



OPTOELEKTRONIKA

ÚVOD

Dr.h.c. Prof.RNDR.Ing. Ján TURÁN, DrSc.

Department of Electronics and Multimedia Communications
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,
Slovakia

Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: jan.turan@tuke.sk

1 ÚVOD

1.3 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI SVETLA

Sedemnásťte storočie – dve teórie podstaty svetla:

- **Vlnová teória** Hooka a Huygensa
- **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 svetla vo vákuu**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

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

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

Korpuskulárne-vlnový dualizmus fotónov

1 ÚVOD

1.3 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI SVETLA

■ **Kvantum energie fotónu**

$$E_{\text{fot}} = \hbar\omega = fh = \frac{hc}{\lambda}$$

$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ redukovaná **Planckova konštanta** $\hbar = h / 2\pi$

$\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvencia

■ **Fotoefekt** – r. 1905 – Einstein – **Nobelova cena**

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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Elektromagnetická vlna

\vec{E} - intenzita elektrického poľa

\vec{H} - intenzita magnetického poľa

Z Maxwellových rovníc – Vlnové rovnice

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

Δ – Laplaceov operátor, c – rýchlosť svetla

$$c = f\lambda_0$$

V materiálnom prostredí

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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATÁ SVETLA

n – **index lomu**

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$$

μ_r a ε_r sú **relatívna permeabilita a permitivita**

Sínusové vlny

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

$$\varphi = \omega t - kx + \phi$$

φ – **fáza**, $k=2\pi/\lambda$ je **vlnové číslo**, Φ - **fázová konštanta**

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Rovinná elektromagnetická vlna (TEM vlna)

$$v = \frac{\omega}{k} = f\lambda$$

Fázová rýchlosť'. V praxi – **vlnový balík** s **grupovou rýchlosť'ou**

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$$

Zovšeobecnenie na opísanie rovinatej vlny šíriacej sa v smere určenom **vlnovým vektorom**

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

\vec{r} – **polohový vektor**, \vec{k} - **vlnový vektor**

Gul'ová vlna

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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Spôsob pohybu vektora intenzity elektrického poľav roviny kolmej na smer šírenia rovinnej vlny nazývame **polarizáciou**. Môže byť:

- **Lineárna**
- **Kruhová**
- **Eliptická**

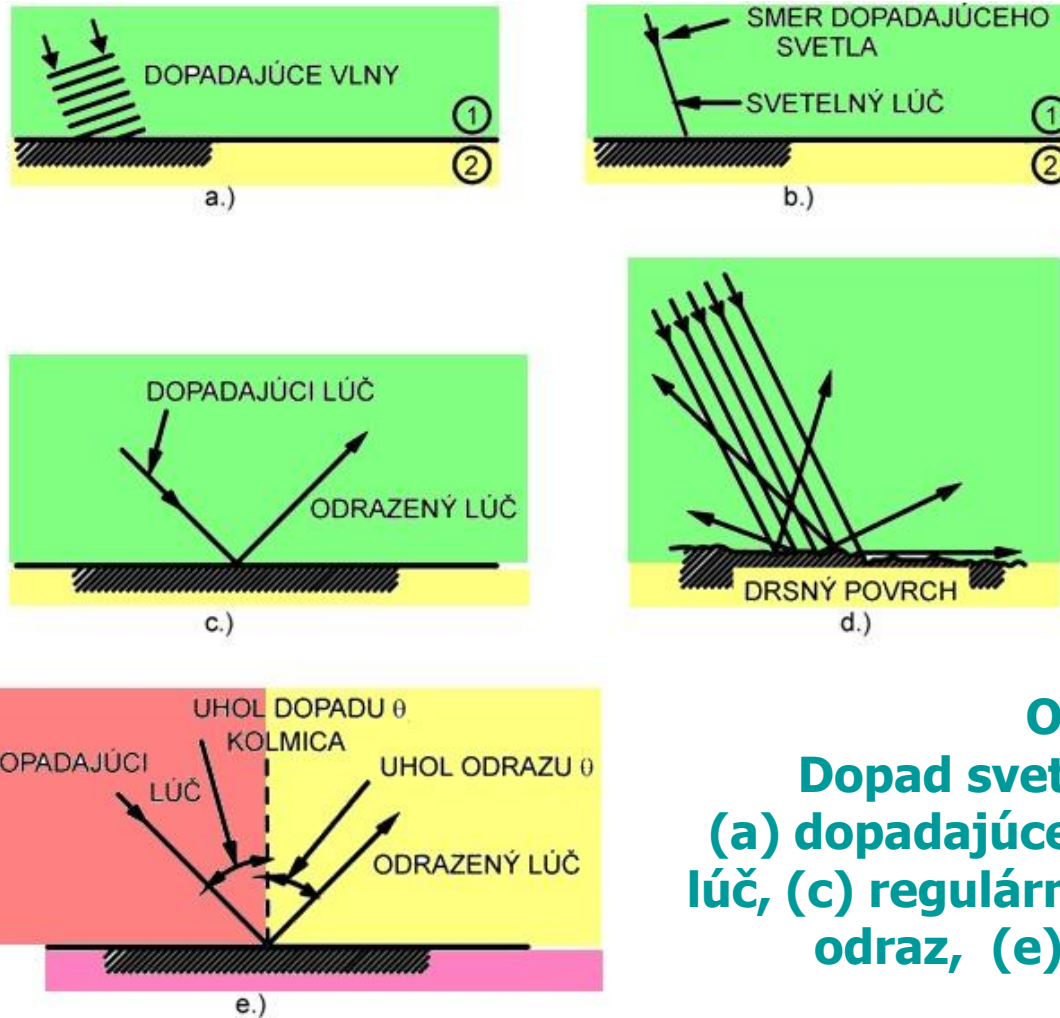
Kruhová a eliptická polarizácia - **Ľavotočivá**
- **Pravotočivá**

Elektromagnetická vlna môže byť **polarizovaná, nepolarizovaná, čiastočne polarizovaná**

- **Disperzné vlastnosti** (kvapaliny, plyny a tuhé látky) – **priehl'adné, priesvitné a nepriehl'adné**
- **Svetelný lúč – Geometrická optika**
- **Regulárny odraz**
- **Difúzny odraz**
- **Zákon odrazu**

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA



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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Snellov zákon lomu

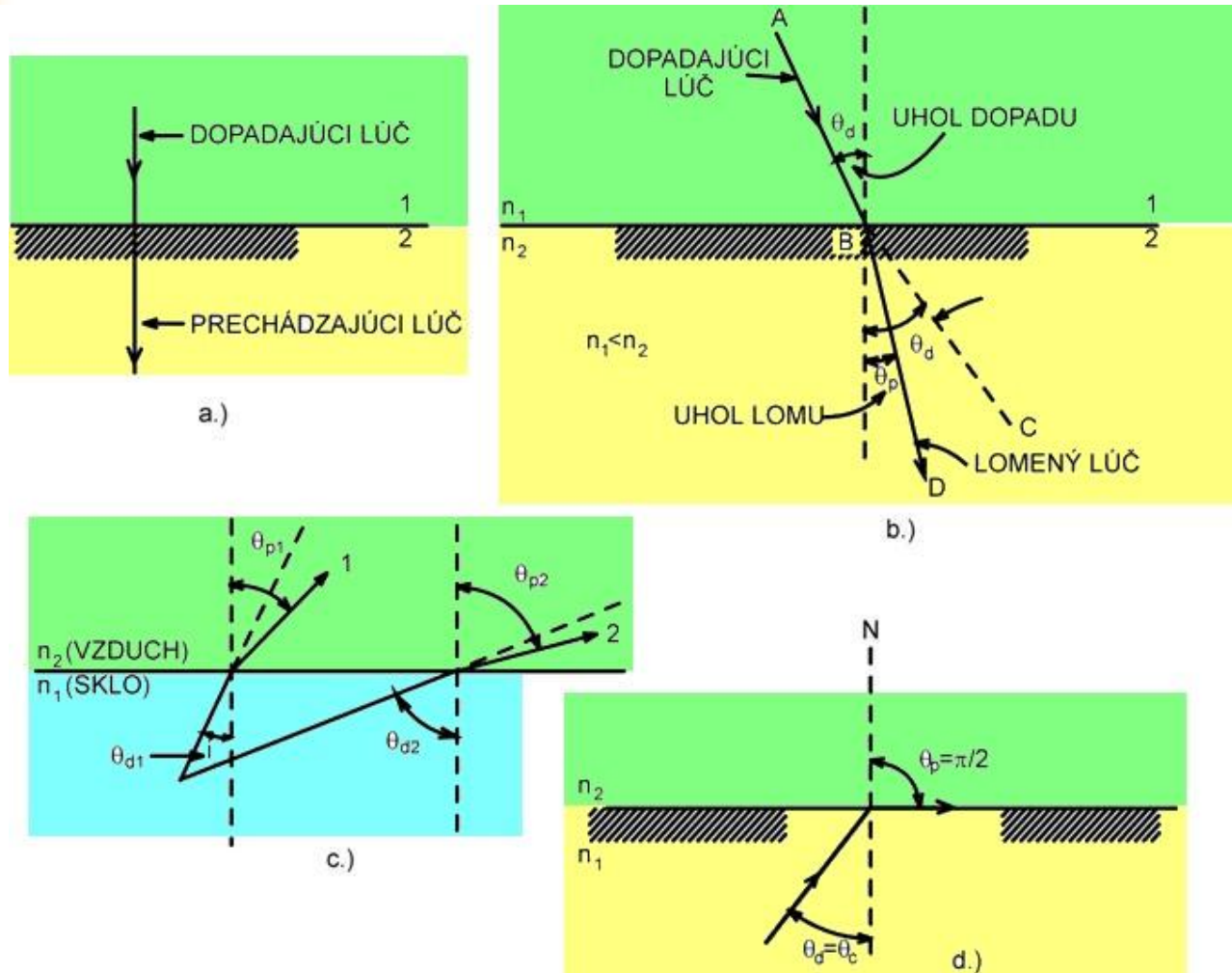
$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_p \Rightarrow \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_d} = \frac{n_1}{n_2} = n_{12}$$

n_{12} – relatívny index lomu

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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA



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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

$\Theta_p > \Theta_d$ lom smerom **od kolmice**, pre určitý uhol $\Theta_d = \Theta_c$ (tzv. **kritický uhol dopadu**) bude $\Theta_p = \pi/2$

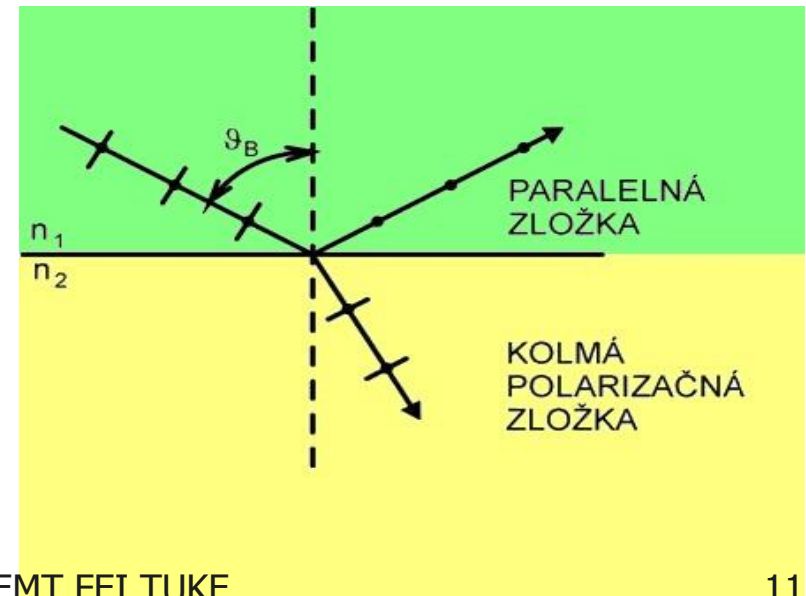
$$n_{12} \sin \theta_c = 1 \Rightarrow \theta_c = \arcsin \frac{1}{n_{12}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

pre $\Theta_d > \Theta_c$ je $\sin \Theta_p > 1$ – **úplný (totálny) odraz** –

povrchová vlna

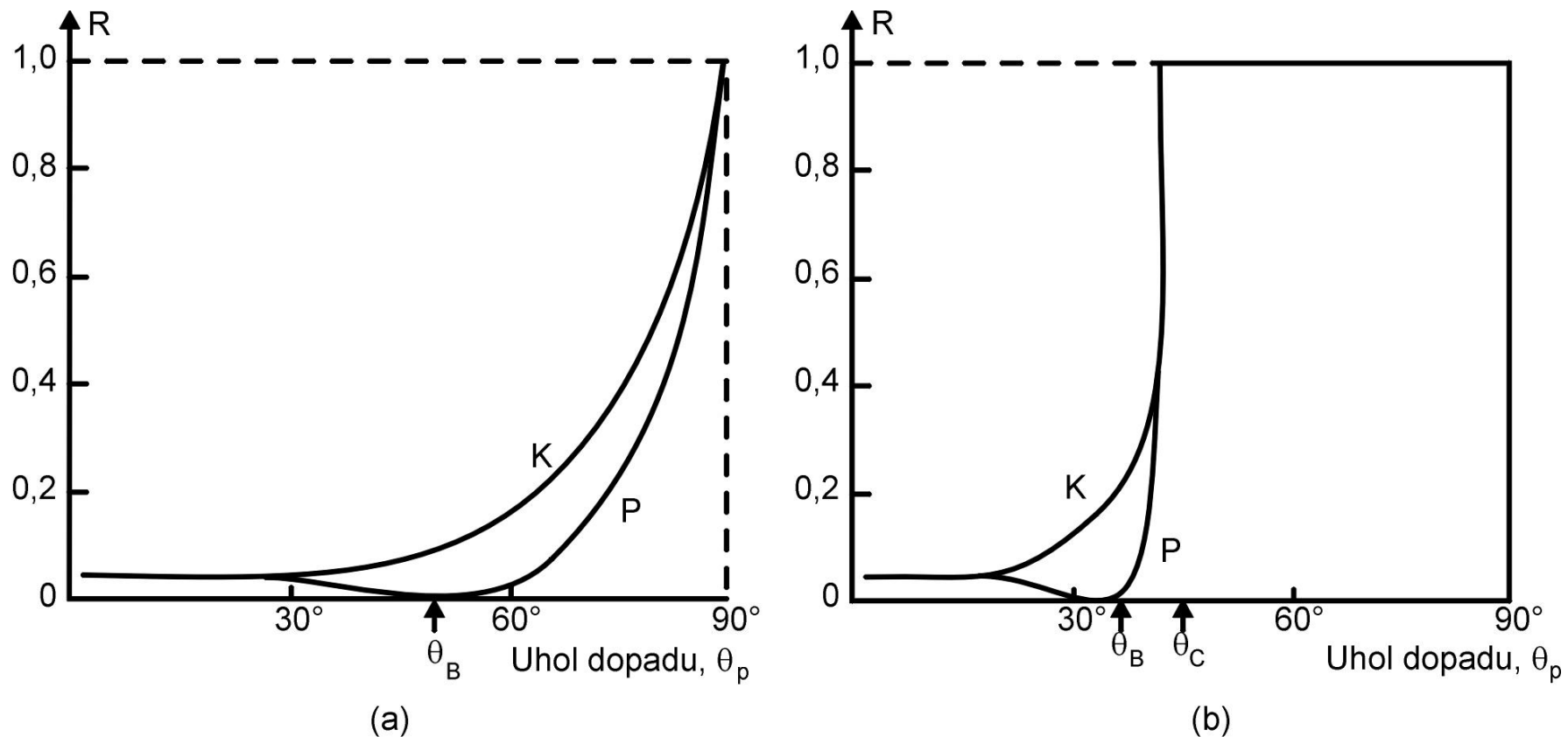
Brewsterov uhol $\Theta = \Theta_B$

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}}$$



1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATÁ SVETLA



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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Polarizácia svetla – 7 platničiek

- **Polaroid**
- **Polarizačné hranoly (Nicolov hranol, Glanov – Thompsonov hranol)**

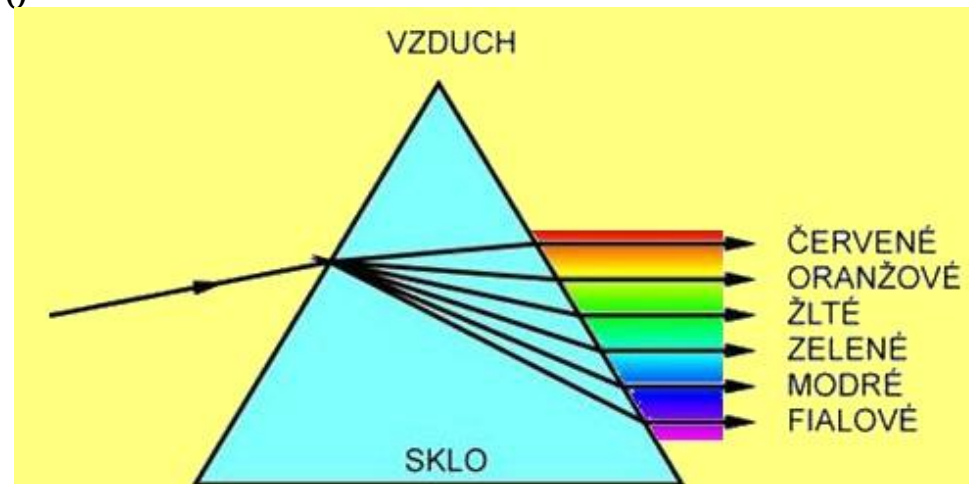
Intenzita prenášaného svetla – vyjadrenie **Malusovým zákonom**

$$I = E_0^2 \cos^2 \theta = I_0 \cos^2 \theta$$

Polychromatický lúč

Rozloženie bieleho svetla

Disperzia – rôzne rýchlosti šírenia svetla s rôznou vlnovou dĺžkou



1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Superpozícia dvoch alebo viacerých vln

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

Koherencia – interferenčné prúžky

Matematický opis interferencie

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2)$$

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

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

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

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Youngov pokus - fázový rozdiel

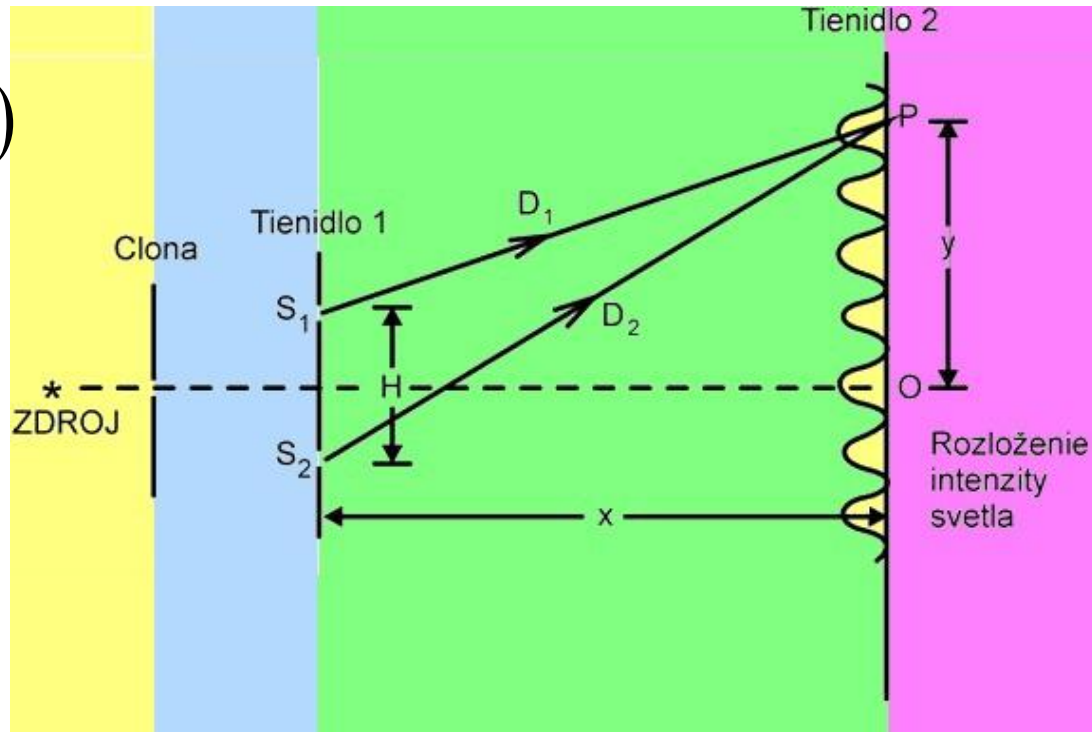
$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(D_2 - D_1)$$

Svetlé interferenčné prúžky

$$|D_2 - D_1| = p\lambda$$

Tmavé prúžky

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



Obr 1.13 Geometria Youngovho pokusu.

1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Interferenčné javy na tenkých vrstvách alebo platničkách

Fázový rozdiel

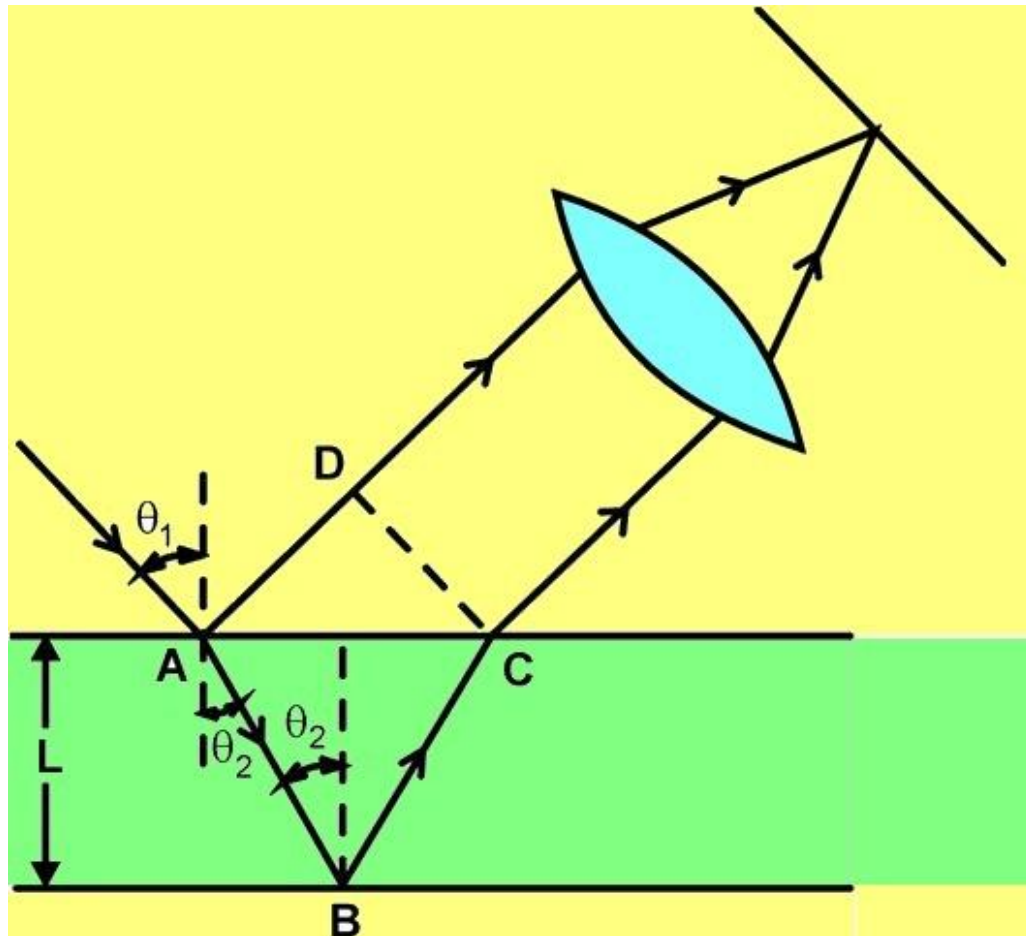
$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (2nL \cos \theta_2)$$

Svetlé prúžky

$$p\lambda = 2nL \cos \theta_2$$

Tmavé prúžky

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

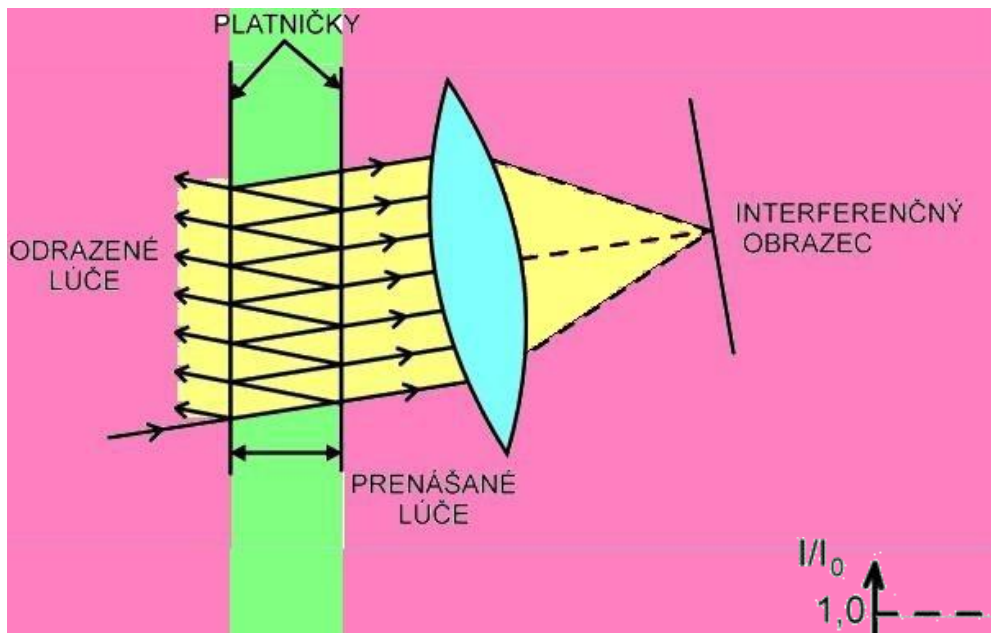


Obr 1.14 Interferencia na tenkej vrstve alebo platničke.

1 ÚVOD

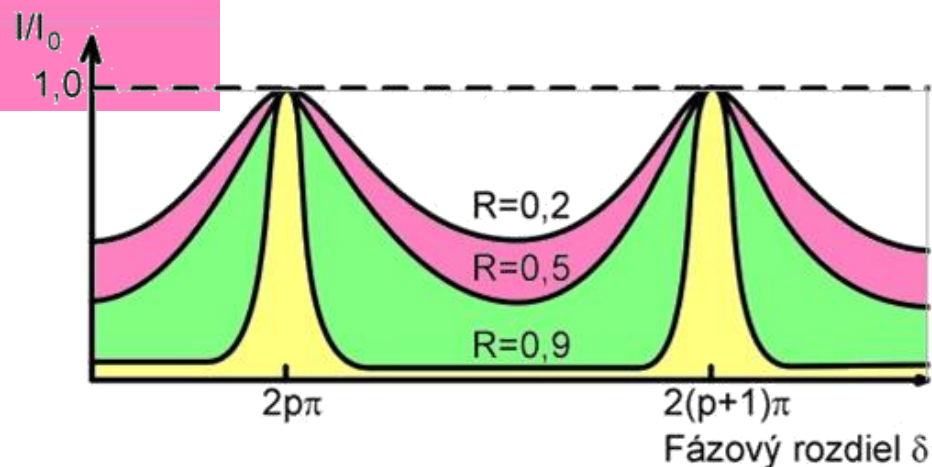
1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Fabryho – Perotov rezonátor



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

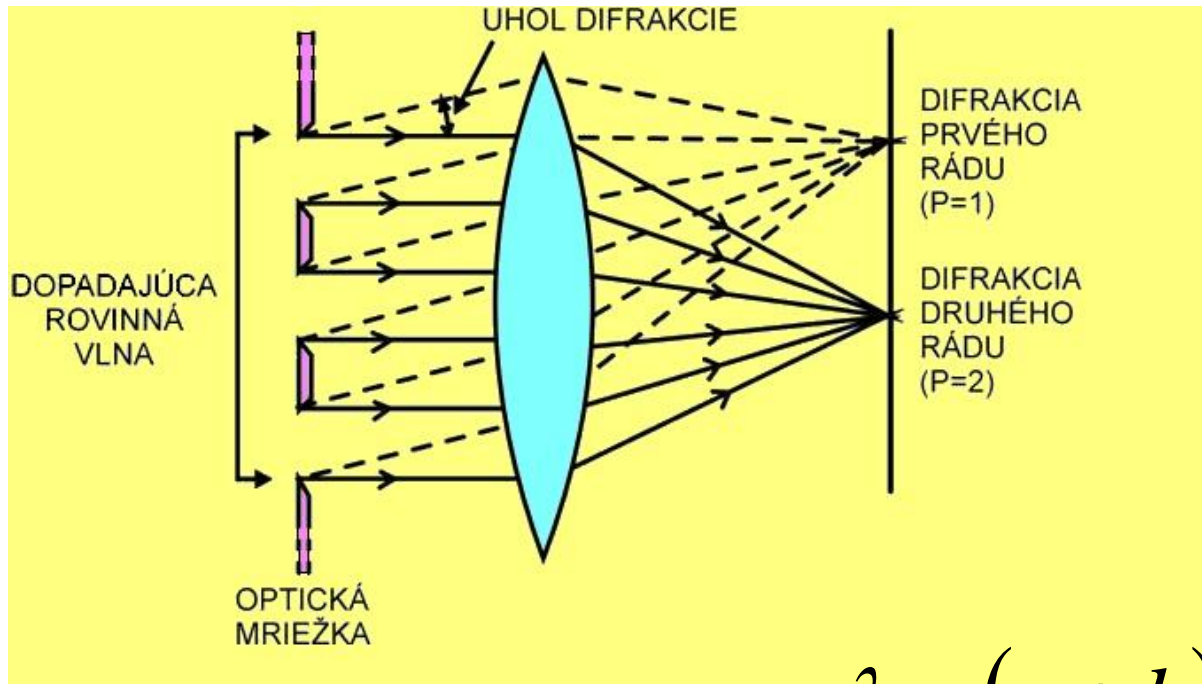
Obr. 1.16
Zmena relatívnej intenzity
(I/I_0) interferenčných
prúžkov
od zmeny hodnoty
odrazivosti zrkadiel R .



1 ÚVOD

1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

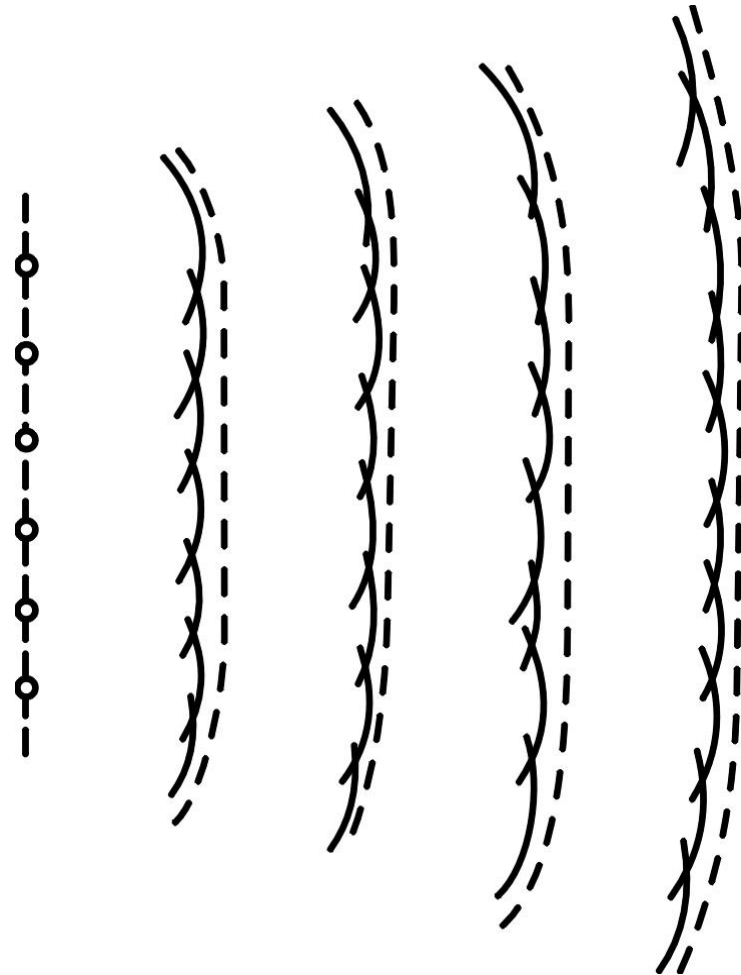
Optická mriežka



$$p\lambda = (a + b)\sin\theta = d \cos\theta$$

Obr 1.17 Interferencia na optickej mriežke.

- **Difrakcia**
- **Huygensov princíp**
- **Fresnelov – Kirchhoffov vzorec**
- **Fraunhoferova a Fresnelova difrakcia**



Obr 1.18 Huygensov princíp.

1 ÚVOD

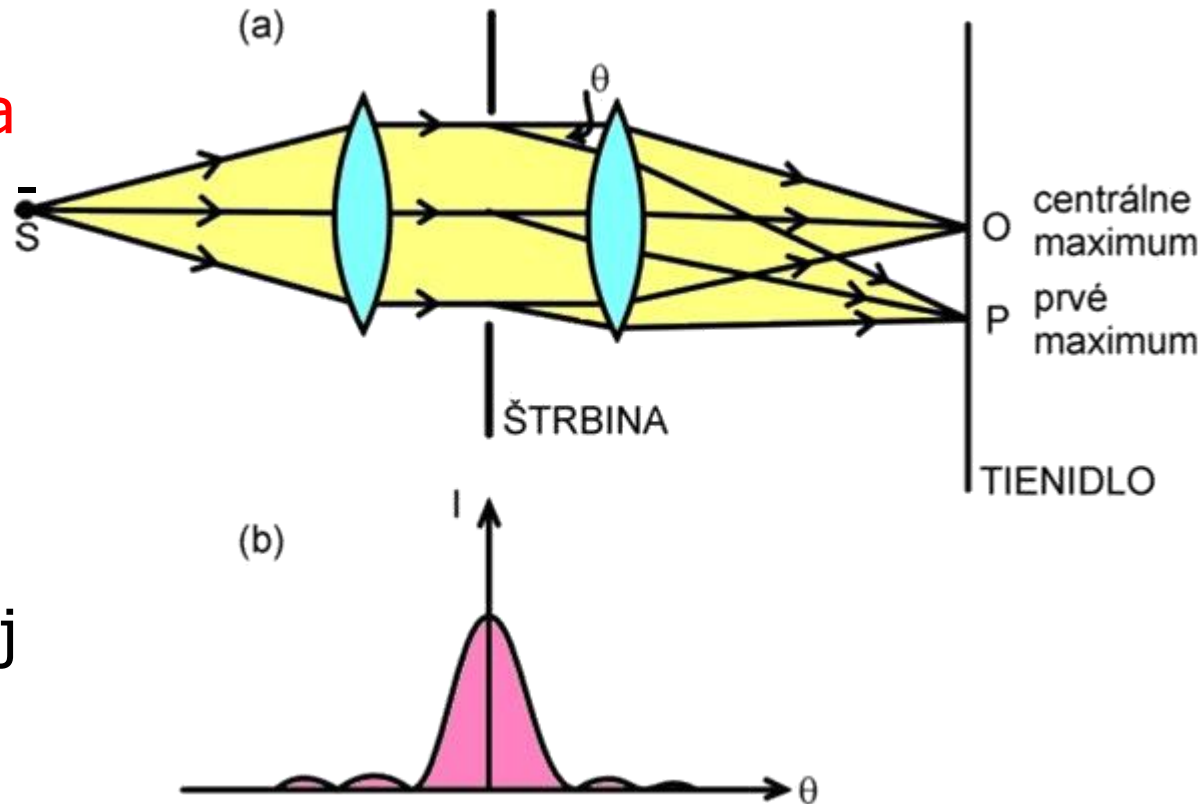
1.4 VLNOVÁ PODSTATÁ SVETLA

Fraunhoferova difrakcia vzniká na úzkej štrbine
Maximá

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

84% svetla v centrálnej oblasti (**Airyho disk**)

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



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

1 ÚVOD

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

$$W = \sigma T^4$$

σ – **Stefanova konštanta**

Väčšina teplých povrchov

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

ε – **emisivita povrchu** (medzi 0 a 1)

1 ÚVOD

1.5 KLASICKÉ ZDROJE SVETLA

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

$$\lambda_m T = \textit{konšt.}$$

λ_m – vlnová dĺžka maxima

Planckov vzťah

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

Kvantová podstata svetla – fotóny

Tento vzťah položil **základy modernej kvantovej teórie svetla**

1 ÚVOD

1.5 KLASICKÉ ZDROJE SVETLA

Excitované plyny – žiarenie emitované pri dobre definovaných **diskrétnych vlnových dĺžkach**

Bohrov model atómu

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

Kvantum žiarenia – fotón

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega$$

z čoho

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

Šírka spektrálnej čiary závisí od rôznych javov :

Heizenbergov princíp neurčitosti, Starkov jav, Zeemanov jav, Dopplerov jav

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

Rádiometrické jednotky značené **e (energia)**

Fotometrické jednotky značené **v (visible – viditeľné)**

Žiarivý tok

$$P_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Vyžiarená energia

$$Q_e = \int P_e dt$$

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

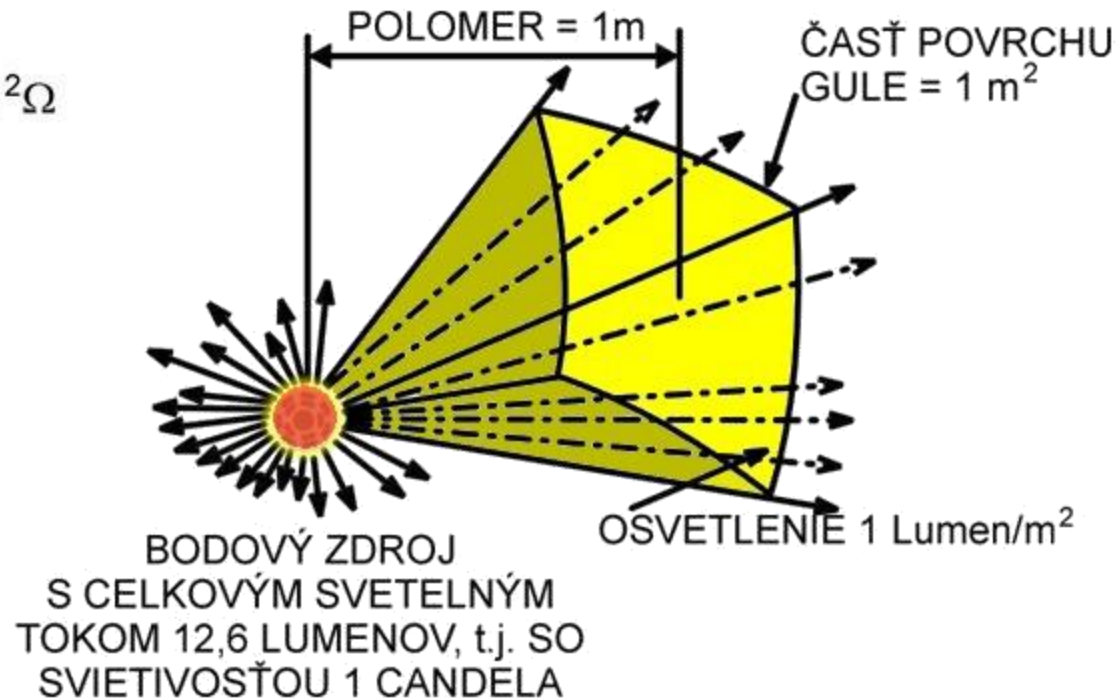
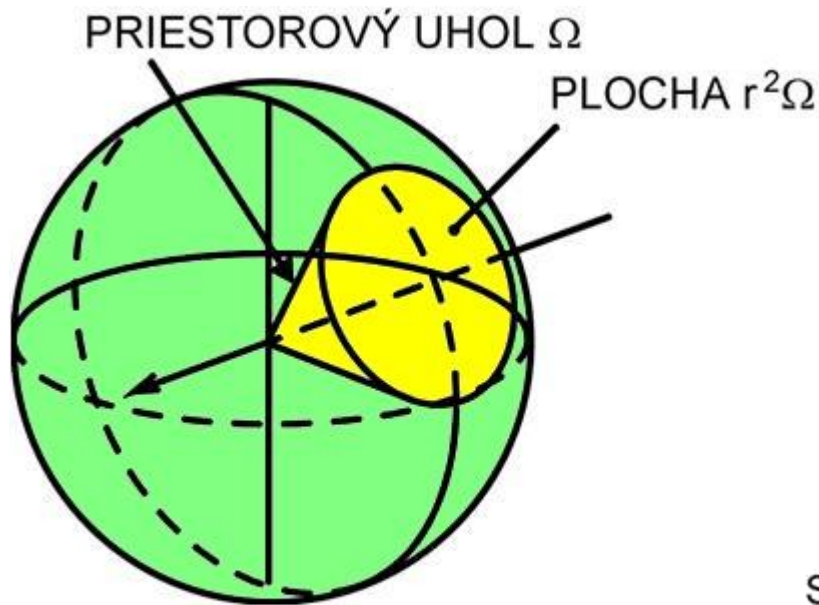
Vyžarovanie

$$M_e = \frac{dP_e}{dA_s}$$

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

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE



Obr 1.20 Žiarivý tok bodového žiariča do priestorového uhlu Ω .

Obr. 1.21 Svietivosť bodového zdroja.

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

Žiarivosť

$$I_e = \frac{dP_e}{d\Omega}$$

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

Žiara

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

Vyžarovanie

$$M_e = \int_{\Omega} L_e d\Omega$$

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

Žiarivý tok

$$P_e = \iint_{A_s \Omega} L_e dA_s \cos \varphi d\Omega$$

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

L_v

Účinnosť zdroja žiarenia \approx_e , resp. zdroja svetla \approx_v

$$\eta_e = \frac{P_e}{P}$$

$$\eta_v = \frac{P_v}{P}$$

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

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

Ožiarenie E_e (Wm^{-2})

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

Žiarivý tok P_e

$$P_e = \int_A E_e dA$$

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

Dávka ožiarenia

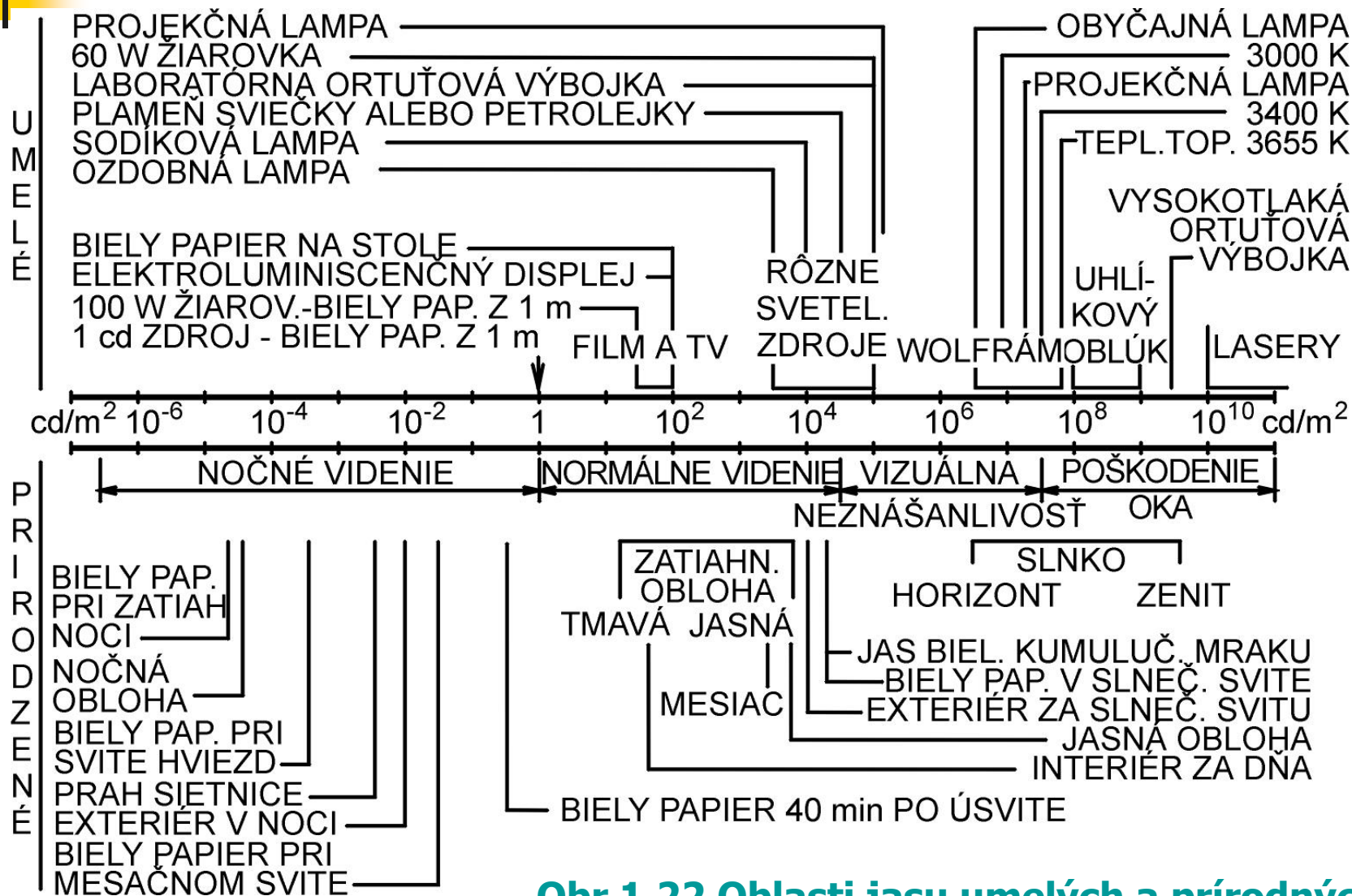
$$H_e = \int_T E_e dt$$

Jednotka $\text{Wsm}^{-2} = \text{Jm}^{-2}$

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

1 ÚVOD

1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE



Obr 1.22 Oblasti jasů umelých a přírodných zdrojů světla.

SI radiometry units 1/3

Quantity	Symbol	<u>SI</u> unit	Abbr.	Notes
<u>Radiant energy</u>	Q	<u>joule</u>	<u>J</u>	<u>Energy</u>
<u>Radiant flux</u>	Φ	<u>watt</u>	<u>W</u>	Radiant energy per unit time, also called <i>radiant power</i>
<u>Radiant intensity</u>	I	<u>watt per steradian</u>	$W \cdot sr^{-1}$	Power per unit solid angle
<u>Radiance</u>	L	watt per steradian per <u>square metre</u>	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	Power per unit solid angle per unit <i>projected</i> source area. Called <i>intensity</i> in some other fields of study.

SI radiometry units 2/3

Quantity	Symbol	<u>SI</u> unit	Abbr.	Notes
Radiant excitance Radiant emittance	M	watt per square metre	$W \cdot m^{-2}$	Power emitted from a surface.
<u>Radiosity</u>	J or J_{λ}	watt per square metre	$W \cdot m^{-2}$	Emitted plus reflected power leaving a surface
<u>Spectral radiance</u>	L_{λ} or L_{ν}	watt per steradian per <u>metre</u> ³ or watt per steradian per square metre per <u>hertz</u>	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$ or $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$	Commonly measured in $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot$ nm^{-1}

SI radiometry units 3/3

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
<u>Spectral irradiance</u>	E_λ or E_ν	watt per metre ³ <i>or</i> watt per square metre per hertz	$W \cdot m^{-3}$ <i>or</i> $W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$	Commonly measured in $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
Radiant emittance	M	watt per square metre	$W \cdot m^{-2}$	Power emitted from a surface.

SI photometry units 1/2

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
<u>Luminous energy</u>	Q_v	<u>lumen second</u>	lm·s	Units are sometimes called <u>talbots</u>
<u>Luminous flux</u>	F	<u>lumen</u> (= cd· <u>sr</u>)	lm	Also called <i>luminous power</i>
<u>Luminous intensity</u>	I_v	<u>candela</u> (= lm/sr)	cd	An <u>SI base unit</u>
<u>Luminance</u>	L_v	<u>candela per square metre</u>	cd/m ²	Units are sometimes called "nits"

SI photometry units 2/2

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
<u>Illuminance</u>	E_v	<u>lux</u> (= lm/m ²)	lx	Used for light <u>incident</u> on a surface
<u>Luminous emittance</u>	M_v	lux (= lm/m ²)	lx	Used for light emitted from a surface
<u>Luminous efficacy</u>		lumen per <u>watt</u>	lm/W	Ratio of luminous flux to <u>radiant fl</u>