne prvky

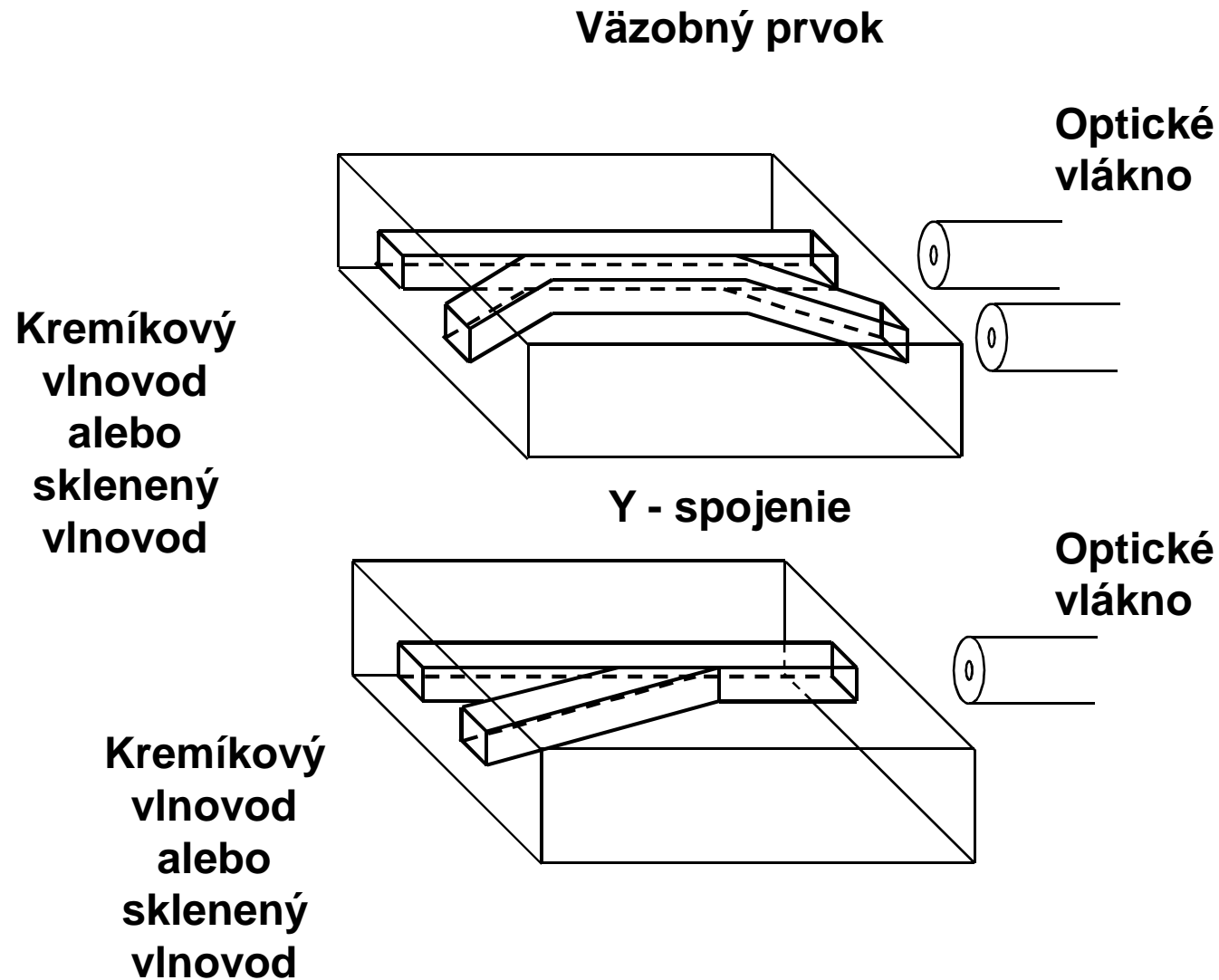
1. Väzobný prvok vyrobený zo zváraného vlákna je zložený z optických vlákien, ktoré sú zvárané ohriatím a natiahnutím
2. Využívajú vlastnosti planárnych vlnovodov
3. Väzobné prvky s využitím diskrétnych optických prvkov využívajú vlnovo selektívne vlastnosti optickej mriežky, hranola a pod.

2.5.1 VAZOBNÝ PRVOK

- n **Väzobný a WDM prvok** založený na využití vlastností dvoch pozdĺžne **zvárených optických vlákien**:
 - v Zváranie sa uskutočňuje pozdĺž väzobnej dĺžky L
 - v Vplyvom prekrytia plášťov vlákien dochádza k vytvoreniu väzby
 - v Väzba je vlnovo selektívna



Obr. 2.19 Zváraný vláknový väzobný člen a WDM prvok.



Obr. 2.20 Vlnovodový väzobný prvok.

Vlnové rovnice pre dva málo stratové vlnovody:

$$\frac{da_1}{dz} = -jb_1a_1 + jk_1a_2$$

$$\frac{da_2}{dz} = jk_2a_1 - jb_2a_2$$

$$a_1(z) = A_1 \exp(-jb_1z)$$

$$a_2(z) = A_2 \exp(-jb_2z)$$

- kde
- a_1 , a_2 sú komplexné amplitúdy vlny pre vlny 1 a 2
 - A_1 , A_2 sú konštanty
 - b_1 , b_2 sú fázové konštanty
 - k_1 , k_2 sú väzobné koeficienty

Ak uvažujeme, že $\beta_1, \beta_2 = \beta$
 $k_1, k_2 = k$

Riešenie vlnových rovníc pre $a_2(0) = 0$:

$$a_1(z) = A \cos(\Delta b z) \exp(-j b_1 z)$$

$$a_2(z) = j A \sin(\Delta b z) \exp(-j b z)$$

$$A = a_1(0)$$

$$\Delta b = k$$

$$P_1(z) = |a_1(z)|^2 = A^2 \cos^2(\Delta b z)$$

$$P_2(z) = |a_2(z)|^2 = A^2 \sin^2(\Delta b z)$$

Ak $\Delta b(z) = \frac{p}{2} \left(kz = \frac{p}{2} \right)$, potom je počiatkový výkon vlnovodu 1 komplexne prenášaný do vlnovodu 2

Ak $P_1 \frac{p}{4k} = P_2 \frac{p}{4k} = 0,5P_1(0)$, ide o 3 - dB väzobný člen

n Podobné štruktúry sa používajú aj pre WDM prvok

n Väzobný prvok typu - vlnovodový

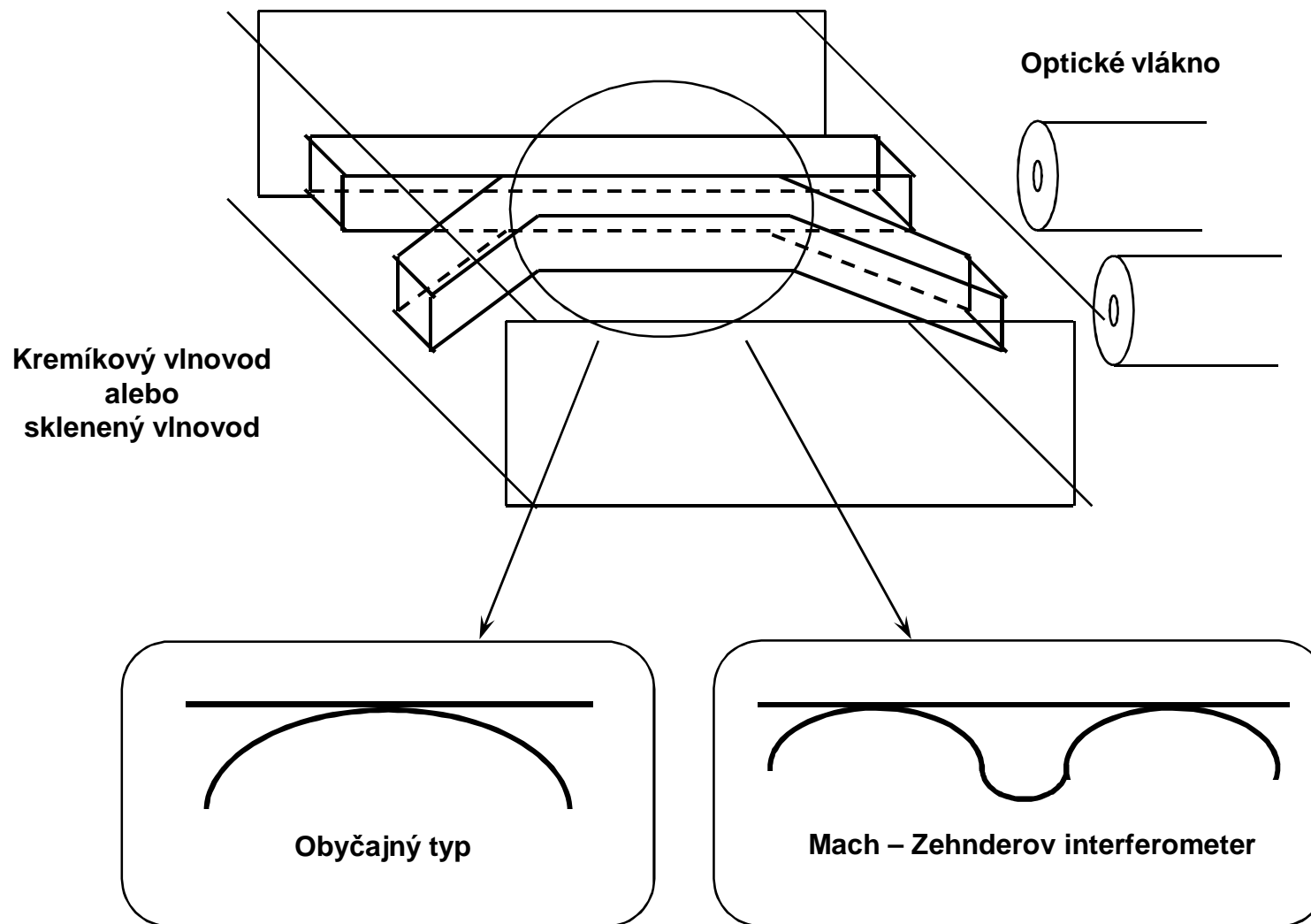
Väzba vlnovo selektívna - **WDM multiplexor, demultiplexor**

n Väzobný koeficient k pre WDM je rozdielny od 3 - dB väzobného prvku

$$kL = \frac{p}{2} \text{ platí pre } \lambda_1, \text{ potom: } \begin{aligned} P_1(L) &= 0, \\ P_2(L) &= A^2. \end{aligned}$$

$$kL = p \text{ platí pre } \lambda_2, \text{ potom: } \begin{aligned} P_1(L) &= A^2, \\ P_2(L) &= 0. \end{aligned}$$

To je princíp WDM zariadení (prvkov)



Obr. 2.21 Vlnovodový WDM prvok.

2.5.2 WDM MULTIPLEXORY Z DISKRÉTNÝCH PRVKOV

- n Využívajú **disperzné prvky**, ktoré transformujú rozdiel v oblasti vlnových dĺžok na svetlo šíriace sa v rôznych smeroch:

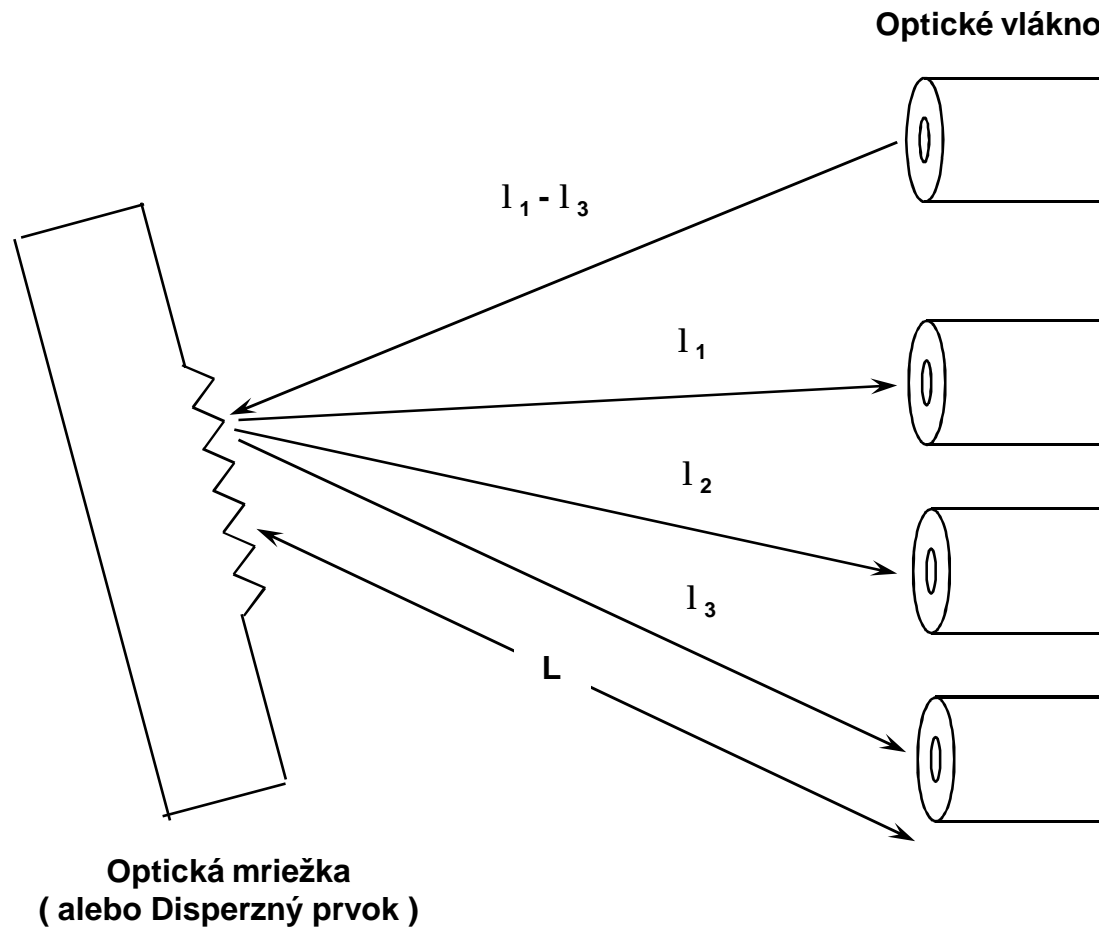
$$\Delta x_1 = \frac{d\Theta}{dl} \Delta l_1 L$$

$$\Delta x_2 = \frac{d\Theta}{dl} \Delta l_2 L$$

$$\Delta l_1 = l_1 - l_2$$

$$\Delta l_2 = l_2 - l_3$$

- kde
- Θ je uhol ohybu
 - L je dĺžka



WDM prvok využívajúci optickú mriežku.

2.6 VZÁJOMNÝ VZŤAH MEDZI OPTICKÝMI SYSTÉMAMI A OPTICKÝMI ZARIADENIAMI (PRVKAMI)

- n Pri návrhu optických systémov sa musí brať do úvahy množstvo faktorov
- n Návrh prenosu a návrh káblovej siete sa navzájom ovplyvňujú

Faktory, ako:

- n **Cena**
- n **Jednoduchšia prevádzka**
- n **Výkon alokovaný** na užívateľa, sú veľmi dôležité pri návrhu prístupovej siete