

# 1 ÚVOD

## 1.1 VZNIK A VÝVOJ OPTICKÝCH KOMUNIKÁCIÍ

Podstata optoelektroniky – premena elektrických signálov na optické a optických signálov na elektrické.

- **Laser**
- Dokonalé polovodičové fotodetektory (**PIN fotodióda, lavínová fotodióda** a pod.)
- **Optické vlákna**

Dve špecifické vlastnosti :

1. **Dve priestorové súradnice**
2. **Neutrálne fotóny**

Prenos informácií svetlom :

- **V starovekom Grécku v 6. stor, p.n.l. – ohňové signály**
- **Dymové signály**

Prínos modernej doby :

- **Optické telegrafné stanice vo Francúzsku (Claud Chapp r. 1790). 200 km za 15 minút.**
- V polovici 19. stor. **Morseový telegraf.**
- V roku **1870 J.Tyndall** – svetlo môže byť vedené dielektrickým prostredím.
- V roku **1880 A.G.Bell** – patent na **svetelný telefón.**
- **Prenos obrazu (priamo) optickým vláknom – r. 1927 (Baird v Anglicku a Hansell v USA).**
- **Vláknové endoskopy** (A.C.S. van Heel v Holandsku a H.H.Hopkins a N.S.Kapany v Anglicku).
- **Kapany r. 1956 – pojem vláknová optika (fiber optic).**
- Realizácia **lasera v roku 1960** ako koherentného zdroja žiarenia.
- Použitie **sklenených optických vlákien – súčasne Kao a Hockham v Anglicku a Werts vo Francúzsku v roku 1966.**

Rýchly rozvoj optických vláknových komunikačných systémov umožnili:

1. Technológia výroby optických vlákien
2. Zvýšenie účinnosti a životnosti polovodičových zdrojov svetla.

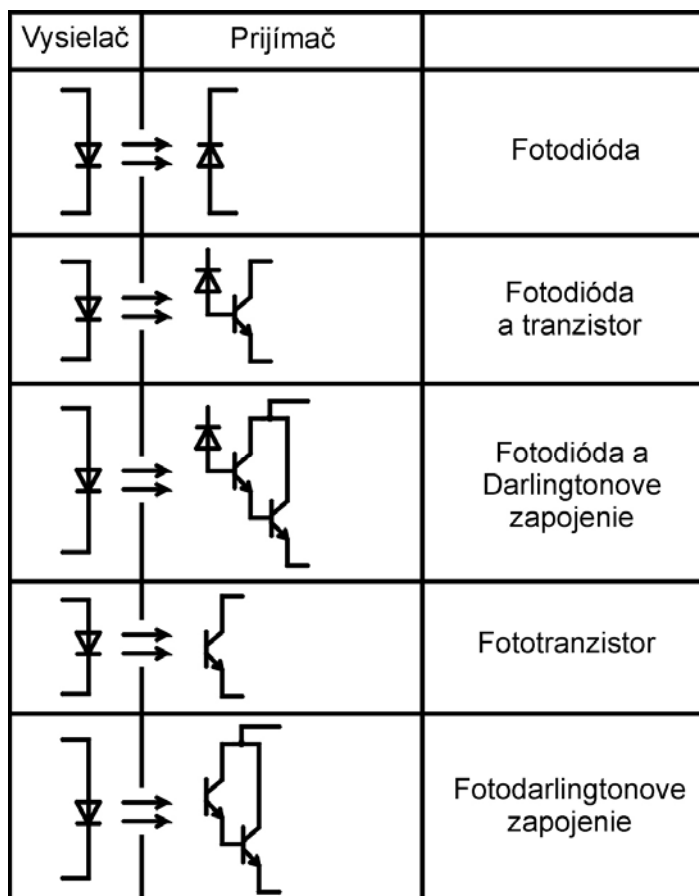
V počiatkoch : **veľké optické straty** (až 1000 dB/km) – nevýhoda v porovnaní s koaxiálnymi káblami (tlmenie 5-10 dB/km).

Dnes : redukované na **0,2 dB/km pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$**

- **Optické vláknové komunikačné systémy (OVKS)**

Optické systémy :

1. **Optróny** (obr. 1.1)



Obr. 1.1 Zapojenia jednoduchých oprónov.

**2. Optické komunikačné systémy :**

- a) Číslicovej telekomunikácie,
- b) Analógovej širokopásmovej telekomunikácie (**prenos video signálu**),
- c) **Prenosu údajov**

Optické komunikačné systémy môžu byť:

- a) **voľným prostredím**,
- b) s **prenosom svetlovodom**.

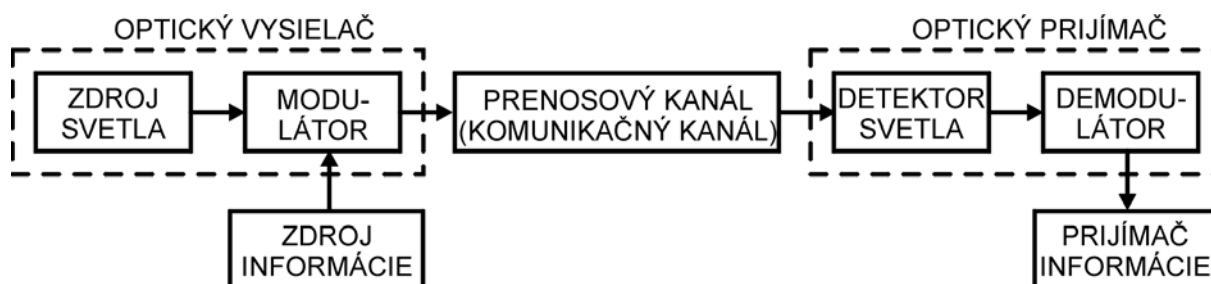
**3. Integrovaná optika**

Prenosová kapacita C „klasickje“ elektromagnetickej vlny

$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right) \tag{1.1.1}$$

**Kvantový šum**

$$C = B \log\left(1 + \frac{P}{\hbar\omega B}\right) + \frac{P}{\hbar\omega} \log\left(1 + \frac{\hbar\omega B}{P}\right) \tag{1.1.2}$$



Obr. 1.2 Základná bloková schéma optického spoja.

### Optický spoj (obr. 1.2)

- optický vysielateľ
- prenosový kanál
- optický prijímač

Zdroj svetla – laser, alebo elektroluminiscenčná dióda (LED).

- optické prostredie (prenosové prostredie) – voľné prostredie, svetlovody
- fotodetektor (detektor svetla)
- optický signál – amplitúda, frekvencia, fáza, polarizácia, vlnová dĺžka, trvanie alebo kombinácia
- vznik šumu
- opakovače so zosilnením signálu
- regeneračné opakovače

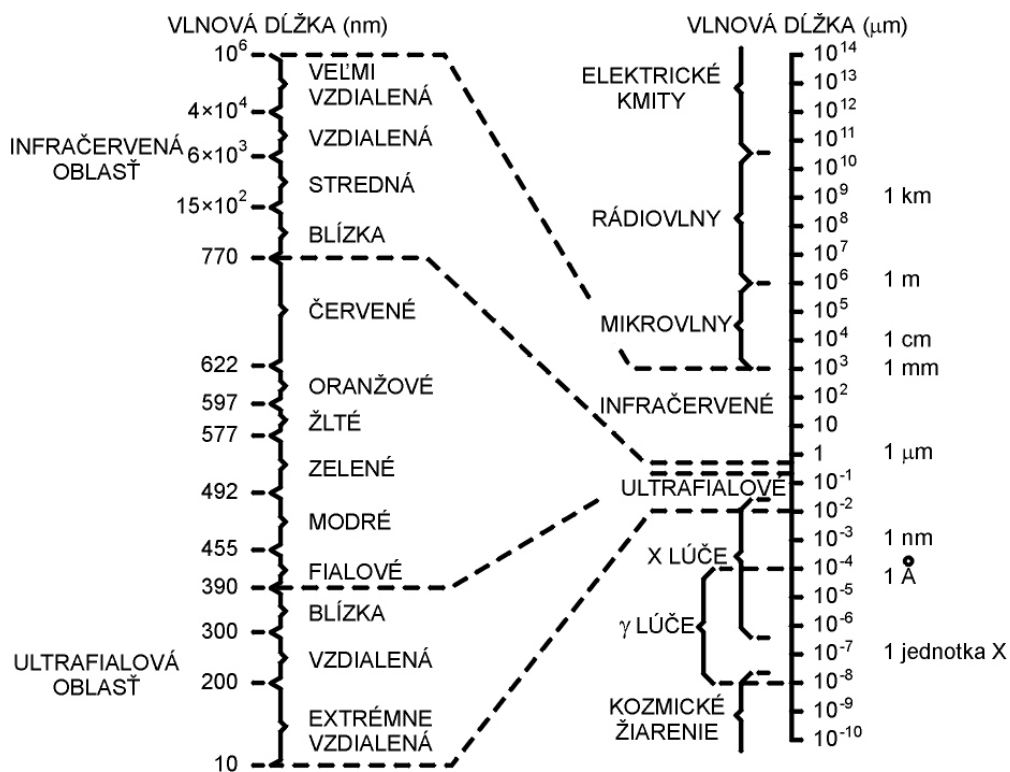
Oblasť optického žiarenia (obr. 1.3) je od vlnových dĺžok 100 nm až 1 mm. Má 7 podoblastí:

- tri **ultrafialové** oblasti (100 až 280 nm, 280 až 315 nm a 315 až 390 nm),
- oblasť **viditeľného svetla** (390 až 770 nm)
- tri **infračervené** oblasti (770 nm až 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,4 až 3  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$  až 1 mm).

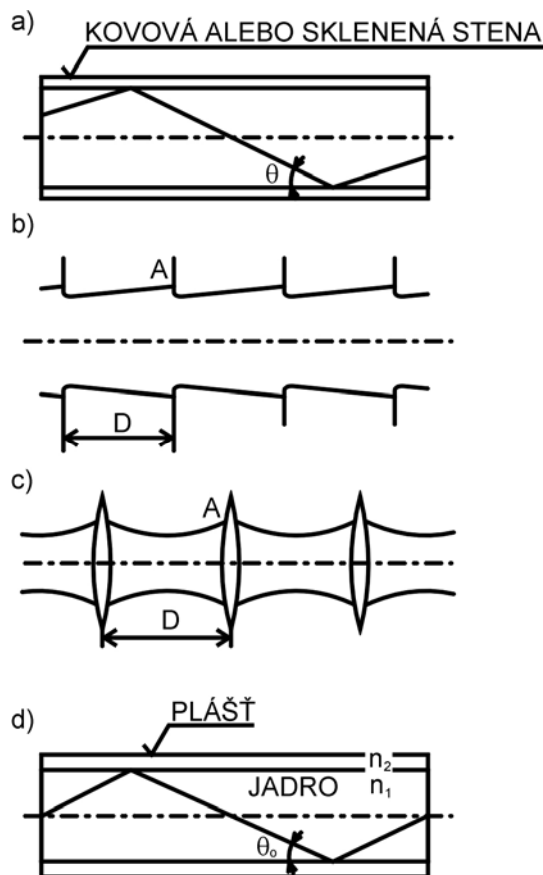
**Optické komunikácie** – oblasti medzi 0,4 až 12  $\mu\text{m}$ . Maximálna šírka frekvenčného pásma 500 THz.

**Svetlovody :**

1. Duté svetlovody (obr. 1.4a)
2. Svetlovody s diskretnými korektormi (obr. 1.4 b,c)
3. Optické vlákna (obr. 1.4d)
  - jadro  $n_1$
  - plášť  $n_2$
  - $n_1 > n_2$  dochádza na rozhraní jadro – plášť k totálnemu odrazu.
  - 0,2 dB/km pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$



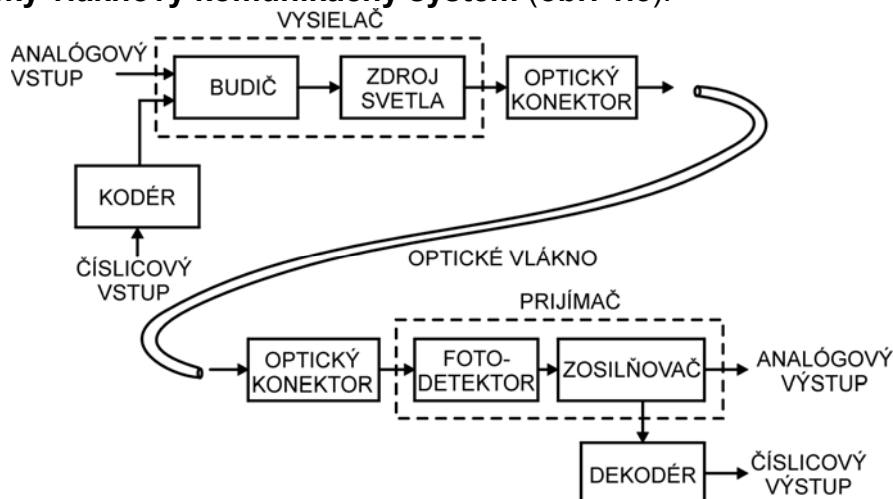
Obr. 1.3 Elektromagnetické spektrum.



Obr. 1.4 Rôzne typy svetlovodov: a) duté svetlovody, b) svetlovody s fokusujúcimi clonami, c) svetlovod so šošovkami, d) optické vlákno.

## 1.2 SÚČASNÉ MOŽNOSTI A PERSPEKTÍVY OPTICKEJ VLÁKNOVEJ KOMUNIKÁCIE

Optický vláknový komunikačný systém (obr. 1.5):



Obr.1.5 Bloková schéma optického vláknového spoja.

**Celosklenené vlákno** na báze  $\text{SiO}_2$ , vlákno typu **PCS** (z angl. **Plastic Clad Silica**),  
Dĺžka vlákna bez spojenia – 1 m až 7 km.

- Detektor : **PIN (Positive-Intrinsic-Negative) fotodióda alebo lavínová fotodióda (APD – Avalanche Photodiode).**
- **Elektrický signál sa konvertuje na optický signál**
- **Analógová aj digitálna modulácia**
- **Kábelovanie**
- **Opakovač (retranslátör)**

### Výhody OVKS :

1. **Extrémne veľká šírka frekvenčného pásma**
2. **Malý priemer a malá hmotnosť.**
  - redukcia rozmerov (10:1)
  - výrazná redukcia hmotnosti (25:1)
3. **Odolnosť voči prepočutiam.**
4. **Odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu.**
  - **rádiofrekvenčné rušenie (RFI – Radio-Frequency Interference),**
  - **elektromagnetické rušenie (EMI – ElectroMagnetic Interference)**
  - **elektromagnetické impulzy (EMP – z angl. ElectroMagnetic Pulses).**
5. **Neustále klesajúca cena.**

Sekundárne výhodné vlastnosti :

- a) **Utajenosť prenášaných správ**  
**OTDR** z angl. Optical Time-Domain Reflectometry

- b) Väčšia bezpečnosť
- c) Elektrická izolácia
- d) Väčšia životnosť
- e) Odolné voči vyšším teplotám a pôsobeniu korozívnych kvapalín a plynov.
- f) Väčšia spoľahlivosť a jednoduchšia údržba
- g) Nevyžarujú signály
- h) Možnosť jednoduchého rozšírenia prenosovej kapacity
- i) Šetrenie vzácnych materiálov

Medzi nevýhody patria:

- krehké
- nie sú údaje o dlhodobej mechanickej stabilite
- optické konektory, prepínače – náročné na prácnosť  $\Rightarrow$  veľmi drahé.

**Ekonomickú využiteľnosť limitujú tlmenie (optické straty) a rozšírenie impulzu (disperzia).**

Optické vlákna na báze  $\text{SiO}_2$  (obr. 1.6) tri oblasti, tzv. okná :

**1. Okno**  $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ . Komerčne dostupné – tzv. prvá generácia.

1978 – 50 až 100 Mbit/s na 10km

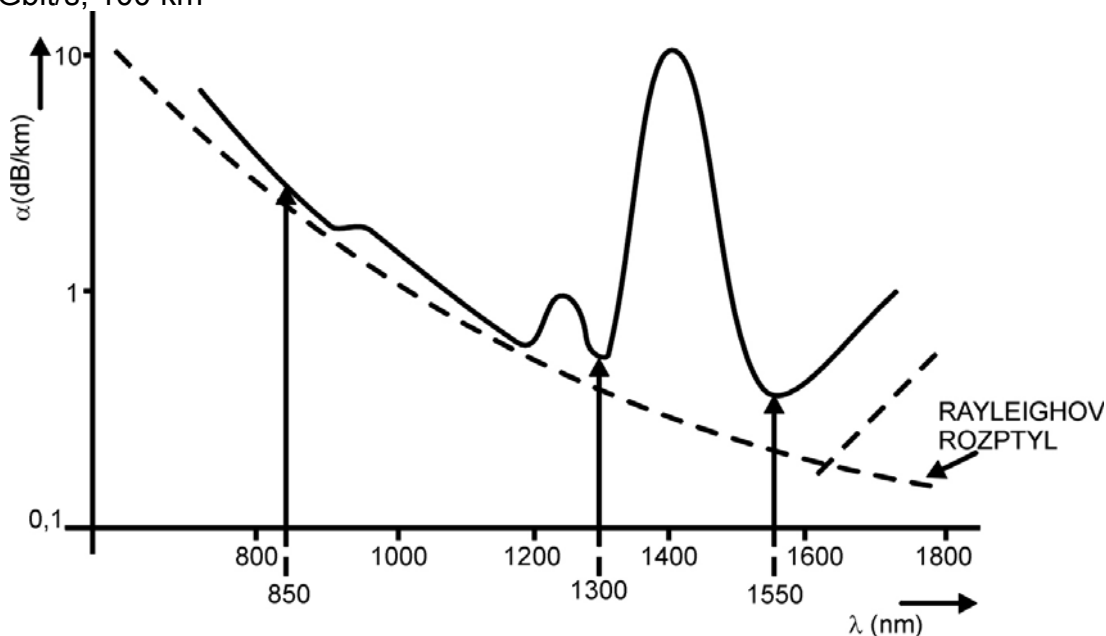
**2. Okno**  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ . Nulová materiálová disperzia (pre čisté  $\text{SiO}_2$  pri  $\lambda = 1,27 \mu\text{m}$ ) – tzv. druhá generácia.

1980 – 200 Mbit/s

1981 – jednovidové OV, 1,7 Gbit/s na km

**3. Okno**  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ . Najmenšie tlmenie (0,2 dB/km pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ) – tretia generácia.

10 Gbit/s, 100 km



Obr. 1.6 Spektrálna charakteristika tlmenia optického vlákna na báze  $\text{SiO}_2$ .

- OV s posunutou disperziou DSF (Dispersion Shifted Fibers)
- OV s plochou disperziou DFF (Dispersion Flattened Fibers)).

#### 4. Štvrtá generácia

- **WDM** – Wavelength Division Multiplex
- **DWDM** – Dense Wavelength Division Multiplex
- **OFDM** – Optical Frequency Division Multiplex

$\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ , DSF, DFF, NZ – DSF(Non Zero Dispersion Shifted) vlákna  
1 Tbit/s

Hyper – WDM, 640 Gbit/s, 640 km, 64 prenosových kanálov s kapacitou 10 Gbit/s.

#### 5. Piata generácia – solitóny

20Gbit/s, 1000 km

**optické vláknové zosilňovače EDFA** (Erbium Dropped Fiber Amplifier)

Optické vlákna z určitých materiálov majú v **strednej infračervenej oblasti vlnových dĺžok (2 až 11  $\mu\text{m}$ ) extrémne nízke hodnoty tlmenia ( $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  dB/km), obr. 1.7.**

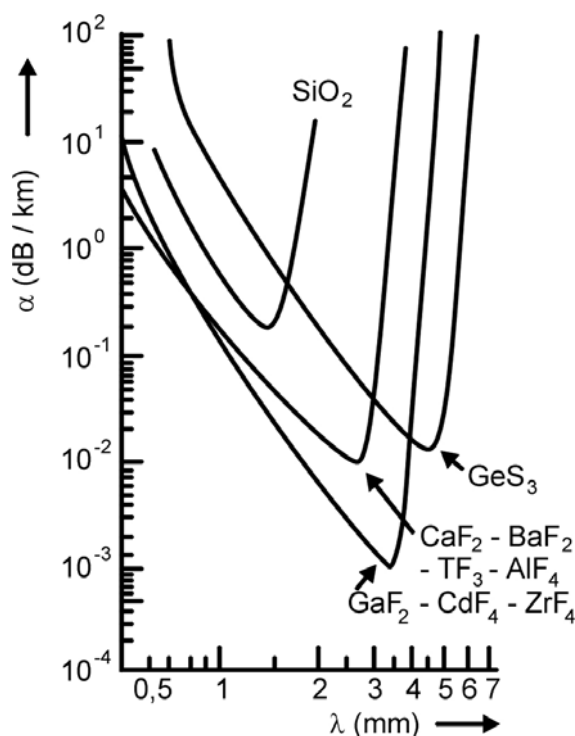
a) **Sklá na báze  $\text{GeO}_2$** ,  $\lambda = 2 \mu\text{m}$ , tlmenie pod **0,3 dB/km**.

Sklá na báze  **$\text{GeO}_2 - \text{Sb}_2\text{O}_2$**  – 2 až 3  $\mu\text{m}$ , tlmenie pod ako 0,1 dB/km.

b) **Fluoridové sklá** – sklá na báze  **$\text{ZrF}_4$** , 3 až 4  $\mu\text{m}$ .

c) **Chalkogénne sklá** –  **$\text{As}_2\text{S}_3$ ,  $\text{As}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{GeS}_2$ ,  $\text{GeSe}_2$** . Minimum tlmenia  $10^{-1}$  až  $10^{-2}$  dB/km v oblasti 4 až 6  $\mu\text{m}$ .

d) **Alkalické halogenidové kryštály a halogenidy tália** (napr. **KCl, CsI, CsBr, KBr, TiBr, zmesi BrTI a JTI** označované ako **KRS-5** alebo **KRS-6**). Extrémne nízke tlmenie rádovo  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  dB/km v oblasti vlnových dĺžok 1 až 10  $\mu\text{m}$ .



Obr 1.7 Spektrálna charakteristika tlmenia OV pre strednú infračervenú oblasť.

- **Integrovaná optika**

## 1.3 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI SVETLA

Sedemnásťte storočie – dve teórie podstaty svetla:

- 1) **vlnová teória** Hooka a Huygensa
- 2) **korpuskulárna teória** Newtona.

Pozorovania Younga, Malusa, Eulera

V roku 1864 **Maxwell** – **slávne rovnice** – základ jednotnej všeobecnej elektromagnetickej teórie svetla. Svetlo je **transverzálna elektromagnetická (TEM) vlna**.

Rýchlosť vo vákuu

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1.3.1)$$

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

1887– **Hertz generoval elektromagnetické vlny** s vlnovou dĺžkou 10 m.

- **korpuskulárne-vlnový dualizmus fotónov**

**Kvantum energie fotónu**

$$E_{\text{fot}} = \hbar \omega = fh = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3.2)$$

$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  – redukovaná **Planckova konštanta**,  $\hbar = h / 2\pi$  a  $\omega = 2\pi f$  je kruhová frekvencia.

- **Fotoefekt** – r. 1905. Einstein.

Podľa **princípu korpuskulárne-vlnového dualizmu** nie sú dve teórie svetla v konflikte, ale je ich treba chápať komplementárne.

Spektrum elektromagnetického žiarenia (**obr. 1.3**) : **infračervené žiarenie** (svetlo), **viditeľné svetlo** a **ultrafialové žiarenie** (svetlo).

## 1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Elektromagnetická vlna :

$\vec{E}$  - intenzita elektrického poľa



$\vec{H}$  - intenzita magnetického poľa.

**Z Maxwellových rovníc – vlnové rovnice.**

$$\Delta(\vec{E}, \vec{H}) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{E}, \vec{H}) \quad (1.4.1)$$

$\Delta$  – Laplaceov operátor,  $c$  – rýchlosť svetla

$$c = f\lambda_0 \quad (1.4.2)$$

**V materiálnom prostredí**

$$v = \frac{c}{n} = f\lambda \quad (1.4.3)$$

$n$  – index lomu

$$n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (1.4.4)$$

$\mu_r$  a  $\epsilon_r$  sú **relatívna permeabilita a permitivita**

**Sínusové vlny**

$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (1.4.5)$$

$$\phi = \omega t - kx + \phi \quad (1.4.6)$$

$\phi$  – fáza,  $k=2\pi/\lambda$  je **vlnové číslo**,  $\phi$  – **fázová konštanta**.

$E$  a  $H$  sú navzájom kolmé a kolmé na smer šírenia – **vektor**  $\vec{k}$  (TEM vlny).

**Rovinná elektromagnetická vlna**

$$v = \frac{\omega}{k} = f\lambda \quad (1.4.7)$$

**fázová rýchlosť**. V praxi – **vlnový balík s grupovou rýchlosťou**

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.4.8)$$

Zovšeobecnenie na opísanie rovinnej vlny šíriacej sa v smere určenom vlnovým vektorom  $\vec{k}$

$$E(x, y, z, t) = E_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \phi) \quad (1.4.9)$$

$\vec{r}$  – polohový vektor  
Guľová vlna

$$E = \frac{A}{r} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \quad (1.4.10)$$

Spôsob pohybu vektora intenzity elektrického poľa  $\vec{E}$  v rovine kolmej na smer šírenia rovinnej vlny nazývame **polarizáciou**. Môže byť:

- a) **lineárna**
- b) **kruhová**
- c) **eliptická**

Kruhová a eliptická polarizácia – **ľavotočivá** alebo **pravotočivá**.

Elektromagnetická vlna môže byť **polarizovaná**, **nepolarizovaná**, **čistočne polarizovaná**.

**Disperzné vlastnosti** (kvapaliny, plyny a tuhé látky) – **priehľadné, priesvitné a nepriehľadné**.

**Svetelný lúč (obr. 1.8b) – geometrická optika.**

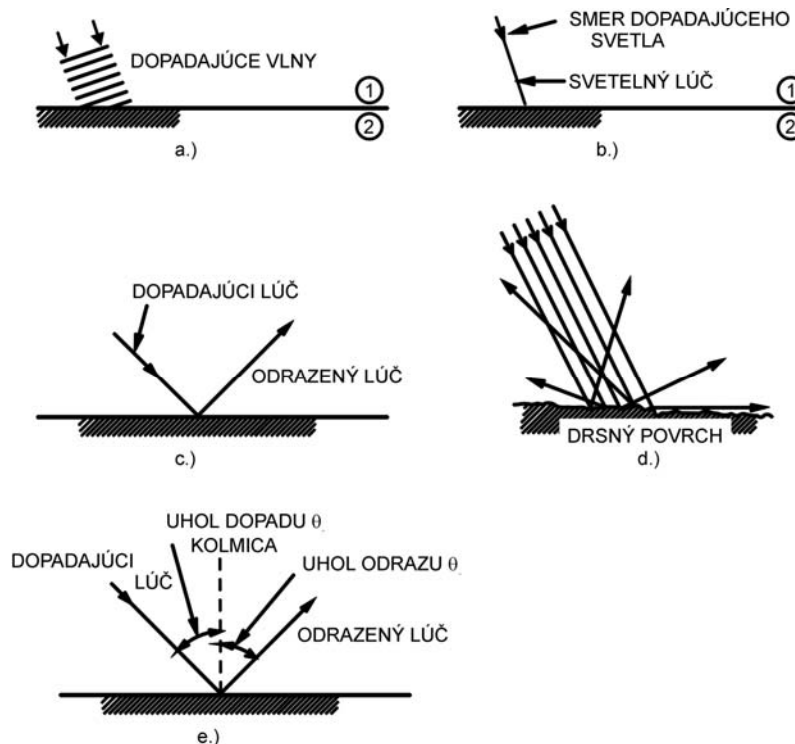
- **regulárny odraz**
- **difúzny odraz (obr. 1.8d)**
- **zákon odrazu (obr. 1.8e)**

**Snellov zákon lomu**

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_p = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_d} = \frac{n_1}{n_2} = n_{12} \quad (1.4.11)$$

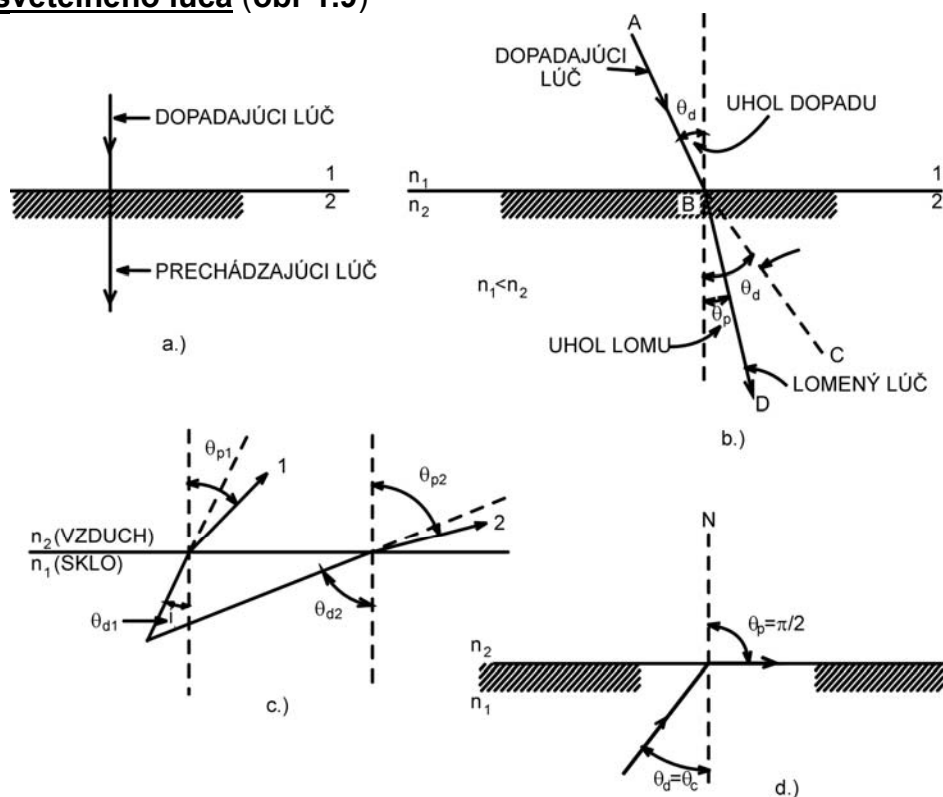
$n_{12}$  – relatívny index lomu

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{c}{v_1}}{\frac{c}{v_2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \quad (1.4.12)$$



Obr 1.8 Dopad svetla na rozhranie: (a) dopadajúce vlny, (b) svetelný lúč, (c) regulárny odraz, (d) difúzny odraz, (e) zákon odrazu.

• **lom svetelného lúča (obr 1.9)**



Obr 1.9 Lom svetla na rozhraní: kolmý dopad, (b) šikmý dopad (lom ku kolmici), (c) šikmý dopad (lom od kolmice), (d) totálny odraz

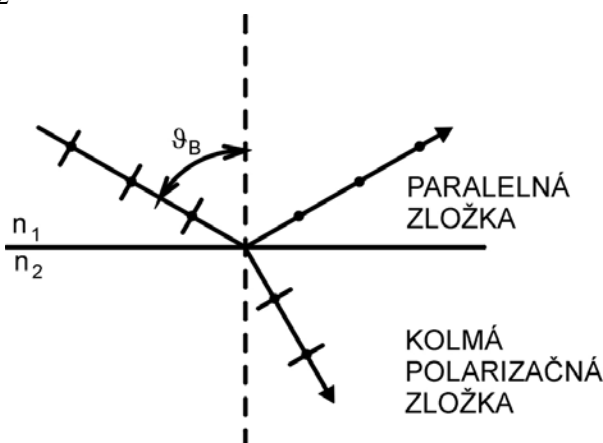
$\theta_p > \theta_d$  lom smerom **od kolmice**, pre určitý uhol  $\theta_d = \theta_c$  (tzv. **kritický uhol dopadu**) bude  $\theta_p = \pi/2$

$$n_{12} \sin \theta_c = 1 \Rightarrow \theta_c = \arcsin \frac{1}{n_{12}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4.13)$$

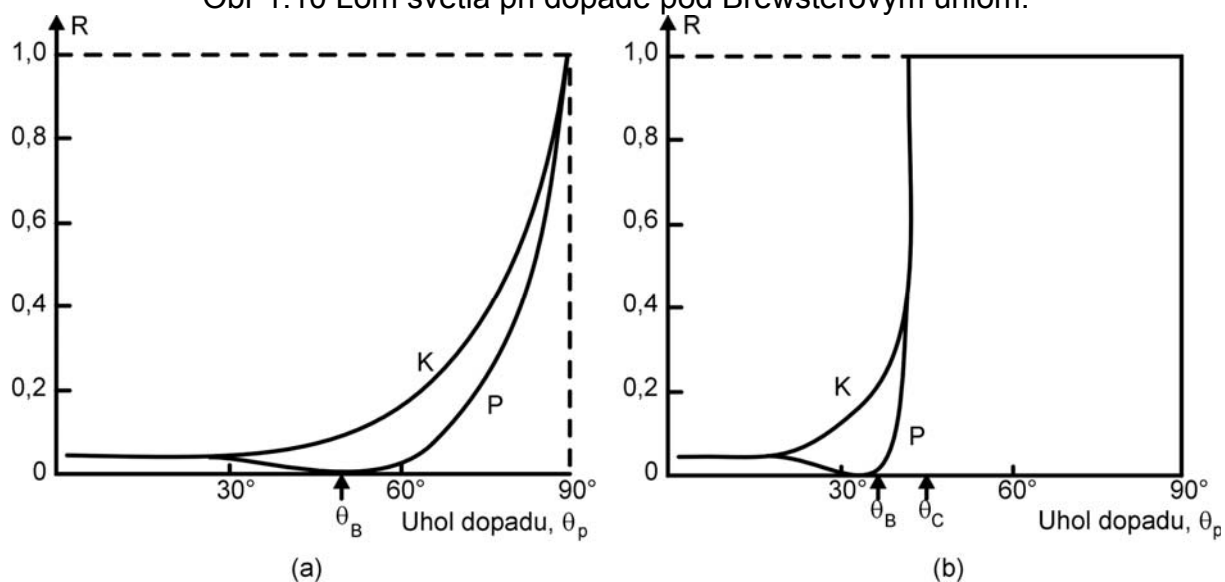
pre  $\theta_d > \theta_c$  je  $\sin \theta_p > 1$  – **úplný (totálnemu) odraz – povrchová vlna.**

**Brewsterov uhol  $\theta = \theta_B$  (obr. 1.10)**

$$\text{tg } \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}} \quad (1.4.14)$$



Obr 1.10 Lom svetla pri dopade pod Brewsterovým uhlom.



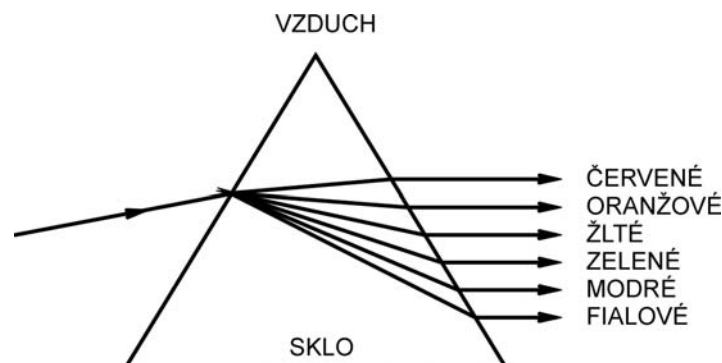
Obr 1.11 Odrazivosť ako funkcia uhlu dopadu pre paralelne (P) a kolmo (K) polarizovanú zložku (a) opticky redšie prostredie, (b) opticky hustejšie prostredie.

- Polarizácia svetla – 7 platničiek
- **Polaroid**
- **Polarizačné hranoly (Nicolov hranol, Glanov – Thompsonov hranol)**

**Intenzita prenášaného svetla – vyjadrenie Malusovým zákonom**

$$I = E_0^2 \cos^2 \theta = I_0 \cos^2 \theta \quad (1.4.15)$$

- **Polychromatický lúč**
- Rozloženie bieleho svetla (obr. 1.12)



Obr 1.12 Disperzia bieleho svetla.

**Disperzia** – rôzne rýchlosti šírenia svetla s rôznou vlnovou dĺžkou.

**Superpozícia** dvoch alebo viacerých vln

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (1.4.16)$$

- **Koherencia – interferenčné pružky.**

**Matematický opis interferencie**

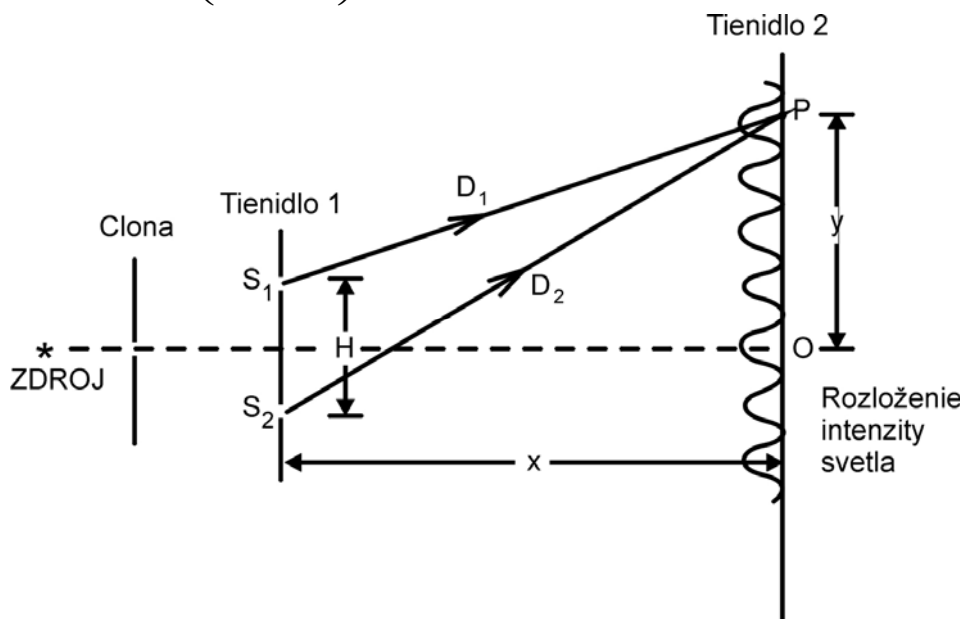
$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2) \end{aligned} \quad (1.4.17)$$

Ak amplitúdy vln sú rovnaké  $E_{01} = E_{02}$

$$I = 2E_{01}^2 [1 + \cos(\phi_2 - \phi_1)] \quad (1.4.18)$$

alebo

$$I = 4E_{01}^2 \cos^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) \quad (1.4.19)$$



Obr 1.13 Geometria Youngovho pokusu.

**Youngov pokus (obr. 1.13) – fázový rozdiel**

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(D_2 - D_1) \quad (1.4.20)$$

**Svetlé interferenčné prúžky**

$$|D_2 - D_1| = p\lambda \quad (1.4.21)$$

**Tmavé prúžky**

$$|D_2 - D_1| = (2p + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (1.4.22)$$

**Interferenčné javy na tenkých vrstvách alebo platničkách (obr. 1.14).**

Fázový rozdiel

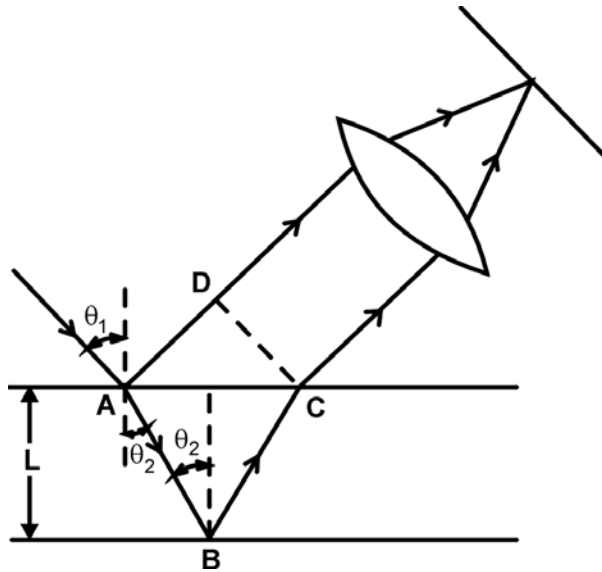
$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(2nL \cos \theta_2) \quad (1.4.23)$$

**Svetlé interferenčné prúžky**

$$p\lambda = 2nL \cos \theta_2 \quad (1.4.24)$$

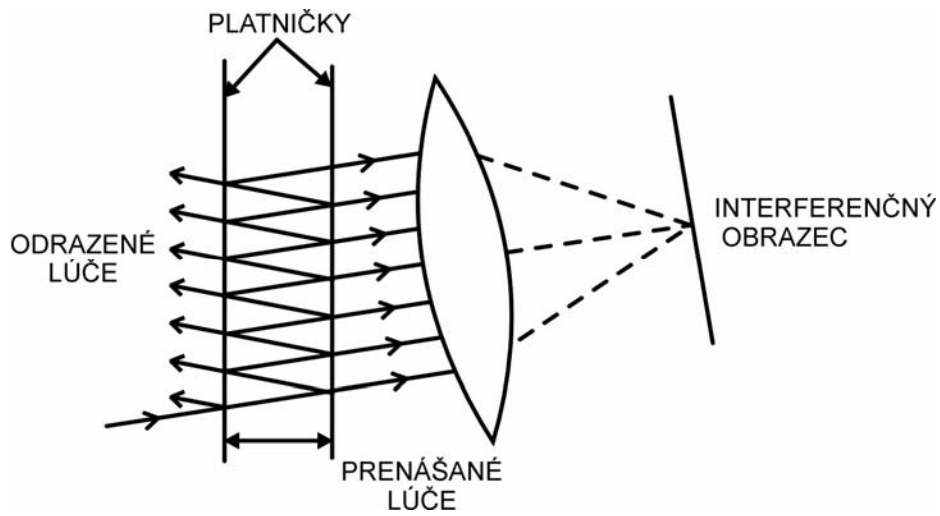
**Tmavé interferenčné pružky**

$$(2p + 1)\frac{\lambda}{2} = 2nL\cos\theta_2 \tag{1.4.25}$$

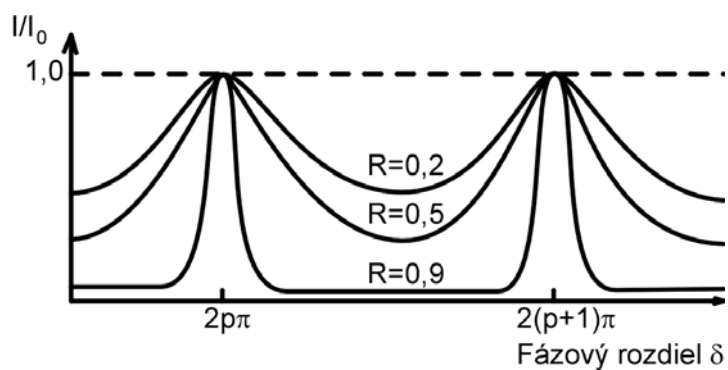


Obr 1.14 Interferenčný jav na tenkej vrstve alebo platničke.

- **Fabryho – Perotov rezonátor**



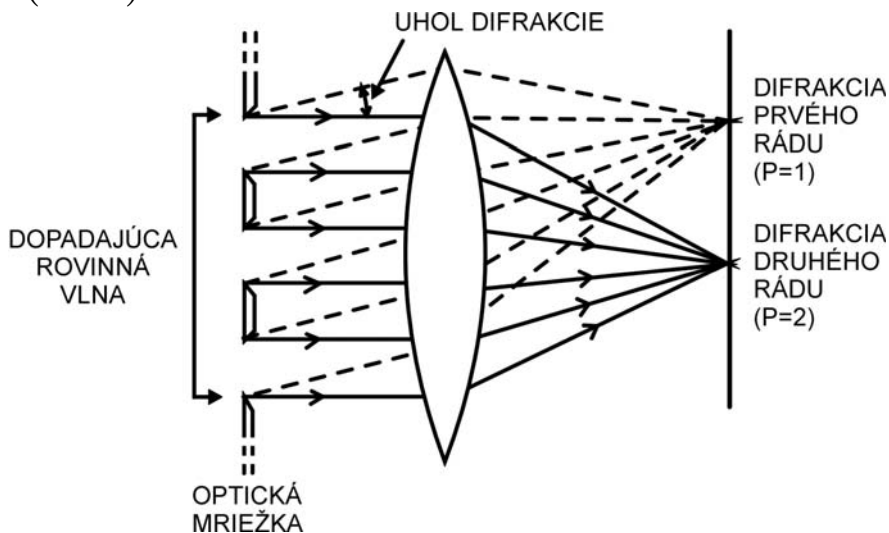
Obr 1.15 Mnohonásobný odraz a interferencia na dvoch rovnobežných (paralelných) platničkách.



Obr. 1.16 Zmena relatívnej intenzity ( $I/I_0$ ) interferenčných prúžkov od zmeny hodnoty odrazivosti zrkadiel R.

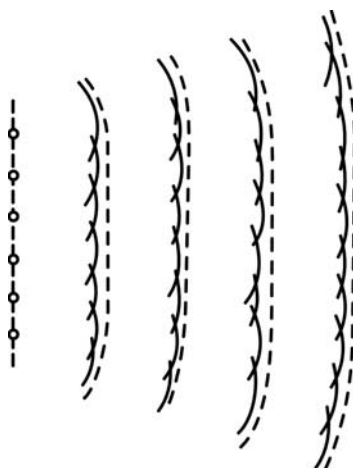
**Optická mriežka**

$$p\lambda = (a + b)\sin\theta = d \cos\theta \tag{1.4.26}$$



Obr 1.17 Interferencia na optickej mriežke.

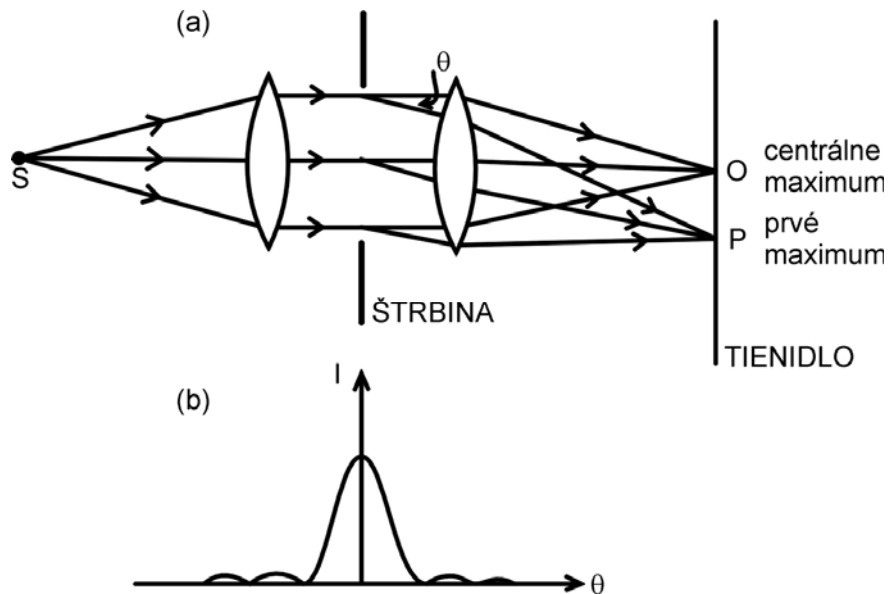
- Difrakcia
- Huygensov princíp



Obr 1.18 Huygensov princíp.



- Fresnelov – Kirchhoffov vzorec.
- Fraunhoferova a Fresnelova difrakcia



Obr 1.19 Fraunhoferova difrakcia (a) a rozloženie ožiarenia (b).

Fraunhoferova difrakcia vzniká na úzkej štrbine (obr. 1.19). maximá

$$\sin \theta = \frac{p\lambda}{D} \tag{1.4.27}$$

84% svetla v centrálnej oblasti (Airyho disk)

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} \approx \frac{\lambda}{D} \tag{1.4.28}$$

## 1.5 KLASICKÉ ZDROJE SVETLA

Klasické (tepelné zdroje) svetla :

- čierne žiariče
- čiarové žiariče.

Žiarenie z nepriehľadných telies (objektov) a hustých plynov

**Stefanov-Boltzmanov zákon pre ideálne absolútne čierne teleso**

$$W = \sigma T^4 \tag{1.5.1}$$

$\sigma$  – Stefanova konštanta

Väčšina teplých povrchov

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.5.2)$$

$\varepsilon$  – **emisivita povrchu** (medzi 0 a 1).

Maximum sa posúva ku kratším vlnovým dĺžkam s rastúcou teplotou – **Wienov zákon**

$$\lambda_m T = \text{konšt.} \quad (1.5.3)$$

$\lambda_m$  – vlnová dĺžka maxima.

**Planckov vzťah**

$$W_f = \frac{2\pi h f}{c^3} \left[ \frac{1}{\exp(hf/kT) - 1} \right] \quad (1.5.4)$$

**Kvantová podstata svetla – fotóny.** Tento vzťah položil **základy modernej kvantovej teórie svetla.**

Excitované plyny – žiarenie emitované pri dobre definovaných diskretných vlnových dĺžkach. **Bohrov model atómu**

$$E_n = -\frac{mZ^2 R^4}{8n^2 h^2 \varepsilon_0^2} \quad (1.5.5)$$

**Kvantum žiarenia – fotón**

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega \quad (1.5.6)$$

z čoho

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{me^4 Z^2}{8h^3 \varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1.5.7)$$

Šírka spektrálnej čiary závisí od rôznych javov (Heizenbergov princíp neurčitosti, Starkov jav, Zeemanov jav, Dopplerov jav).

## 1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

- Rádiometrické jednotky značené **e** (energia)
- Fotometrické jednotky značené **v** (**visible** – viditeľné).

Žiarivý tok

$$P_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.6.1)$$

Vyžiarená energia

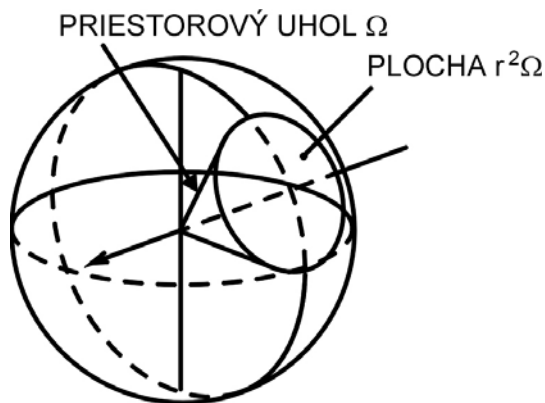
$$Q_e = \int P_e dt \quad (1.6.2)$$

Základnou jednotkou rádiometrie je **jeden watt (W)**, fotometrie je **lumen (lm)**.

Vyžarovanie

$$M_e = \frac{dP_e}{dA_s} \quad (1.6.3)$$

Časť vyžarovania  $M_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak nazývame **svetlením**  $M_v$ .

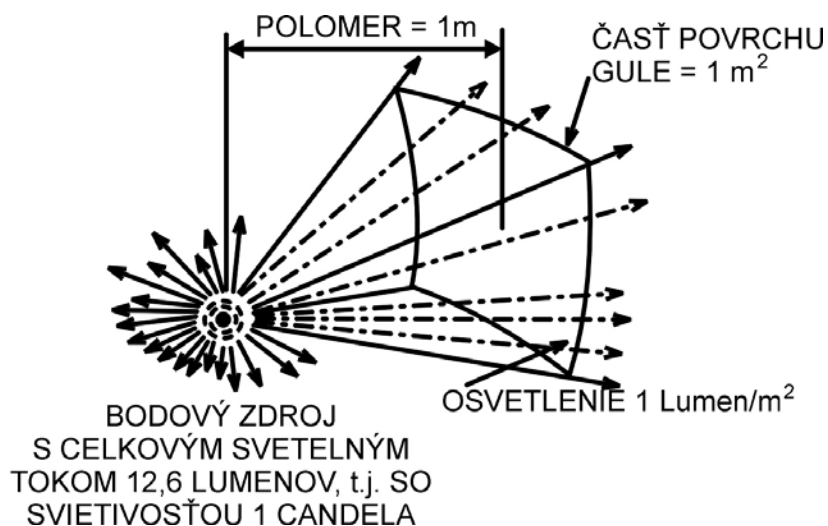


Obr 1.20 Žiarivý tok bodového žiariča do priestorového uhlu  $\Omega$ .

Žiarivosť

$$I_e = \frac{dP_e}{d\Omega} \quad (1.6.4)$$

Časť žiarivosti  $I_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **svietivosťou**  $I_v$ . Jednotka je **candela (cd)**.



Obr. 1.21 Svetivosť bodového zdroja.

### Žiara

$$I_e = \frac{dI_e}{dA_{sf}} = \frac{dI_e}{dA_s \cos \varphi} = \frac{d^2 P_e}{dA_s \cos \varphi d\Omega} \quad (1.6.5)$$

### Vyžarovanie

$$M_e = \int_{\Omega} L_e d\Omega \quad (1.6.6)$$

### Žiarivý tok

$$P_e = \iint_{A_s \Omega} L_e dA_s \cos \varphi d\Omega \quad (1.6.7)$$

Časť žiary  $L_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **jasom**  $L_v$ .

Účinnosť zdroja žiarenia  $\eta_e$ , resp. zdroja svetla  $\eta_v$

$$\eta_e = \frac{P_e}{P} \quad (1.6.8a)$$

$$\eta_v = \frac{P_v}{P} \quad (1.6.8b)$$

Veličiny vzťahujúce sa na prijímače (detektory) svetla (žiarenia).

**Ožiarenie**  $E_e$  ( $Wm^{-2}$ )

$$E_e = \frac{dP_e}{dA} \tag{1.6.9}$$

**Žiarivý tok**  $P_e$

$$P_e = \int_A E_e dA \tag{1.6.10}$$

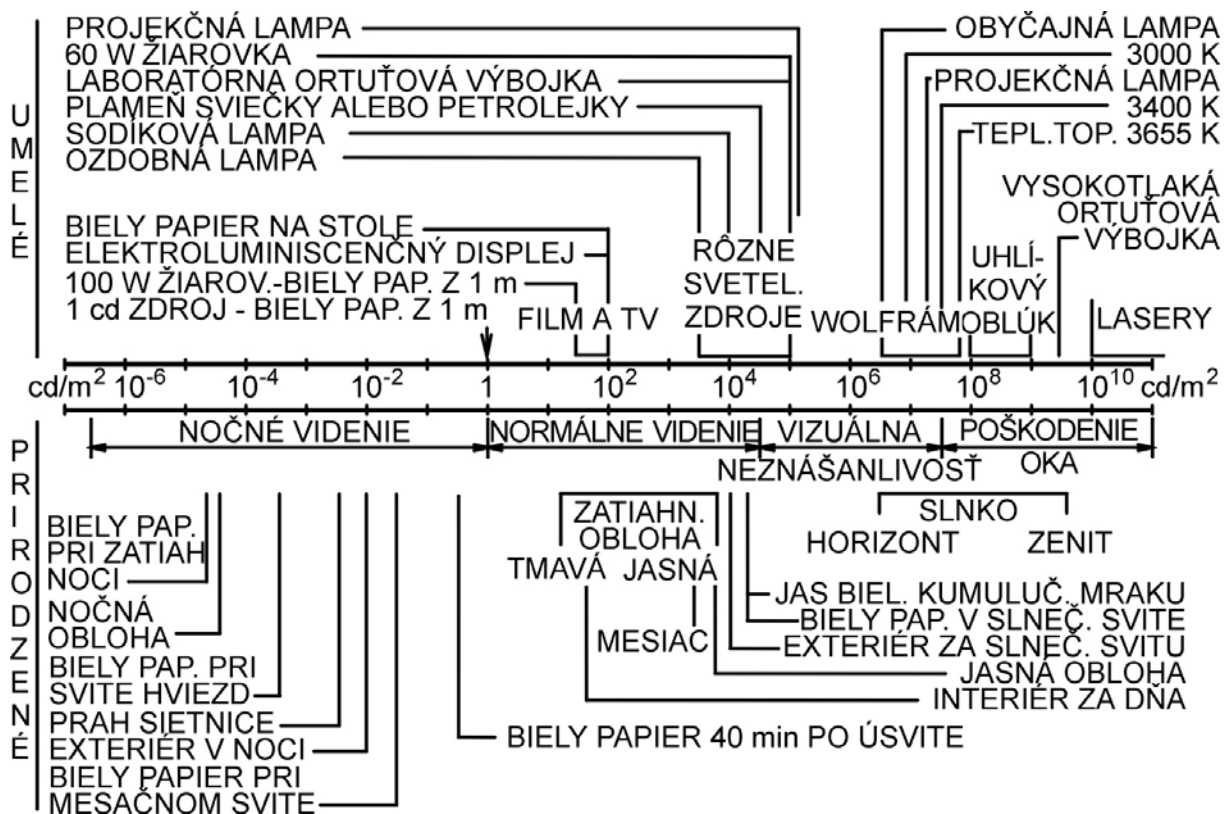
Časť žiarenia  $E_e$ , ktorá je z oblasti citlivosti ľudského zraku, nazývame **osvetlením**  $E_v$ . Jednotkou je **lux (lx) =  $lm/m^2$** .

**Dávka ožiarenia**

$$H_e = \int_T E_e dt \tag{1.6.11}$$

Jednotka  $Wsm^{-2} = Jm^{-2}$ .

Časť dávky ožiarenia  $H_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **expozíciou** (dávkou osvetlenia)  $H_v$  ( $lmsm^{-2} = lx.s$ ).



Obr 1.22 Oblasti jasu umelých a prírodných zdrojov svetla.