

# Detekce světla

Antonín Černocho Jan Soubusta Ondřej Haderka

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR



# Obsah přednášky

- 1 Úvod – spektrum, radiometrie, zákony vyzařování, polovodiče, vlastnosti detektorů
- 2 Zdroje světla – rozdělení, lasery, polovodičové zdroje
- 3 Typy detektorů světla – rozdělení + oko, fotografie, termální a koherentní detektory
- 4 Vnitřní fotoefekt – fotorezistor, fotodioda
- 5 Šum detektoru – zdroje šumu, SNR, NEP, BER
- 6 Vnější fotoefekt – fotonásobič
- 7 Maticové detektory – CCD a CMOS
- 8 Maticové jednofotonové detektory – EM-CCD, iCCD apod.
- 9 Jednofotonové detektory – SPCM, VLPC, TES apod.
- 10 Supravodivé nanodrátky
- 11 Současná nabídka detektorů

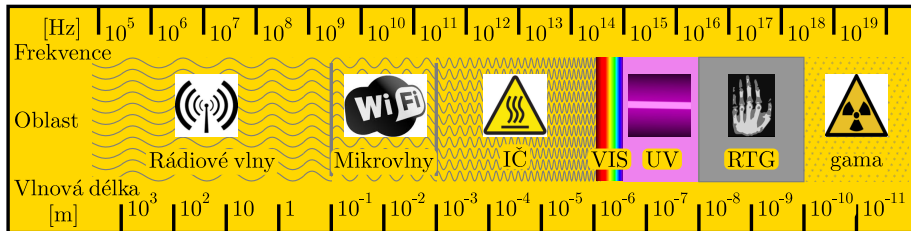
# Literatura

-  E. Mechlová, K. Košťál a kol., Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz, *Prometheus, Praha*, 1999
-  B. E. A. Saleh, M. C. Teich, Fundamentals of photonics, *Wiley, Hoboken, New Jersey*, 2007
-  George Rieke, Detection of Light : From the Ultraviolet to the Submillimeter, *Cambridge University Press, Cambridge*, 2003
-  Hamamatsu Photonics K. K., Photomultiplier tubes, third edition *Hamamatsu Photonics K. K.*, 2006

# Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
  - Oblasti elektromagnetického spektra
  - Informační okna
- 2 Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
- 3 Zákony vyzařování
- 4 Polovodiče
- 5 Základní obecné vlastnosti detektoru

# Elektromagnetické spektrum



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

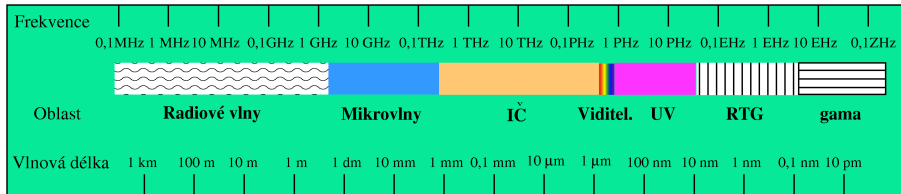
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Rádiová** km-0.1 m, antény, TV, rádio, mobily

**Mikrovlnná** 100-1 mm, magnetron nebo diody, molekuly s dipólovým momentem, mikrovlnka, Wi-fi, radar

**Infračervená**

- vzdálená IČ – 1 000-10  $\mu\text{m}$ , rotační módy molekul a fonony v pevných látkách
- střední IČ – 10-2.5  $\mu\text{m}$ , tepelné záření
- blízká IČ – 2.5-0.75  $\mu\text{m}$ , podobně jako VIS



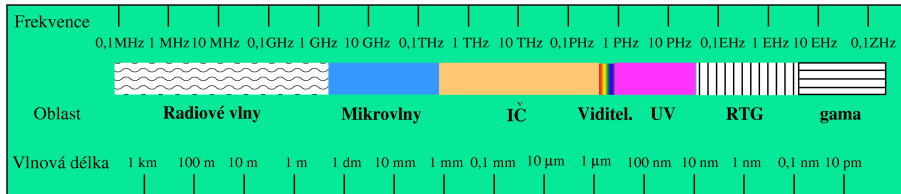
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Rádiová** km-0.1 m, antény, TV, rádio, mobily

**Mikrovlnná** 100-1 mm, magnetron nebo diody, molekuly s dipólovým momentem, mikrovlnka, Wi-fi, radar

**Infračervená**

- vzdálená IČ – 1 000-10  $\mu\text{m}$ , rotační módy molekul a fonony v pevných látkách
- střední IČ – 10-2.5  $\mu\text{m}$ , tepelné záření
- blízká IČ – 2.5-0.75  $\mu\text{m}$ , podobně jako VIS



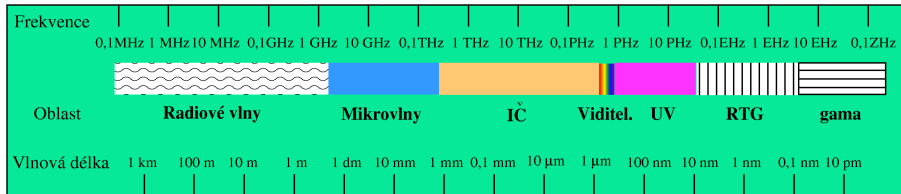
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Rádiová** km-0.1 m, antény, TV, rádio, mobily

**Mikrovlnná** 100-1 mm, magnetron nebo diody, molekuly s dipólovým momentem, mikrovlnka, Wi-fi, radar

**Infračervená**

- vzdálená IČ – 1 000-10  $\mu\text{m}$ , rotační módy molekul a fonony v pevných látkách
- střední IČ – 10-2.5  $\mu\text{m}$ , tepelné záření
- blízká IČ – 2.5-0.75  $\mu\text{m}$ , podoně jako VIS





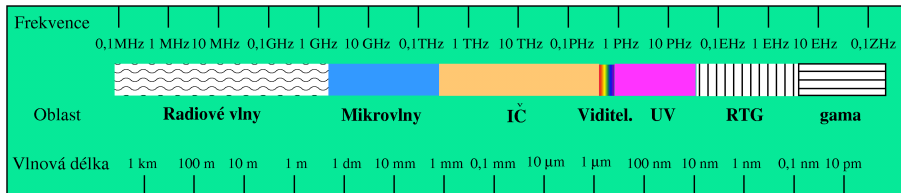
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Viditelná (VIS)** 760-380 nm, maximum záření hvězd, energetická vzdálenost elektronových hladin atomů

Ultrafialová (UV) 400-10 nm, ionizující záření, sterilizace

Rentgenová (X) 10-0.01 nm, neutrinové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

Gama ( $\gamma$ ) menší jak 10 pm, vytváří radioizotopy



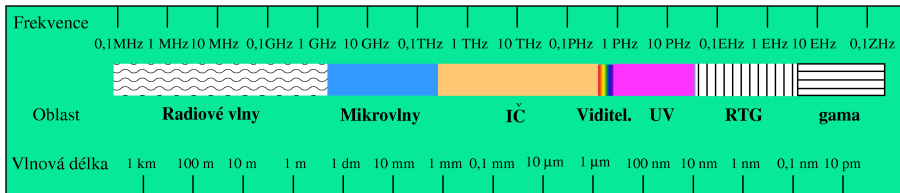
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Viditelná (VIS)** 760-380 nm, maximum záření hvězd, energetická vzdálenost elektronových hladin atomů

**Ultrafialová (UV)** 400-10 nm, ionizující záření, sterilizace

**Rentgenová (X)** 10-0.01 nm, neutrinové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

**Gama ( $\gamma$ )** menší jak 10 pm, vytváří radioizotopy



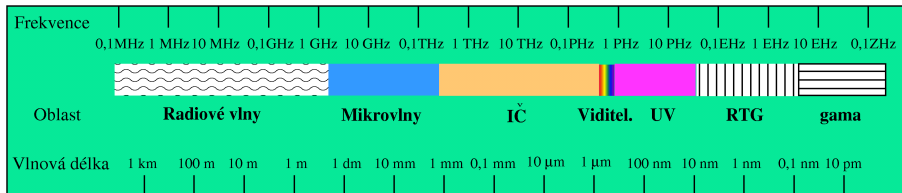
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Viditelná (VIS)** 760-380 nm, maximum záření hvězd, energetická vzdálenost elektronových hladin atomů

**Ultrafialová (UV)** 400-10 nm, ionizující záření, sterilizace

**Rentgenová (X)** 10-0.01 nm, neutrinové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

**Gama ( $\gamma$ )** menší jak 10 pm, vytváří radioizotopy



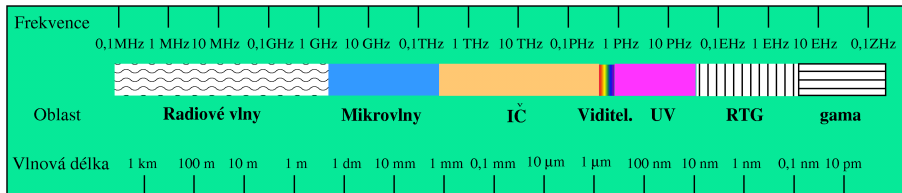
# Oblasti elektromagnetického spektra

**Viditelná (VIS)** 760-380 nm, maximum záření hvězd, energetická vzdálenost elektronových hladin atomů

**Ultrafialová (UV)** 400-10 nm, ionizující záření, sterilizace

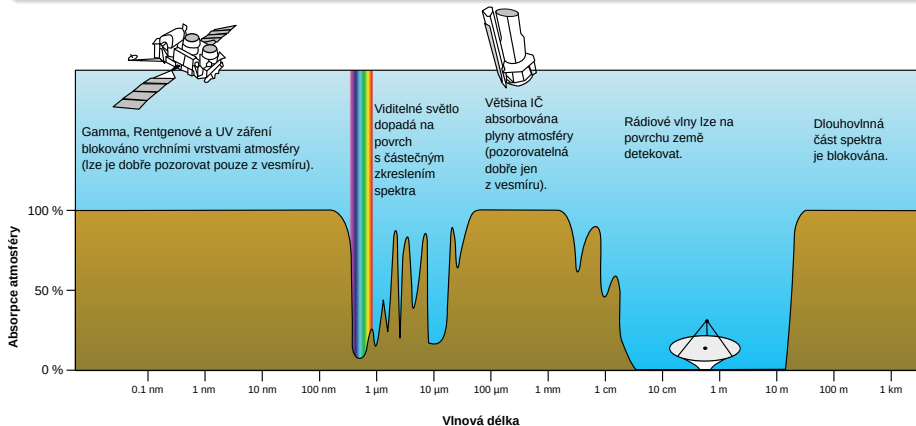
**Rentgenová (X)** 10-0.01 nm, neutrinové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

**Gama ( $\gamma$ )** menší jak 10 pm, vytváří radioizotopy



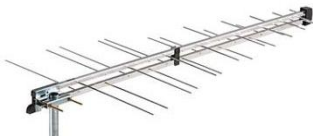
# Přenos informace ve volném prostoru

- Rádiové vlny – ohyb za překážky, rušení atmosférickými jevy
- Blízká infračervená oblast



# Frekvenční pásma (ve vzduchu)

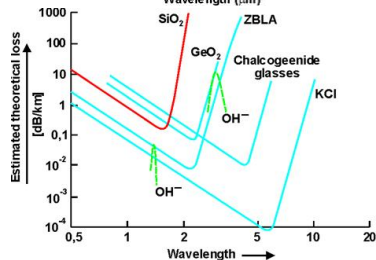
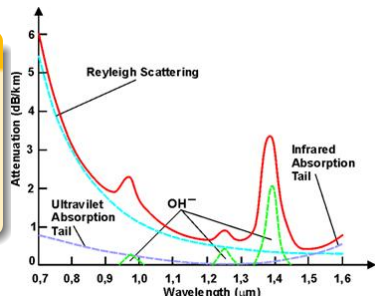
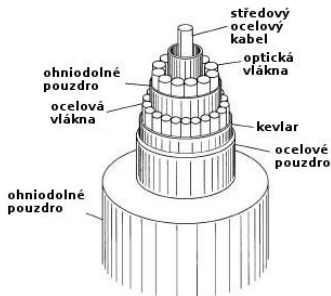
zařízení	f [MHz]	$\lambda$ [m]
AM	1	300
analog TV & FM	100	3
digi TV	500	0.6
GSM	900	0.33
5G	700 až 4 700	0.42 až 0.06
Wi-fi	2 400 a 5 000	0.06 a 0.12
IrDA	333 000 000	0.000 000 9



# Přenos informace v optickém vlákně

## Informační okna

- křemíková vlákna – 830 nm, 1 300 nm a 1 550 nm
- fluoridová a chalkogenní skla – širokospektrální

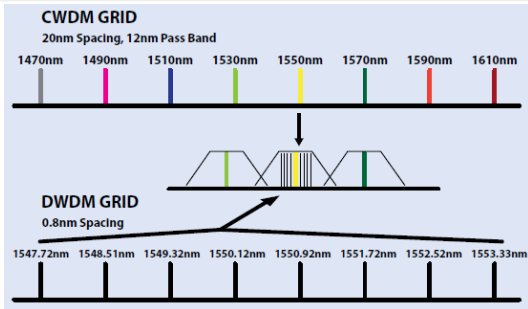
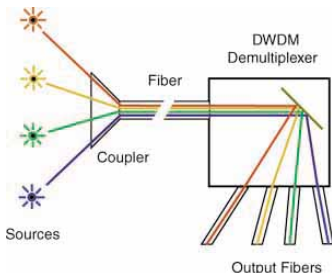


# Multiplexace – navýšení přenosové kapacity

## WDM – Wavelength-division multiplexing

CWDM (Coarse) – 8 kanálů s 20 nm rozestupy, 10 Gbit/s

DWDM (Dense) – až 160 kanálů s 0.8 nm rozestupy, 1.6 Tbit/s





# Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny**
  - Pojmy
  - Veličiny
- 3 Zákony vyzařování
- 4 Polovodiče
- 5 Základní obecné vlastnosti detektoru

# Metrologická optika

Energetické vlastnosti optického záření, jejich vztah k oku popř. jiným detektorům, barevné charakteristiky

## Radiometrické veličiny ( $r$ )

absolutní, v jednotkách SI (W, J)

## Fotometrické veličiny ( $v$ )

relativní vzhledem k citlivosti lidského oka popř. jiného receptoru (fotovoltaický článek), používá vedlejší jednotky SI (lm, cd, nit)

## Fotonové veličiny ( $p$ )

úměrné počtu kvant elektromagnetického záření – fotonů, jednotka energie eV

# Metrologická optika

Energetické vlastnosti optického záření, jejich vztah k oku popř. jiným detektorům, barevné charakteristiky

## Radiometrické veličiny ( $r$ )

absolutní, v jednotkách SI (W, J)

## Fotometrické veličiny ( $v$ )

relativní vzhledem k citlivosti lidského oka popř. jiného receptoru (fotovoltaický článek), používá vedlejší jednotky SI (lm, cd, nit)

## Fotonové veličiny ( $p$ )

úměrné počtu kvant elektromagnetického záření – fotonů, jednotka energie eV

# Metrologická optika

Energetické vlastnosti optického záření, jejich vztah k oku popř. jiným detektorům, barevné charakteristiky

## Radiometrické veličiny ( $r$ )

absolutní, v jednotkách SI (W, J)

## Fotometrické veličiny ( $v$ )

relativní vzhledem k citlivosti lidského oka popř. jiného receptoru (fotovoltaický článek), používá vedlejší jednotky SI (lm, cd, nit)

## Fotonové veličiny ( $p$ )

úměrné počtu kvant elektromagnetického záření – fotonů, jednotka energie eV

## Example (Energie jednoho fotonu)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}; \quad c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \Rightarrow$$

$$E_{555 \text{ nm}} = 3.58 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.2 \text{ eV}$$

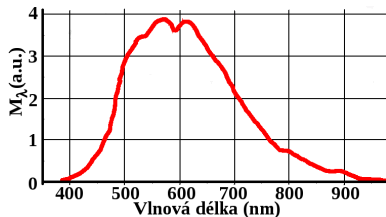
## Example (Energie jednoho fotonu)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}; \quad c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \Rightarrow$$

$$E_{555 \text{ nm}} = 3.58 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.2 \text{ eV}$$

- veličiny jsou závislé na frekvenci  $\nu$  resp. vlnové délce  $\lambda$
- spektrální průběh veličiny (spojité, čárové)
- přeintegrování přes celé spektrum  
→ spektrálně nezávislé veličiny



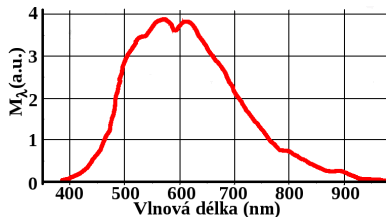
## Example (Energie jednoho fotonu)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}; \quad c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \Rightarrow$$

$$E_{555 \text{ nm}} = 3.58 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.2 \text{ eV}$$

- veličiny jsou závislé na frekvenci  $\nu$  resp. vlnové délce  $\lambda$
- spektrální průběh veličiny (spojité, čárové)
- přeintegrovaní přes celé spektrum  
→ spektrálně nezávislé veličiny



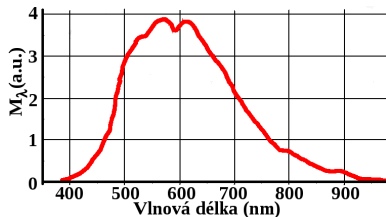
## Example (Energie jednoho fotonu)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}; \quad c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \Rightarrow$$

$$E_{555 \text{ nm}} = 3.58 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.2 \text{ eV}$$

- veličiny jsou závislé na frekvenci  $\nu$  resp. vlnové délce  $\lambda$
- spektrální průběh veličiny (spojité, čárové)
- přeintegrovaní přes celé spektrum  
→ spektrálně nezávislé veličiny





# Zdroj záření

# Radiant source

*Světelný zdroj*

*Zdroj fotonů*

*Light source*

*Photon source*

objekt, který na základě různých fyzikálních principů emituje elektromagnetické záření



Bodový zdroj plošnou velikost lze zanedbat vzhledem k vzdálenostem

Plošný zdroj plošnou velikost nelze zanedbat

# Veličiny I

**Zářivá energie** –  $Q_r$  [ $\text{J}=\text{kgm}^2/\text{s}^2$ ]

*Radiant energy*

- energie elmag. záření vyslaná, přenesená nebo přijatá

**Světelné množství** –  $Q_v$  [ $\text{lm s}$ ]

*Quantity of light*

**Počet fotonů** –  $N$  [1]

*Number of photons*

**Hustota zářivé energie** –  $w_r$  [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]

*Radiant energy density*

- množství zářivé energie v jednotkovém objemu
- práh poškození laserové optiky



## Veličiny II

**Zářivý tok (výkon)** –  $\Phi_r = \frac{dQ_r}{dt}$  [W]

*Radiant power*

- výkon (energie za čas) vyslaný, přenesený nebo přijatý ve formě elmag. záření

**Světelný tok** –  $\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$  [lm]

*Luminous flux*

1 W = 683 lm pro  $\lambda = 555$  nm (maximum zrakového vjemu)

**Fotonový tok** –  $\Phi_p$  [ $s^{-1}$ ]

*Photon flux*

**Vyzařování** –  $M_r = \frac{d\Phi_r}{dS}$  [ $W/m^2$ ]

*Radiant excitance*

- zářivý tok emitovaný z jednotkové plochy zdroje

**Světlení** –  $M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$  [ $lm/m^2$ ]

*Luminous excitance*

**Fotonové vyzařování** –  $M_p$  [ $s^{-1} m^{-2}$ ]

*Photon excitance*

# Veličiny III

**Zářivost** –  $I_r = \frac{d\Phi_r}{d\omega}$  [W sr<sup>-1</sup>]

*Radiant intensity*

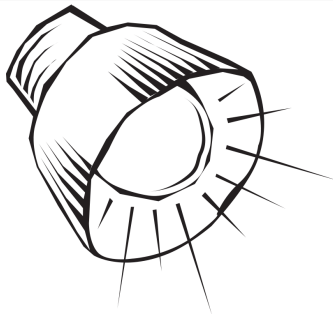
- zářivý tok emitovaný do jednotkového prostorového úhlu

**Svítivost** –  $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega}$  [cd = lm sr<sup>-1</sup>]

*Luminous intensity*

**Fotonová zářivost** –  $I_p$  [s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup>]

*Photon intensity*



# Veličiny IV

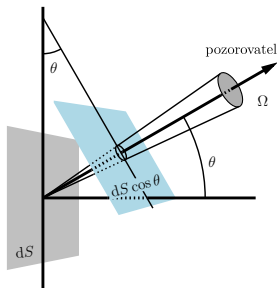
**Zář** –  $L_r = \frac{I_r}{dS \cos \theta}$  [W sr<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>] *Radiance*

- zářivost jednotkového povrchu viděného pod úhlem  $\theta$

**Jas** –  $L_v = \frac{I_v}{dS \cos \theta}$  [nt = cd m<sup>-2</sup>] *Luminance*

**Fotonová zář** –  $L_p$  [s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]

*Photon radiance*



## Example (Zdroje jasu v nitech)

Slunce v zenitu	$1.6 \times 10^9$	plamen svíčky	5 000
modrá obloha	8 000	rubínový laser	$10^{18}$
zamračená obloha	40	atomová bomba	$10^{12}$
Měsíc	2 500	hvězda Sirius	$1.5 \times 10^{10}$
noční obloha	$5 \times 10^{-5}$		

# Veličiny V

**Ozářenost** –  $E_r = \frac{d\Phi_r}{dS}$ , [ $\text{W m}^{-2}$ ]

*Irradiance*

- množství zářivého toku dopadajícího na jednotkovou plochu

**Osvětlení** –  $E_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$ , [ $\text{lx} = \text{lm m}^{-2}$ ]

*Illuminance*

**Fotonová ozářenost** –  $E_p$  [ $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]

*Photon irradiance*

## Example (Zdroje osvětlení v luxech)

Slunce v zenitu	100 000	Měsíc v úplňku	0.2
poledne ve stínu	10 000	bezměsíčná noc	0.001
zamračená obloha	100 až 1 000	tmavá noc	0.000 1

# Veličiny VI

Dávka ozáření –  $H_r = \int_0^t E_r(t)dt$ , [ $J m^{-2}$ ]

*Radiance exposure*

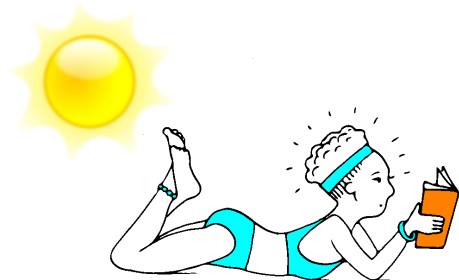
- ozáření jednotkové plochy za daný časový interval
- expozice

Osvit –  $H_v = \int_0^t E_v(t)dt$ , [ $lx s$ ]

*Light exposure*

Fotonová dávka ozáření –  $H_p$  [ $m^{-2}$ ]

*Photon exposure*



# Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
- 3 Zákony vyzařování**
  - Historický vývoj
  - Mezi zdrojem a detektorem
  - Příklady
- 4 Polovodiče
- 5 Základní obecné vlastnosti detektoru



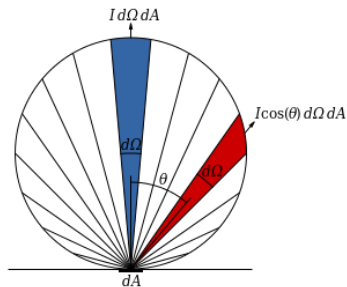
# Pojmy

## Lambertovský (kosinový) zářič

splňuje podmínku  $I_r(\theta) = I_r(0) \cos \theta$ ,

$\rightarrow M_r = \pi \cdot L_r \rightarrow$

$$\Phi_r = 4\pi r^2 M_r = 4\pi^2 r^2 L_r$$



# Pojmy

## Lambertovský (kosinový) zářič

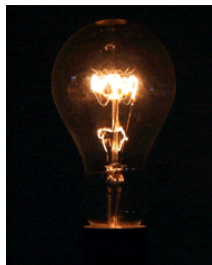
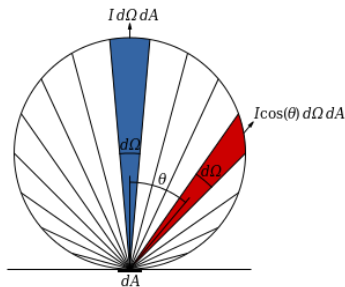
splňuje podmínku  $I_r(\theta) = I_r(0) \cos \theta$ ,

$\rightarrow M_r = \pi \cdot L_r \rightarrow$

$$\Phi_r = 4\pi r^2 M_r = 4\pi^2 r^2 L_r$$

## Absolutně černé těleso

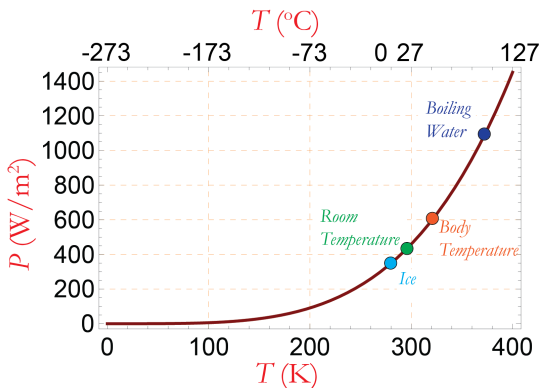
- Gustav Kirchhoff
- absorbuje veškeré dopadající elektromagnetické záření
- vyzařuje na různých vlnových délkách podle teploty
- šedé těleso, selektivní zářič



# Stefanův-Boltzmanův zákon

$$M_{\text{T}} = \sigma_{\text{SB}} T^4, \quad \sigma_{\text{SB}} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

odvozen empiricky roku 1879, později teoreticky podložen zákony termodynamiky



# Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{max} = b/T, \quad b = 2.897\,772\,1(26) \times 10^{-3} \text{ m K}$$

- odvozen roku 1893 Wilhelmem Wienem
- určuje vlnovou délku maxima vyzařovací křivky
- pyrometry k určení tzv. barevné teploty světla



# Změna energie spojitě nebo po kvantech?

Rayleighův-Jeansův zákon –  $M_r(\lambda) = \frac{2\pi^3 ck_B T}{\lambda^4}$ ,

$$k_B = 1.380\,662 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

- roku 1900 Lord Rayleigh odvodil z klasického popisu závislost  $\lambda^{-4}$
- roku 1905 spolu s Jeansem dodal i Boltzmannovu konstantu
- ultrafialová katastrofa – kde udělali soudruzi z GB chybu?

# Změna energie spojitě nebo po kvantech?

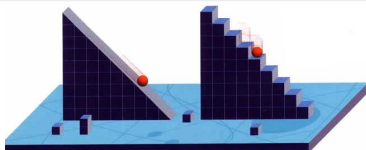
Rayleighův-Jeansův zákon –  $M_r(\lambda) = \frac{2\pi^3 ck_B T}{\lambda^4}$ ,

$$k_B = 1.380\,662 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

- roku 1900 Lord Rayleigh odvodil z klasického popisu závislost  $\lambda^{-4}$
- roku 1905 spolu s Jeansem dodal i Boltzmannovu konstantu
- ultrafialová katastrofa – kde udělali soudruzi z GB chybu?

Planckův zákon –  $M_r(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1)}$

- byl odvozen roku 1900 pomocí kvantování elmag pole

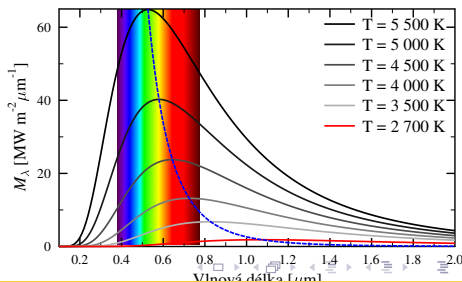
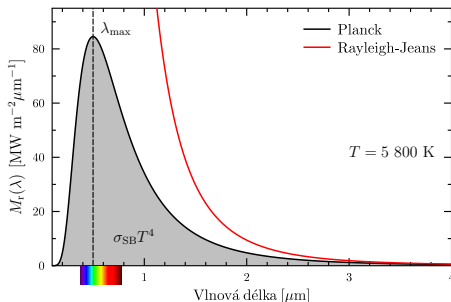


# Spektrální intenzita vyzařování černého tělesa

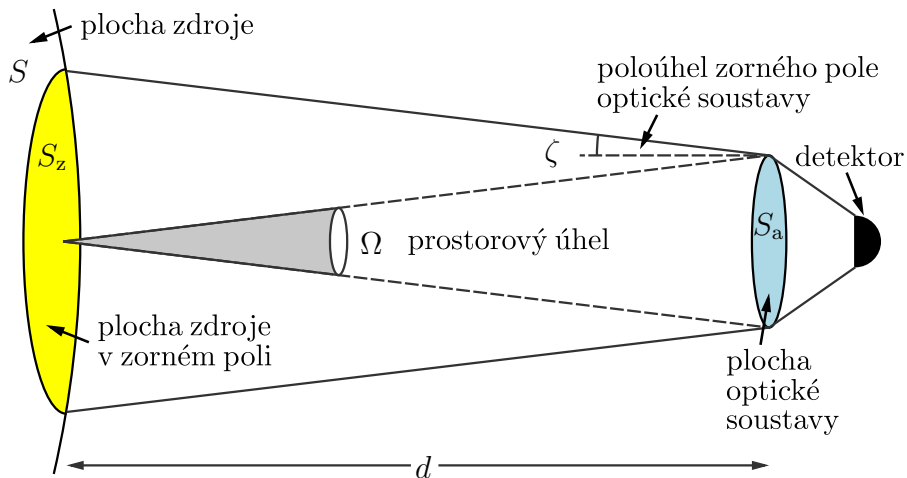
$$M_r(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

$$\lambda_{max} [\mu\text{m}] = 2898/T$$

$$M_r = \sigma_{SB} T^4$$



# Geometrie





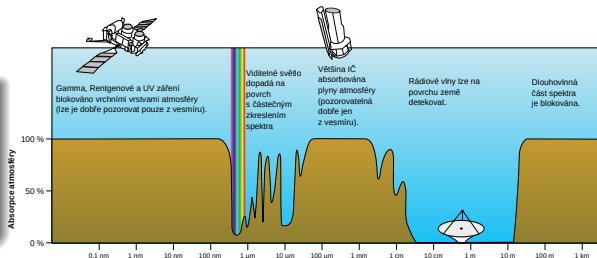
# Spektrální propustnost

## Propustnost

$T_P(\lambda)$  prostředí

$T_O(\lambda)$  optické soustavy

$T_F(\lambda)$  filtrů

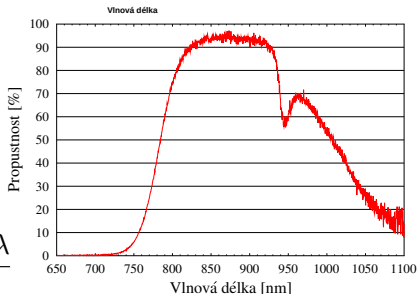


Optický výkon na detektoru:

$$\Phi_r(\lambda) = \frac{S_z S_a T_P(\lambda) T_O(\lambda) T_F(\lambda) L_r(\lambda)}{d^2}$$

úzká oblast spektra  $\Delta\lambda$  okolo  $\lambda_0$

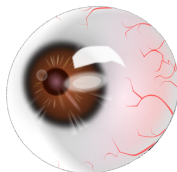
$$\Phi_r \approx \frac{S_z S_a T_P(\lambda_0) T_O(\lambda_0) T_F(\lambda_0) L_r(\lambda_0) \Delta\lambda}{d^2}$$



## Example (Žárovka)

Vypočtěte optický výkon  $\Phi_r$  dopadající na kruhovou plochu  $\rho = 2 \text{ mm}$  (zornice oka) vzdálenou  $d = 1 \text{ m}$  od světelného zdroje o zářivém toku  $\Phi_{\text{vyz}} = 100 \text{ W}$ .

**Předpoklad:** Zdroj je Lambertovský zářič, tedy  $\Phi_r = 4\pi I_r$ .



## Řešení

$$I_r = \frac{\Phi_r}{4\pi}, \quad S = \pi\rho^2, \quad \Omega = \frac{S}{d^2} \Rightarrow \Phi_r = \Omega I = \frac{\Phi_{\text{vyz}}\rho^2}{4d^2}$$

$$\text{Výsledek: } \Phi_r = \frac{100 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1} \text{ W} = 0.1 \text{ mW.}$$

## Example (Černé těleso)

Kulové černé těleso poloměru  $r = 1$  m a teploty  $T = 1\,000$  K je sledováno detektorem ze vzdálenosti  $d = 1\,000$  m.

**Detekční systém** vstupní apertura o poloměru  $\rho = 5$  cm  
poloúhel zorného pole  $\zeta = 0.1^\circ$   
účinnost optického systému  $\eta = 50\%$   
 $\lambda_0 = 1\ \mu\text{m}$  s šířkou pásma  $1\%$  ( $\Delta\lambda = 10^{-8}$  m)

**Vypočtete**

- 1 zář  $L_r(\lambda)$  a  $L_r(\nu)$  v rovině detektoru
- 2 energii dopadající na detektor
- 3 počet fotonů dopadajících na detektor za sekundu
- 4 Co se změní, jestliže bude černé těleso mít poloměr 10 m místo 1 m?

# 1. Zář $L_r(\lambda)$ a $L_r(\nu)$ v rovině detektoru

$$L_r(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)}, \quad L_r(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left( e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1 \right)}$$

$$\lambda = 10^{-6} \text{ m},$$

$$\nu = c/\lambda = 2.998 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

$$L_r(\lambda) = 6.74 \times 10^7 \text{ W m}^{-3} \text{ sr}^{-1},$$

$$L_r(\nu) = 2.25 \times 10^{-13} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

## 2. Energie dopadající na detektor

$$Q_r = S_z \Omega T_O L_r(\lambda) \Delta \lambda$$

$$= S_z \Omega T_O L_r(\nu) \Delta \nu$$

$$T_O = 0.5$$

$$\Delta \lambda = 10^{-8} \text{ m}$$

$$\Delta \nu = 2.998 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

$$S < S_z \Rightarrow S$$

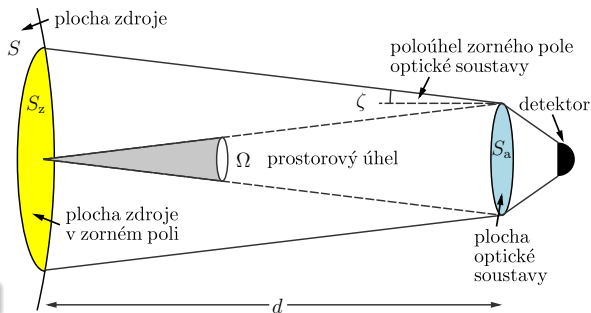
$$Q_r = 8.29 \times 10^{-9} \text{ J}$$

$$S_a = \pi r^2 = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Omega = S_a / d^2 = 7.85 \times 10^{-9} \text{ sr}$$

$$S = \pi R^2 = 3.14 \text{ m}^2$$

$$S_z = \pi d^2 \tan^2 \zeta = 9.57 \text{ m}^2$$



### 3. Počet fotonů dopadajících na detektor za sekundu

$$\Phi_P = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad E_{1\mu\text{m}} = 1.99 \times 10^{-19} \text{ J}$$
$$\rightarrow 4.17 \times 10^{10} \text{ fotonů/s}$$

### 4. Černé těleso poloměru 10 m

$$S = 314 \text{ m}^2, S_z = 9.57 \text{ m}^2, S_z < S \Rightarrow S_z$$

- $L_r$  se nezmění
- $\Phi_r = 2.53 \times 10^{-8} \text{ W}$
- $1.27 \times 10^{11} \text{ fotonů/s}$

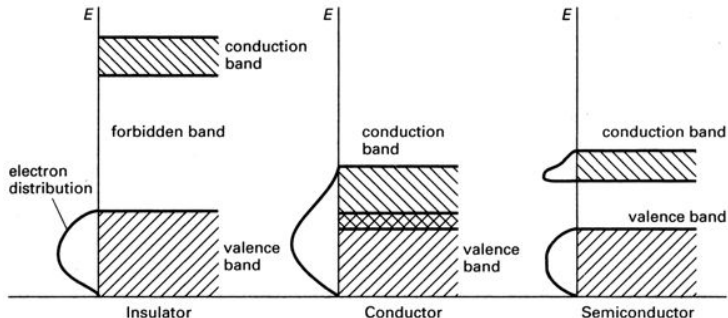
# Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
- 3 Zákony vyzařování
- 4 Polovodiče**
  - Vlastnosti polovodičů
  - Polovodičové slitiny
- 5 Základní obecné vlastnosti detektoru

# Polovodiče

## Energetické pásy

- energetické hladiny atomů v mřížce určují hladiny materiálu
- energetické hladiny združené do pásů – **vodivostní** a **valenční**, mezi nimi **pás zakázaných energií** s šířkou  $E_g$
- polovodič – mezičlánek mezi vodiči a izolanty





# Nosiče náboje

při 0 K – izolant, vodivost vzrůstá s počtem volných nosičů

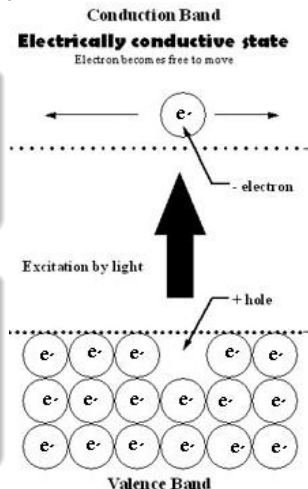
## Volné nosiče náboje

elektron – ve vodivostním pásu

díra – (absence elektronu) ve valenčním pásu

excitace – vznik elektron-děrového páru  
vnějším zdrojem (absorpce  
fotonu, teplo, vnější el. napětí)

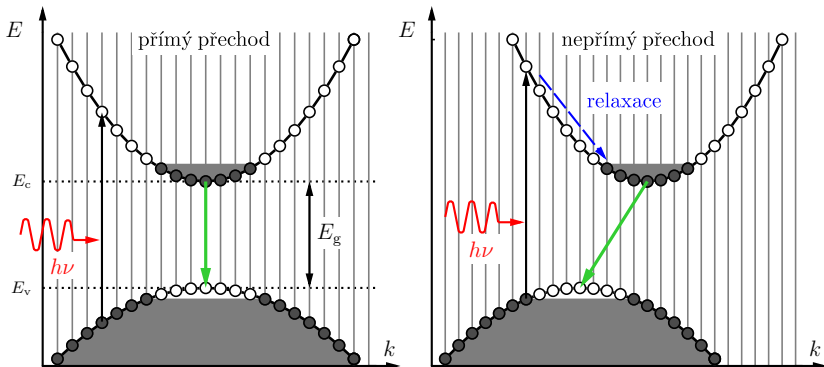
rekombinace – anihilace elektronu a díry  
(vyzáření fotonu nebo tepla)



# Přímý a nepřímý přechod

**Přímý** excitace a rekombinace bez změny hybnosti  $hk \rightarrow$  vhodný materiál pro zdroje záření

**Nepřímý** u rekombinace nutná změna hybnosti  $\rightarrow$  detektory



# Polovodičové slitiny

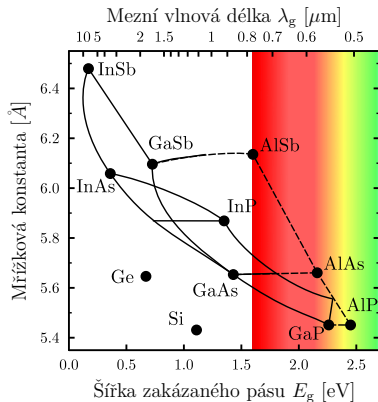
Elementární IV skupina, nejčastěji Si a Ge, nepřímý přechod

Binární III+V (GaAs) nebo II+VI (CdTe)

Ternární 2xIII+V nebo III+2xV, ladění mřížkové konstanty

Kvaternární 2xIII+2xV, více stupňů volnosti

	II	III	IV	V	VI
2		5 B	6 C	7 N	8 O
3	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S
4	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
5	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
6	80 Hg		82 Pb	Plyn	
				Kapalina	
				Pevná látka	

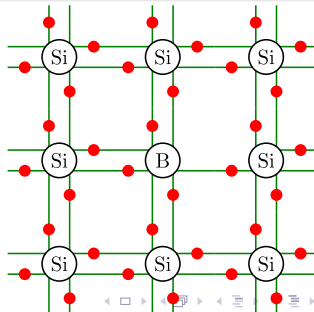
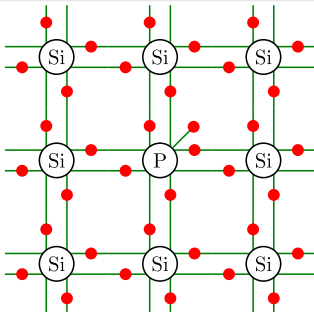


# Dopanty

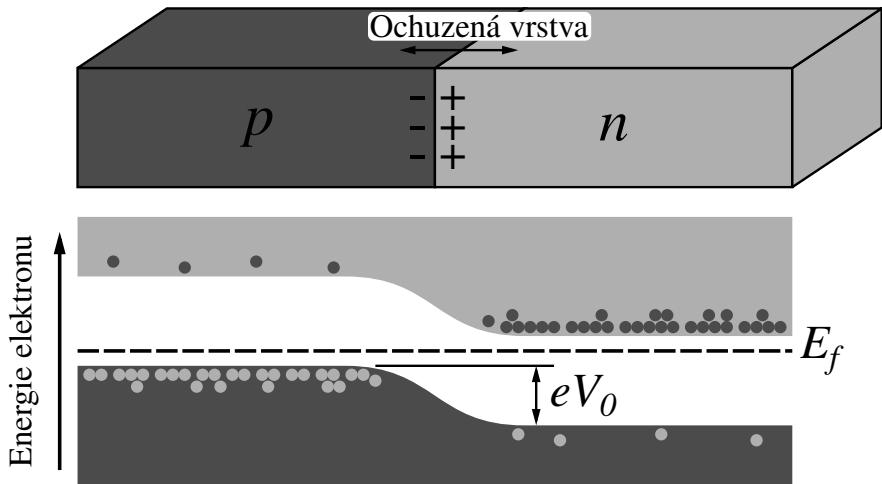
## Intrinsický vs. Extrinsický polovodič

- polovodič bez resp. s příměsí – dopantem
- Dopant – malá příměs atomů polovodiče ze skupin III nebo V do polovodiče ze skupiny IV

Donor příměs z V, přebytek volných elektronů, **n-typ**  
Akceptor příměs z III, přebytek volných děr, **p-typ**

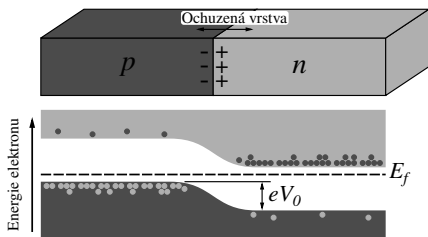


# Heterostruktury



# *p-n* dioda

- *p-n* dioda usměrňuje elektrický proud
- injekce minoritních nosičů (+ na p-ty) –  $i \approx \exp(V)$
- injekce majoritních nosičů (– na p-ty) – závěrné napětí, malý ustálený proud
- p-i-n dioda – širší ochuzená oblast
- heteropřechod – např. p-p-n, skoky v potenciální energii – bariéry nebo jámy (nárazová ionizace)
- materiál s velkou  $E_g$  – transparentní pro světlo (okénko)



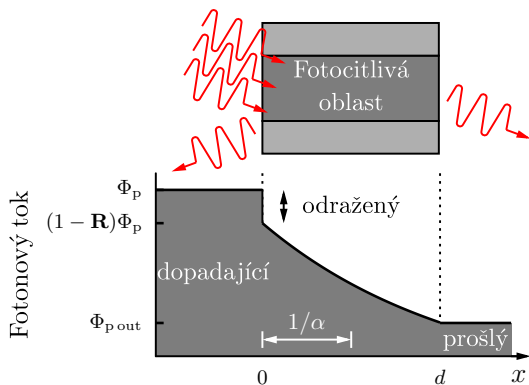
# Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
- 3 Zákony vyzařování
- 4 Polovodiče
- 5 Základní obecné vlastnosti detektoru**
  - Kvantová účinnost
  - Citlivost
  - Časový průběh výstupního proudu z detektoru

Kvantová účinnost  $\eta$ 

## Quantum efficiency

Pravděpodobnost, že jeden foton dá vzniknout nosiči náboje, který přispěje k proudu v detektoru.



$$\eta = (1 - R)\xi(1 - e^{-\alpha d})$$

- $0 \leq \eta \leq 1$

**R** – odrazivost

$\xi$  – podíl nosičů, které přispívají k proudu detektorem

$\alpha$  – absorpční koeficient

$d$  – tloušťka materiálu



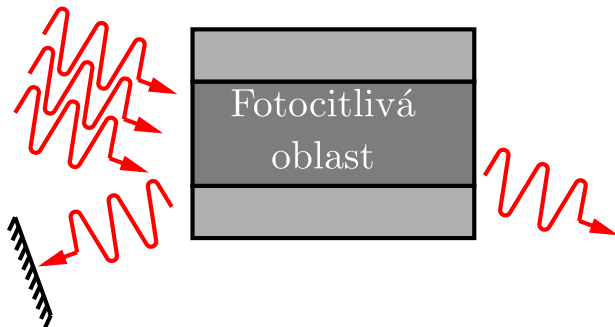
# Odrazivost **R**

Fresnelovy rovnice (kolmý dopad): 
$$\mathbf{R} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

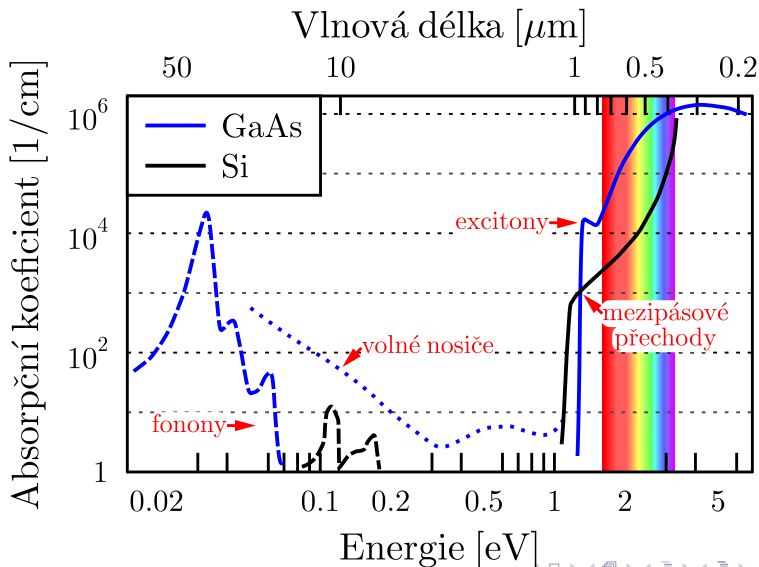
- antireflexní vrstvy
- konfigurace optické pasti
- odraz od zadní strany

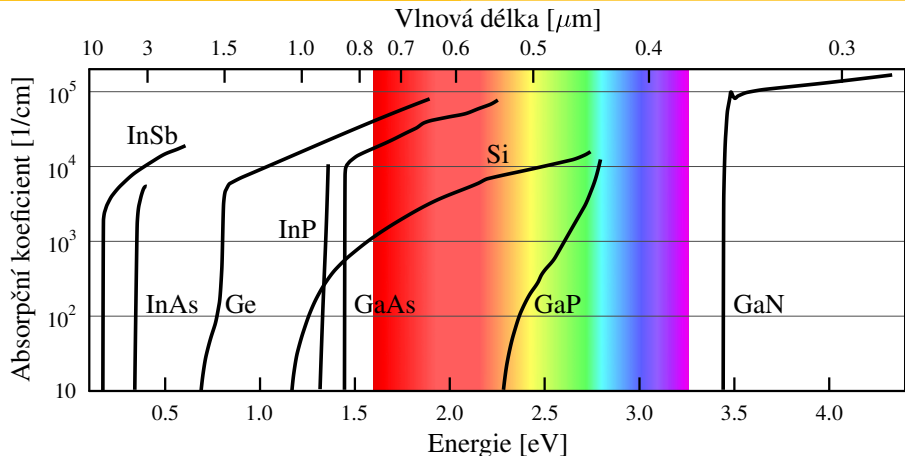
Example (Křemík Si)

$$n = 3.5 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{R} \approx 0.309$$



# Různé absorpční procesy





Spektrální závislost  $\eta(\lambda)$ : dlouhovlnný limit  $\lambda_g = hc/E_g$

Example (Křemík Si)

$\lambda = 830 \text{ nm}$ ,  $d = 20 \mu\text{m}$ ,  $n = 3.5$ ,  $\alpha(830 \text{ nm}) = 1\,000 \text{ cm}^{-1}$ .

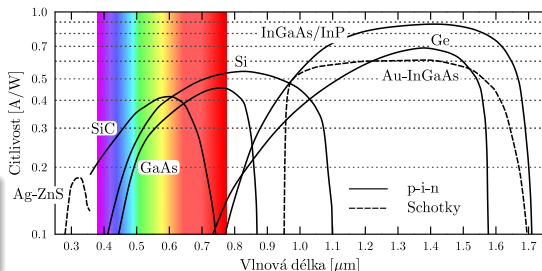
$\eta \approx (1 - 0.309)\xi(1 - 0.135) \approx 0.6\xi$

Citlivost  $\mathcal{R}$ *Responsivity*

Poměr elektrického proudu v obvodu detektoru  $I$  ku intenzitě dopadajícího světla  $\Phi_r$ .

$$I = \eta e \Phi_p = \frac{\eta e \Phi_r}{h\nu} = \mathcal{R} \Phi_r$$

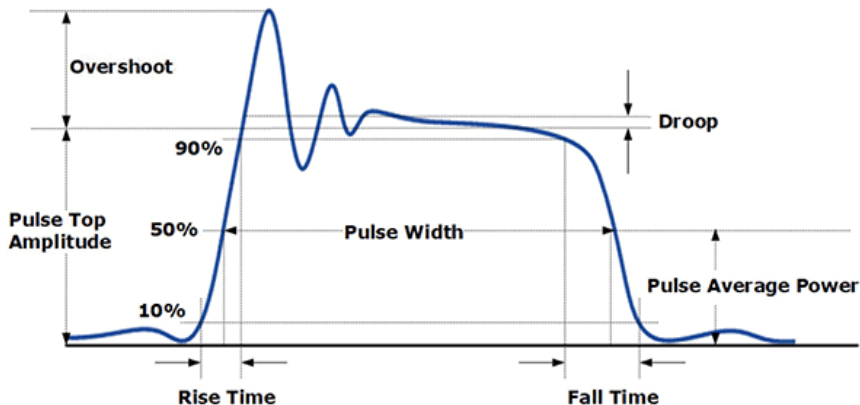
$$\mathcal{R} = \frac{\eta e}{h\nu} = \eta \frac{\lambda [\mu\text{m}]}{1.24} [\text{A/W}]$$



Pro velká  $\lambda$  pokles  $\mathcal{R}$  kvůli  $\eta(\lambda)$ , pro velké intenzity  $\rightarrow$  saturace

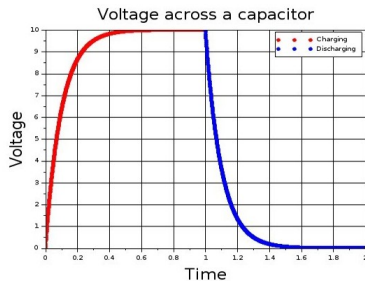
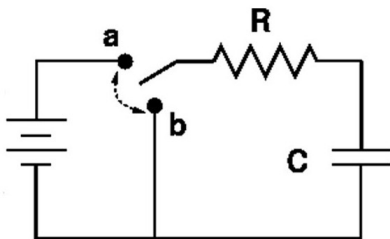
Detektory s vnitřním ziskem  $G = \frac{q}{e} \rightarrow \mathcal{R} = \frac{G\eta e}{h\nu} = G\eta \frac{\lambda [\mu\text{m}]}{1.24}$

# Časový průběh výstupního proudu z detektoru

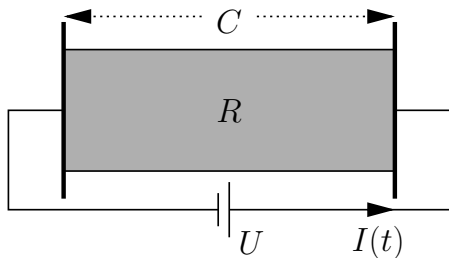
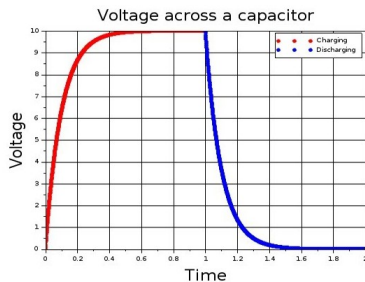
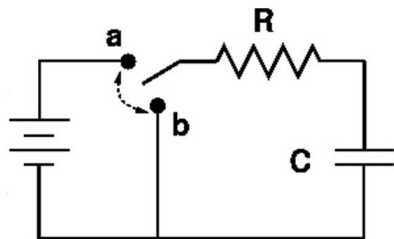


- náběžná hrana  $t_r$
- úběžná hrana  $t_f$
- doba průchodu
- rozšíření doby průchodu
- nejistota času vzniku pulzu
- ...

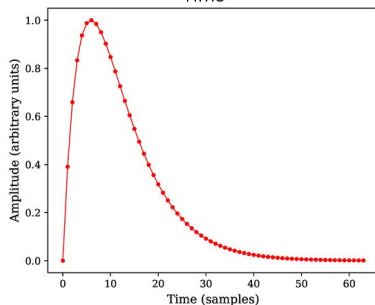
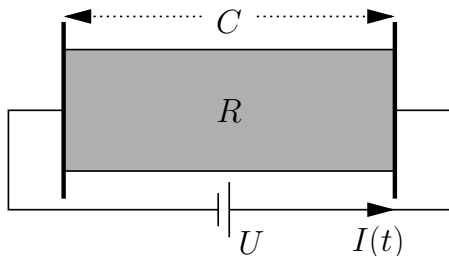
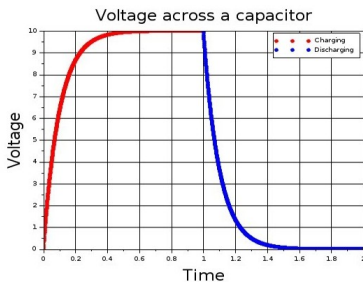
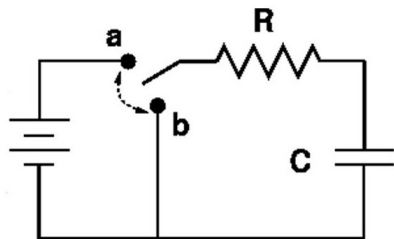
# $RC$ konstanta $\tau_{RC} = RC$



# RC konstanta $\tau_{RC} = RC$



# RC konstanta $\tau_{RC} = RC$





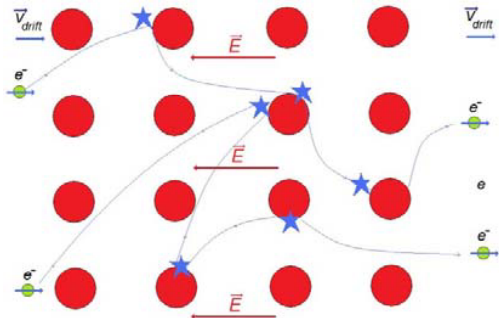
# Driftová rychlost

urychlování el. polem

×

interakce s atomovou mřížkou

$$v = \tau_{col} a = \tau_{col} eE / m_{e,h} = \mu_{e,h} E$$



$a$  zrychlení nosiče náboje,  $a = eE / m_{e,h}$

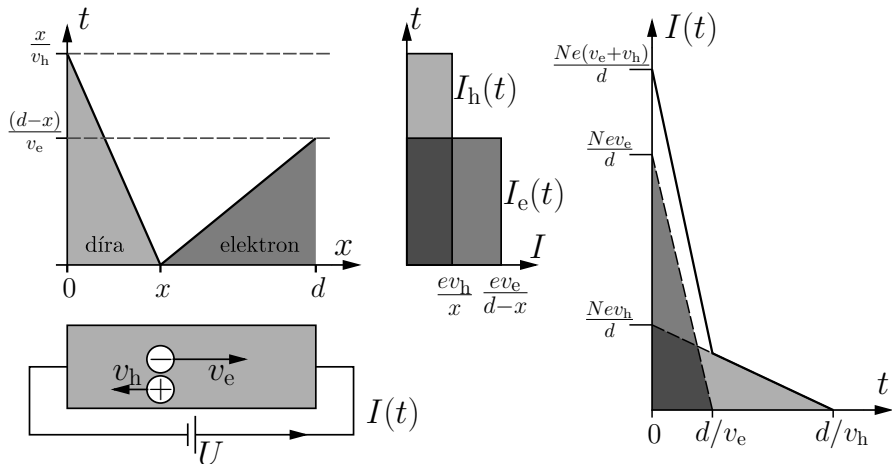
$m_{e,h}$  efektivní hmotnost elektronu resp. díry

$\tau_{col}$  střední doba mezi dvěma kolizemi

$\mu_{e,h}$  pohyblivost elektronu resp. díry

# Doba průchodu nosičů náboje detektorem

Ramoův vztah:  $I(t) = \pm ev(t)/d$ , v polovodičích  $v_e > v_h$



1 foton  $\rightarrow$  přenos náboje 1  $e$

$$Q = I_h t_h + I_e t_e = e \frac{v_h}{d} \frac{x}{v_h} + e \frac{v_e}{d} \frac{d-x}{v_e} = e \left( \frac{x}{d} + \frac{d-x}{d} \right) = e$$

