

Detekce světla

Antonín Černoč Jan Soubusta

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008422

Detekce světla

- 1 Úvod – spektrum, radiometrie, zákony vyzařování, polovodiče, vlastnosti detektorů
- 2 Zdroje světla – rozdělení, lasery, polovodičové zdroje
- 3 Rozdělení typů detektorů světla – oko, fotografie, termální a koherentní detektory
- 4 Vnitřní fotoefekt – fotoodpor, fotodioda
- 5 Šum detektoru – zdroje šumu, SNR, NEP, BER
- 6 Vnější fotoefekt – fotonásobič - konstrukce, vlastnosti, využití
- 7 CCD a CMOS – konstrukce, funkce, vlastnosti, porovnání
- 8 Poziční jednofotonové detektory – EM-CCD, iCCD, intenzifikátory obrazu
- 9 Kvantové detektory – zařízení pro detekci jednotlivých fotonů

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

- 1 Úvod
 - Elektromagnetické spektrum
 - Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
 - Zákony vyzařování
 - Polovodiče
 - Základní obecné vlastnosti detektoru
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Obsah



Úvod

- Elektromagnetické spektrum
 - Oblasti elektromagnetického spektra
 - Informační okna

Oblasti elektromagnetického spektra



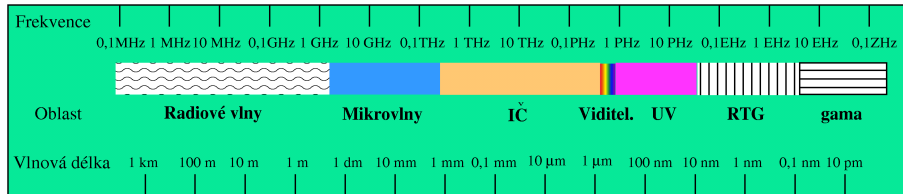
Oblasti elektromagnetického spektra

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 μm , rotační módy molekul a fonony v pevných látkách
- střední IČ – 10-2.5 μm , tepelné záření
- blízká IČ – 2.5-0.75 μm , podobně jako VIS



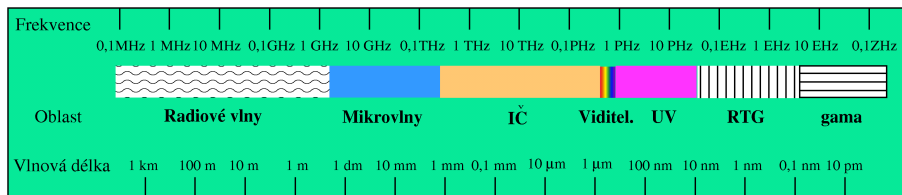
Oblasti elektromagnetického spektra

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

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

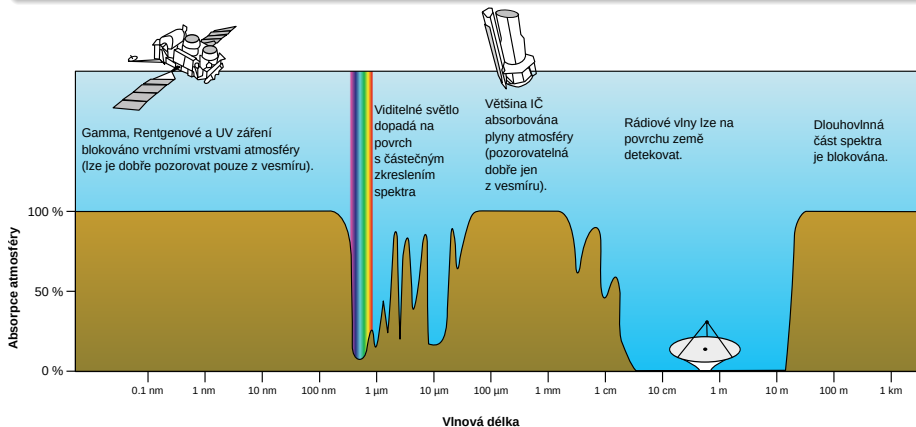
Rentgenová (X) 10-0.01 nm, neutrinové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

Gama (γ) 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)

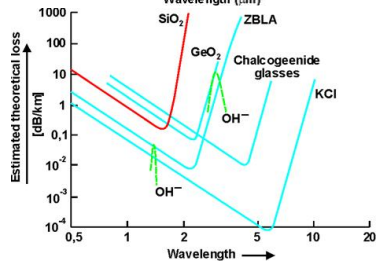
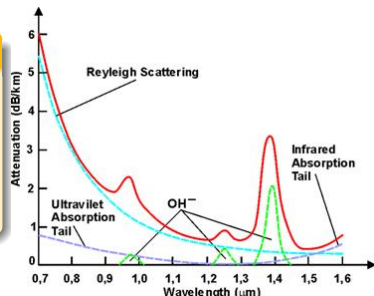
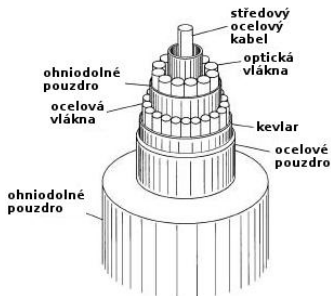
zařízení	f [MHz]	λ [m]
IrDA	333 000 000	0.000 000 9
Wifi	5 000	0.06
Bluetooth	2 400	0.12
GSM	1 800	0.17
	900	0.33
digi TV	500	0.6
analog TV & FM	100	3
AM	1	300



Přenos informace v optickém vlákně

Informační okna

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

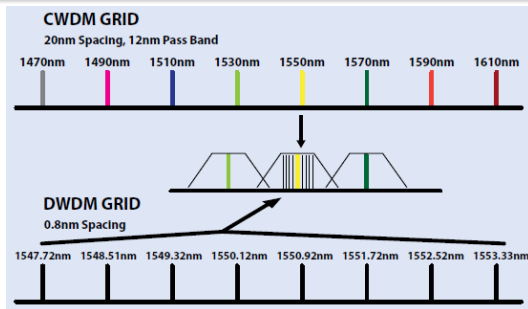
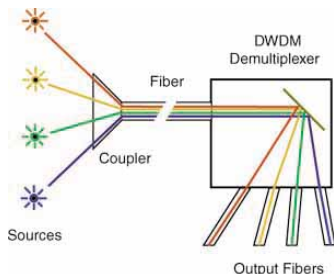


Multiplexace – navýšení přenosové kapacity

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 Úvod

- Radiometrické, fotometrické a fotonové veličiny
 - Pojmy
 - Veličiny

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

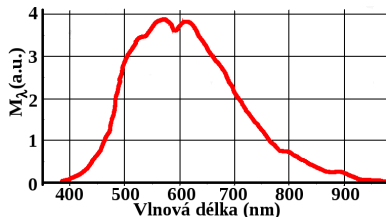
Example (Energie jednoho fotonu)

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

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

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

- veličiny jsou závislé na frekvenci ν resp. vlnové délce λ
- spektrální průběh veličiny (spojité, čárové)
- přeintegrování 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

Velichiny popisující zdroje světla 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 [lm s]

Quantity of light

Počet fotonů – N [1]

Number of photons

Hustota zářivé energie – w_r [J/m^3]

Radiant energy density

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



Veličiny popisující zdroje světla 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 – Φ_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 popisující zdroje světla III

Zářivost – $I_r = \frac{d\Phi_r}{d\omega}$ [W sr⁻¹]

Radiant intensity

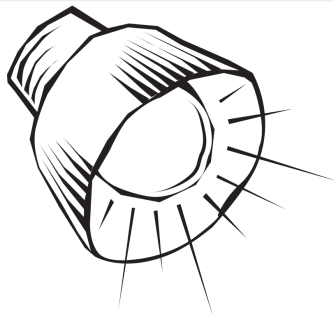
- zářivý tok emitovaný do jednotkového prostorového úhlu

Svítivost – $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega}$ [cd = lm sr⁻¹]

Luminous intensity

Fotonová zářivost – I_p [s⁻¹ sr⁻¹]

Photon intensity



Veličiny popisující zdroje světla IV

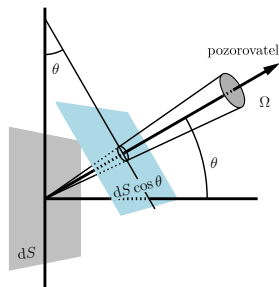
$$\text{Zář} - L_r = \frac{I_r}{dS \cos \theta} \quad [\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}] \quad \text{Radiance}$$

- zářivost jednotkového povrchu viděného pod úhlem θ

$$\text{Jas} - L_v = \frac{I_v}{dS \cos \theta} \quad [\text{nt} = \text{cd m}^{-2}] \quad \text{Luminance}$$

$$\text{Fotonová zář} - L_p \quad [\text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-2}]$$

Photon radiance



Example (Zdroje jasu v nitech)

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

Veličiny popisující dopad světla na předmět I

Ozářenost – $E_r = \frac{d\Phi_r}{dS}$, [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 popisující dopad světla na předmět II

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

Radiance exposure

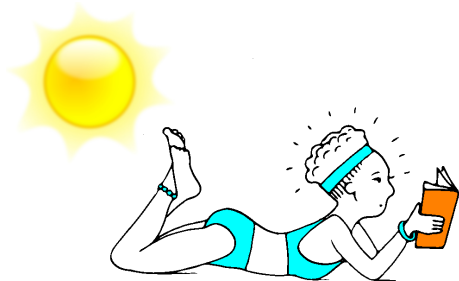
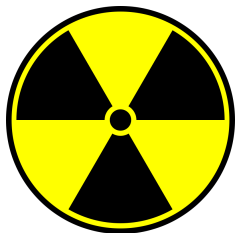
- ozáření jednotkové plochy za daný časový interval
- expozice

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

Úvod

- Zákony vyzařování
 - Historický vývoj
 - Mezi zdrojem a detektorem
 - Příklad

Pojmy

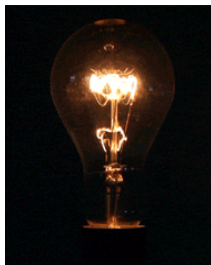
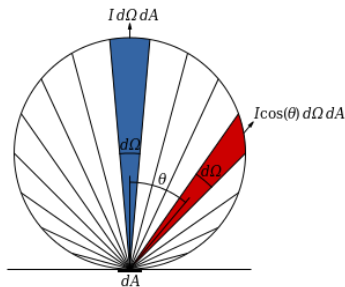
Lambertovský (kosinový) zářič

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

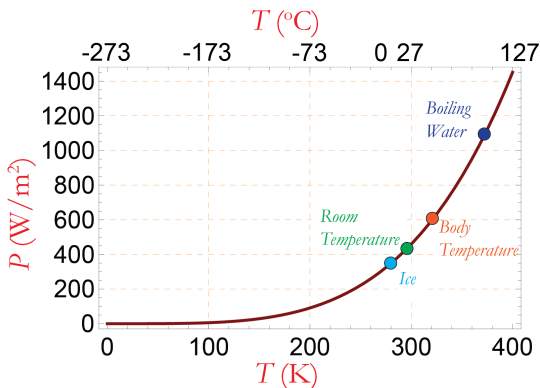
- Gustav Kirchhoff
- absorbuje veškeré dopadající elektromagnetické záření
- vyzařuje na různých vlnových délkách podle teploty
- šedé těleso, selektivní zářič



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?

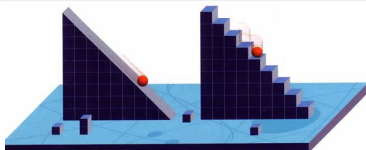
Rayleighův-Jeansův zákon – $M_r(\lambda) = \frac{2\pi^3 ck_B T}{\lambda^4}$,

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

- roku 1900 Lord Rayleigh odvodil z klasického popisu závislost λ^{-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

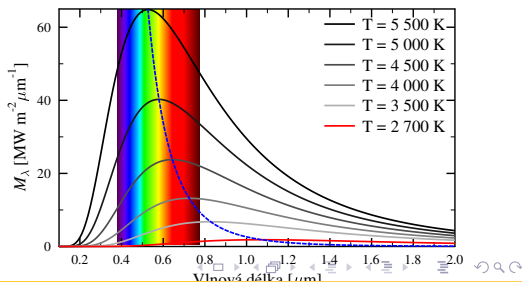
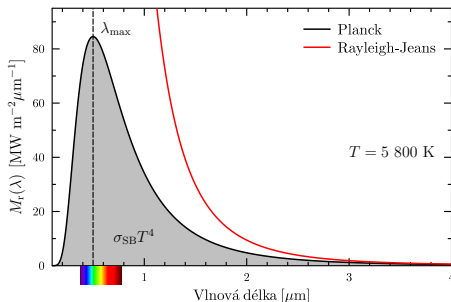


Spektrální intenzita vyzařování černého tělesa

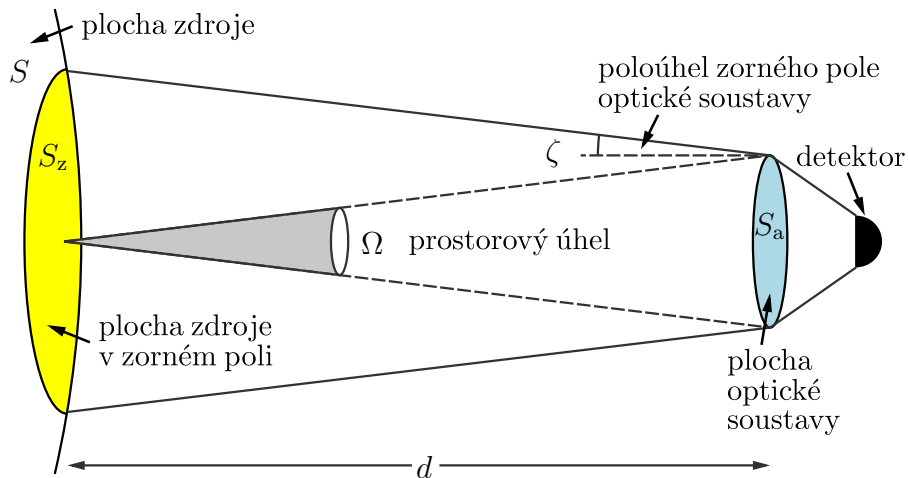
$$M_r(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

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

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



Geometrie



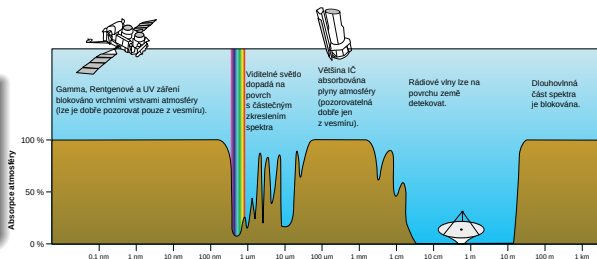
Spektrální propustnost

Propustnost

$T_P(\lambda)$ prostředí

$T_O(\lambda)$ optické soustavy

$T_F(\lambda)$ filtrů

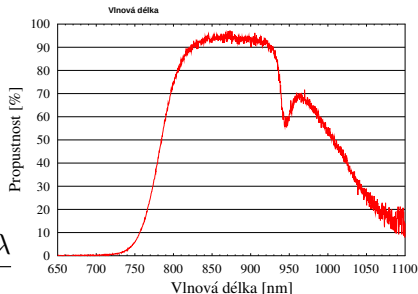


Optický výkon na detektoru:

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

úzká oblast spektra $\Delta\lambda$ okolo λ_0

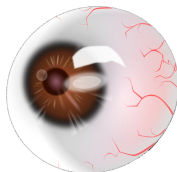
$$\Phi_r \approx \frac{S_z S_a T_P(\lambda_0) T_O(\lambda_0) T_F(\lambda_0) L_r(\lambda_0) \Delta\lambda}{d^2}$$



Example (Žárovka)

Vypočtěte optický výkon Φ_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

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

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

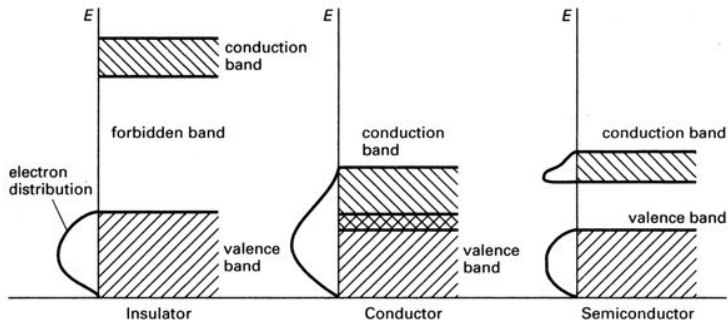
Obsah

- 1 Úvod
 - Polovodiče
 - Vlastnosti polovodičů
 - Polovodičové slitiny

Polovodiče

Vlastnosti polovodičů

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



Nosiče náboje

Volné nosiče náboje

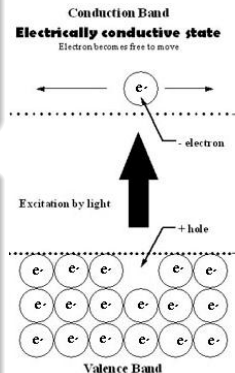
elektron – ve vodivostním pásu

díra – (absence elektronu) ve valenčním pásu

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

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

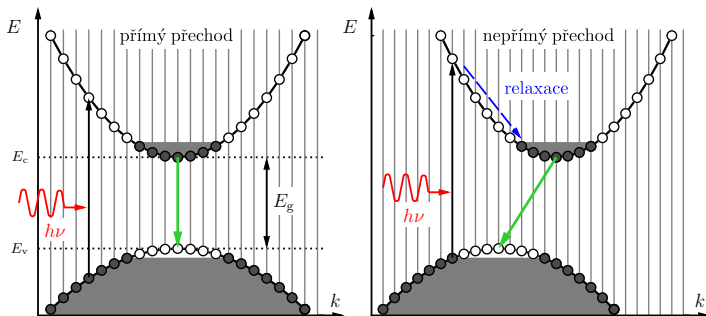
při 0 K – izolant,
vodivost vzrůstá s počtem volných nosičů



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 materiály a slitiny

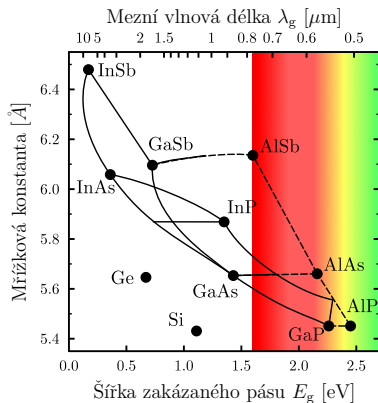
Elementární IV skupina, nejčastěji Si a Ge, nepřímý přechod

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 Kapalína Pevná látka	

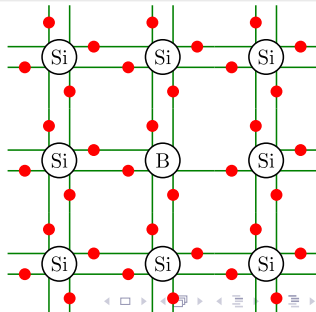
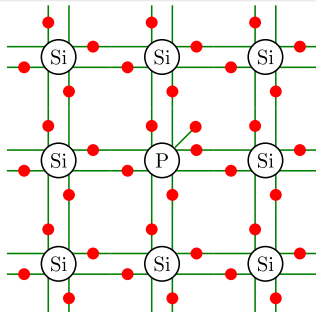


Dopanty

Intrinsický vs. Extrinsický polovodič

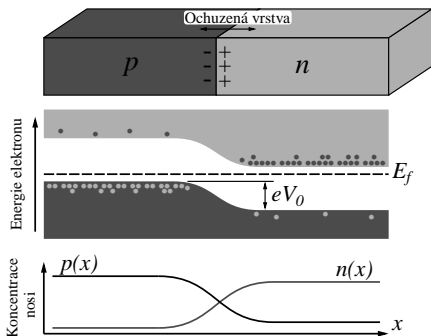
- polovodič bez resp. s příměsí – dopantem
- Dopant – malá příměs atomů polovodiče ze skupin III nebo V do polovodiče ze skupiny IV

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



Heterostruktury

- **p-n dioda** 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

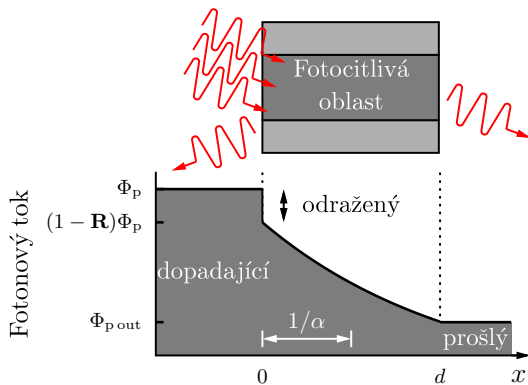
Úvod

- Základní obecné vlastnosti detektoru
 - Kvantová účinnost
 - Citlivost
 - Doba odezvy
 - Další parametry detektoru

Kvantová účinnost η

Quantum efficiency

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



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

- $0 \leq \eta \leq 1$

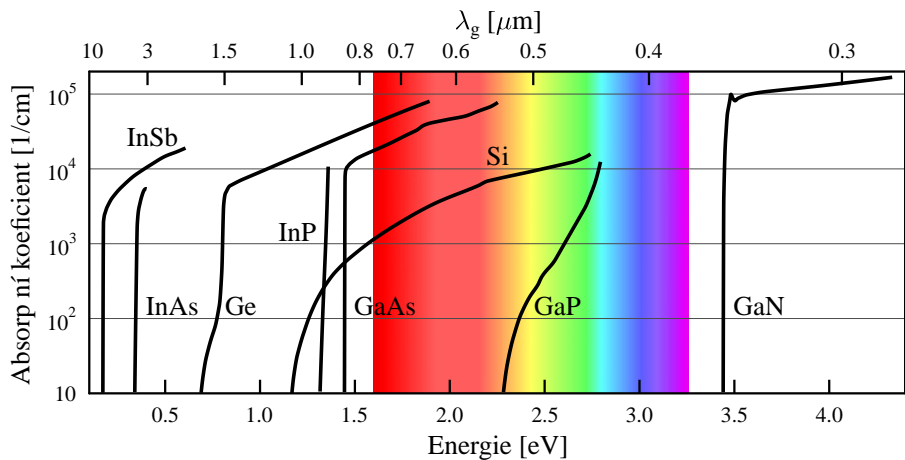
R – odrazivost

ξ – podíl nosičů, které přispívají k proudu detektorem

α – absorpční koeficient

d – tloušťka materiálu

Absorbční koeficienty různých materiálů



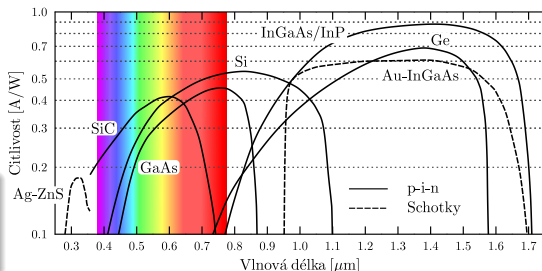
Citlivost \mathcal{R}

Responsivity

Poměr elektrického proudu v obvodu detektoru I ku intenzitě dopadajícího světla Φ_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 λ pokles \mathcal{R} kvůli $\eta(\lambda)$, pro velké intenzity \rightarrow saturace

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

Doba odezvy

Response time

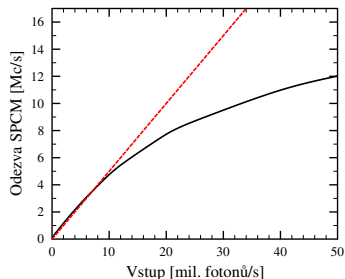
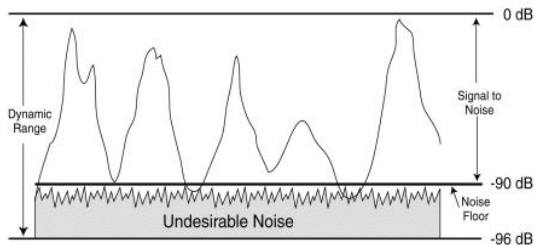
Časový průběh výstupního proudu z detektoru

- Rozšíření doby průchodu *TTS* (*Transition Time Spread*)
- Driftová rychlost – urychlování el. polem \times nárazy v atomové mřížce
- *RC* konstanta – prodloužení doby odezvy, odpor R a kapacitance C obvodu detektoru, $\tau_{RC} = RC$

SNR Poměr signálu k šumu (*Signal to noise ratio*),
oscilace výstupního signálu (ideálně jen statistické
fluktuace vstupních fotonů)

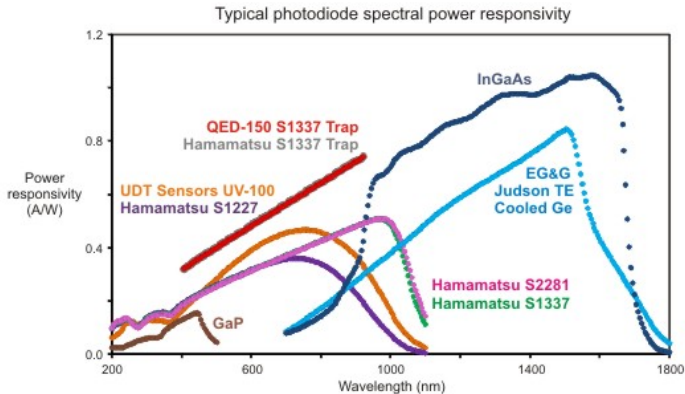
Dynamický rozsah (*Dynamical range*), též spektrální šířka pásma,
poměr mezi minimální a maximální intenzitou
signálu, kterou lze změřit beze ztráty informace

Linearita (*Linearity*), odchylka od lineární závislosti mezi
vstupem a výstupem



Spektrální odezva (*Spectral response*), závislost na vlnové délce dopadajícího záření

Šířka pásma (*Spectral range*) rozsah vlnových délek, pro které má detektor nenulovou citlivost, maximum citlivosti pro λ_p



- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla**
 - Rozdělení zdrojů světla
 - Lasery
 - Elektroluminiscence v polovodičích
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Obsah

- 2 Zdroje světla
 - Rozdělení zdrojů světla

Rozdělení zdrojů světla

Záření generované deexcitací vzbuzeného atomového stavu

- 1 Tepelné
- 2 Luminiscenční

Záření generované nabitou částicí

- 1 Čerenkovo
- 2 Přejchodové
- 3 Synchrontronové

Anihilace částice a antičástice

elektron + pozitron \rightarrow 2 gama fotony letící opačným směrem

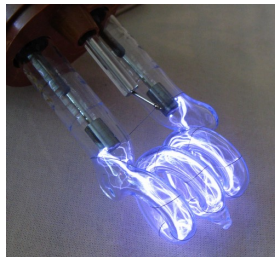
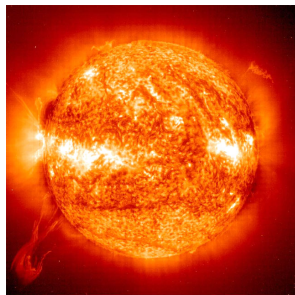
Tepelné zdroje

Tepelná excitace atomů

- vedení tepla (např. Slunce)
- vnějším ohřevem
- elektricky Joulovým teplem (žárovka, oblouková lampa)

záření černého tělesa

Bozeovo-Einsteinovo rozdělení



Luminiscenční zdroje

Fotoluminiscence – kratší λ (zářivky a výbojky)

Radioluminiscence – záření α , β nebo γ , obrazovka

Elektroluminiscence – elektrické pole

Triboluminiscence – mechanické působení (tření, lom)

Chemiluminiscence – chemická reakce

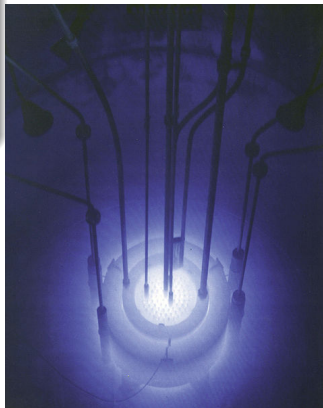
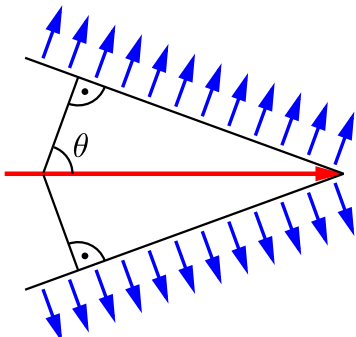
Bioluminiscence – enzymem vyvolaná chem. reakce



Čerenkovo (brzděné) záření

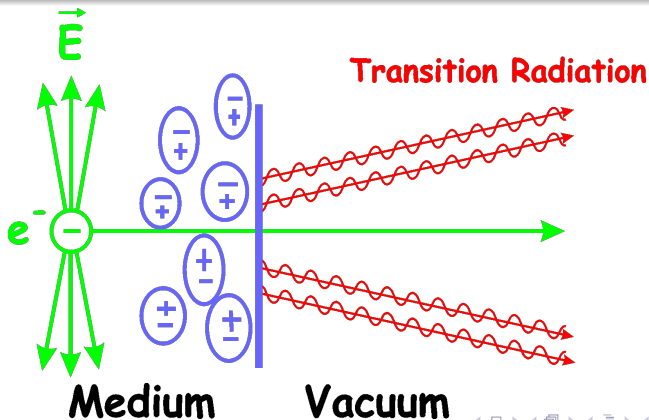
nabitá částice se pohybuje v prostředí o indexu lomu n rychlostí v , která je větší, než je fázová rychlost světla c/n v tomto prostředí

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \quad c/n < v < c$$



Přechodové záření

relativistická nabitá částice prochází rozhraním dvou optických prostředí \rightarrow vázané náboje s proměnným dipólovým momentem \rightarrow zdroj elmag vlny, rychlost částice $\sim \lambda$



Cyklotronové a synchrotronové záření

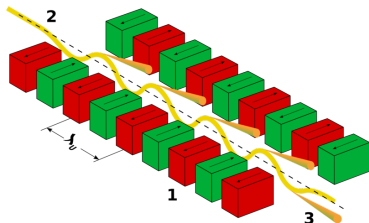
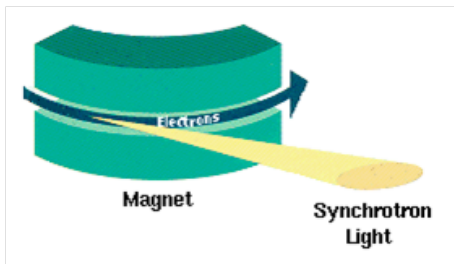
nabitá částice (elektron) na zakřivené dráze vlivem magnetického pole

Cyklotronové záření

nerelativistické e^- , monochromatické v mikrovlnné a radiové oblasti

Synchrotronové záření

relativistické e^- , spojitě záření ve VIS, pro silná magnetická pole až X



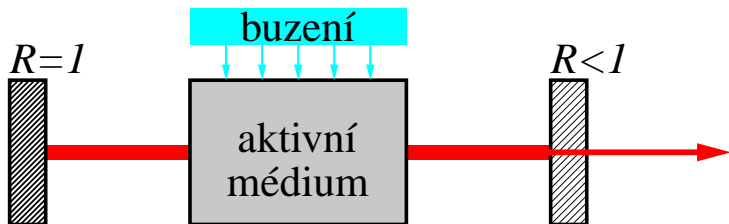
Obsah

2 Zdroje světla

- Lasery

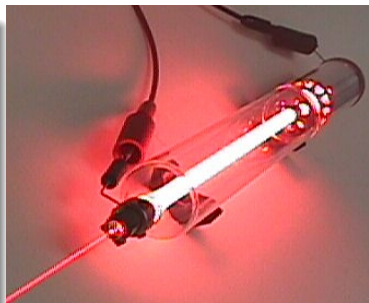
- Princip a vlastnosti
- Pevnolátkové lasery
- Plynové lasery

Princip a vlastnosti



Vlastnosti

- koherentní záření
- Poissonovo statistické rozdělení
- směrovost
- velká hustota výkonu
- spektrální vlastnosti
- kontinuální nebo pulzní (délka pulzu)



Pevnolátkové lasery

Výhody

- poměr výkon/příkon
- velká životnost (10 000 hod)
- menší nároky na údržbu

Nevýhody

- horší kvalita svazku
- rozštěpení hladin → širší emisní čára

Aktivní prostředí

Rubín 694.3 nm (holografie, odstraňování tetování)

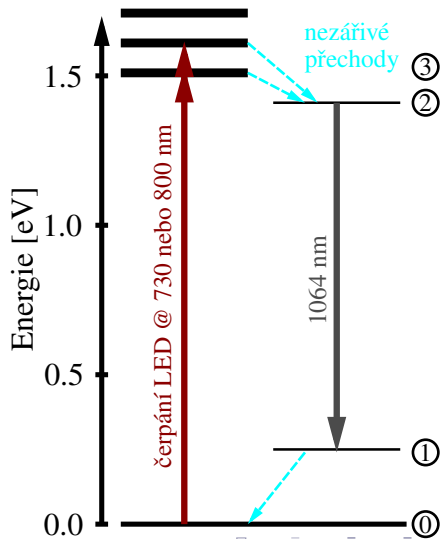
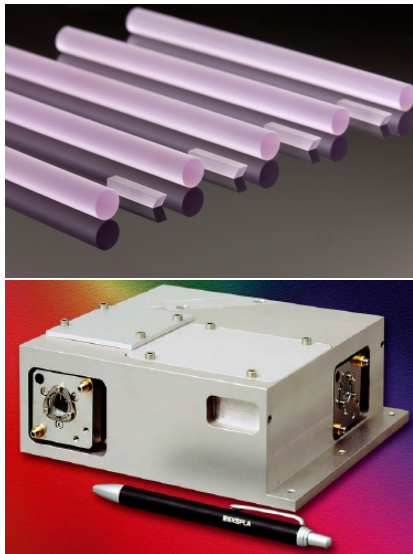
Nd:YAG 1 064 nm (litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie)

Ti:Safír 700 - 1 050 nm (spektroskopie s časovým rozlišením)

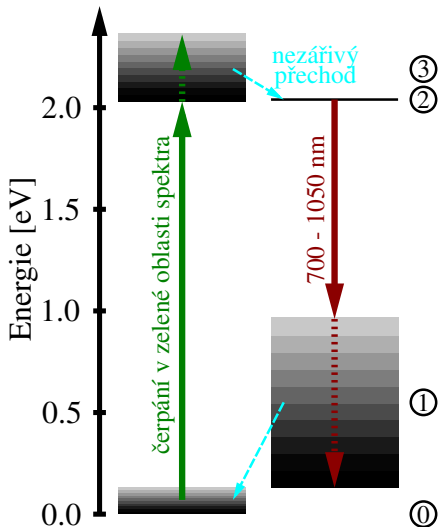
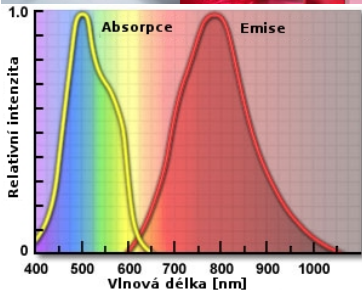
Vyšší harmonické (2., 3., 4.)

nelineární proces, konverze na $k\omega_p$ tedy λ_p/k , kde $k = 2, 3, 4$

Nd:YAG laser



Titan-safírový laser

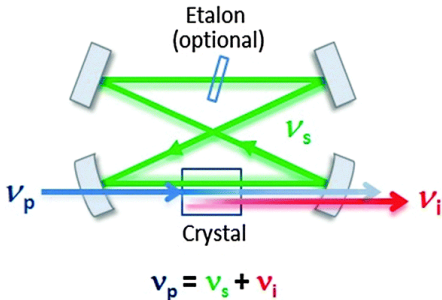
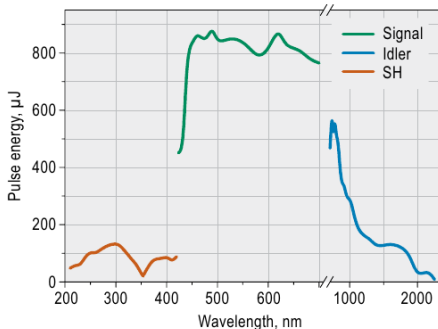


Optický parametrický oscilátor (OPO)

Vzestupná frekvenční konverze

nelineární proces: $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ $\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}$

EKSPLA PG411-SH



Plynové lasery I

Výhody

- úzké čáry podle vzdálenosti hladin aktivního plynu
- kvalita svazku

Nevýhody

- malá účinnost (chlazení)
- větší nároky na údržbu
- menší životnost

Atomární

He-Ne 543 nm, 633 nm (zaměřování polohy, spektroskopie)

Cu 510 nm, 578 nm (podmořská komunikace a lokace)

I 342 nm, 612 nm, 1 315 nm (věda, termojaderná fúze)

Xe, Ne, He 140 vlnových délek ve VIS a IČ

Plynové lasery II

Iontové

Ar⁺ 488 nm, 514 nm (oftalmologie, spektroskopie)

Kr⁺ 16 čar od 345 po 800 nm

He-Cd 325 nm, 442 nm (spektroskopie)

Molekulární

H₂ 100 - 120 nm, 140 - 165 nm

CO₂ 10.6 μm (sváření, řezání, stomatologie, gravírování)

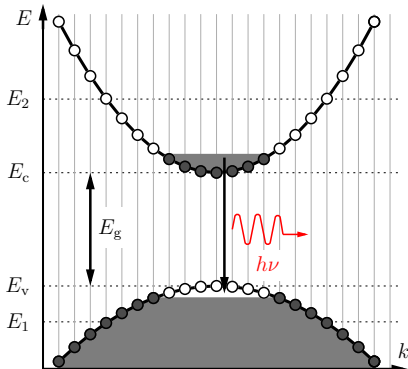


Obsah

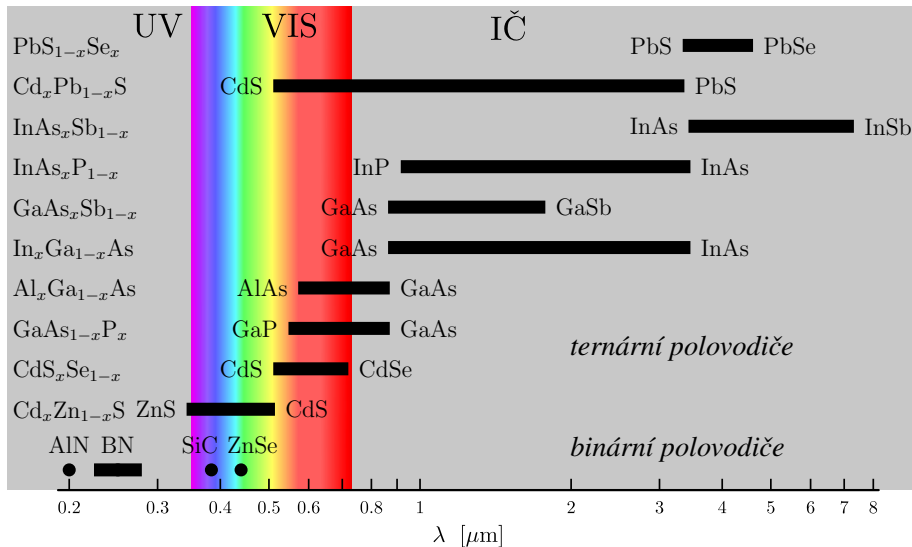
- 2 Zdroje světla
 - Elektroluminiscence v polovodičích
 - Princip elektroluminiscence
 - Polovodičové zdroje

Princip elektroluminiscence

- elektron-děrová rekombinace
 - injekce minoritních nosičů do p-n přechodu
 - dlouhovlnný limit $\lambda_g = hc/E_g$
 - interní η_i a externí η_e kvantová účinnost
- přímý zak. pás – GaAs $\eta_i \sim 0.5$
 nepřímý zak. pás – Si $\eta_i \sim 10^{-5}$



Materiály



LED

Light emitting diode

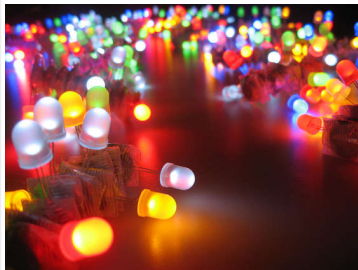
Luminiscenční dioda

$$\Phi_r = \eta_e \eta_i I / e$$

$\eta_e \sim 1 - 5\%$ (absorpce, vnitřní odraz)

$$\Delta\lambda \approx \lambda_g^2 3k_B T / (hc), \quad \lambda_g = hc / E_g$$

plošně a hranově emitující
odezva 1 – 50 ns



NIR

binární (GaAs, GaSb, InP), ternární i kvaternární

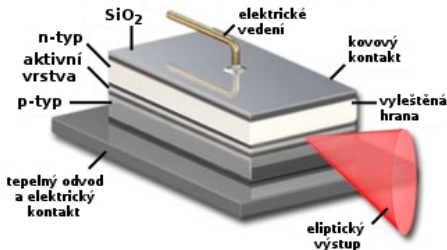
VIS

GaN, GaP, dotování polovodičů (rekombinační centra)

LD – Laserová dioda

Laser diode

- stimulovaná emise podporovaná rezonátorem, $\eta_e > 0.4$
- prahový čerpací proud ve stovkách mA (ke snížení heterostruktury a pot. jámy)
- rezonátor vytvořen štípáním polovodiče podél krystalových ploch
- příčné módy omezeny vlnovodnou strukturou nebo vnějším rez.
- výstupní svazek s asymetrickou divergencí (válcové čočky)



Materiály pro LD

GaAs	650 a 840 nm	ukazovátka, tiskárny
GaAlAs	670 - 830 nm	CD mechanika
AlGaInP	650 nm	DVD mechanika
GaN	405 nm	Blu-ray mechanika
InGaAlP	630 - 685 nm	lékařství



- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů**
 - Fotonové detektory
 - Termální detektory
 - Koherentní detektory
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

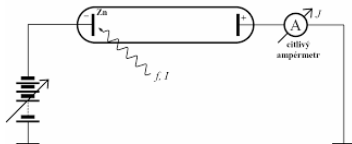
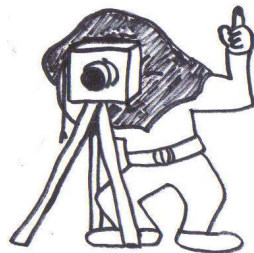
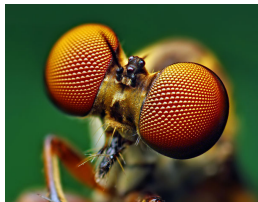
Obsah

- 3 Rozdělení detektorů
 - Fotonové detektory
 - Fotoefekt
 - Lidské oko
 - Analogová fotografie

Fotonové detektory

reakce přímo na jednotlivé fotony \rightarrow excitace nosiče náboje \rightarrow chemická reakce nebo změna elektrického proudu nebo jen znásobení počtu nosičů náboje

- Oko
- Fotografie
- fotoefekt



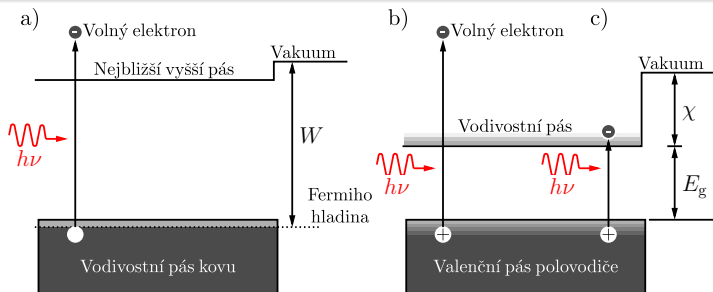
Vnější a vnitřní fotoefekt

fotony excitují nosiče náboje → změna vodivosti materiálu

Vnitřní v polovodiči, excitace elektron-děrového páru, nosiče náboje zůstávají v materiálu, $h\nu > E_g$

Vnější fotoelektronová emise, elektron energií fotonu vytržen do volného prostoru, $h\nu > W$ popř. $h\nu > E_g + \chi$

NEA – negativní elektronová afinita ($\chi < 0$)



Vnější a vnitřní fotoefekt

Vnitřní fotoefekt

Fotoodpor změna vodivosti materiálu s intenzitou dopadajícího záření

Fotodioda excitace elektron-děrových párů v ochuzené oblasti p-n přechodu

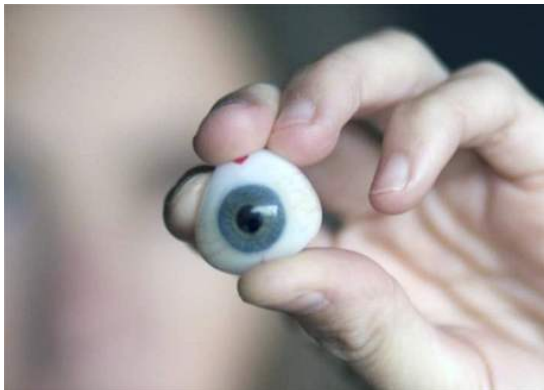
APD lavinová fotodioda, urychlovací napětí → excitace dalších nosičů nárazovou ionizací

Vnější fotoefekt

Fotonka fotokatoda + anoda

Fotonásobič navíc dynody → sekundární emise, zesílení až 10^7

Lidské oko



Proces detekce

dopad fotonu excituje elektron v barvivo světlocitlivé buňky → nervový vzruch

Anatomie oka

Spektrální propustnost

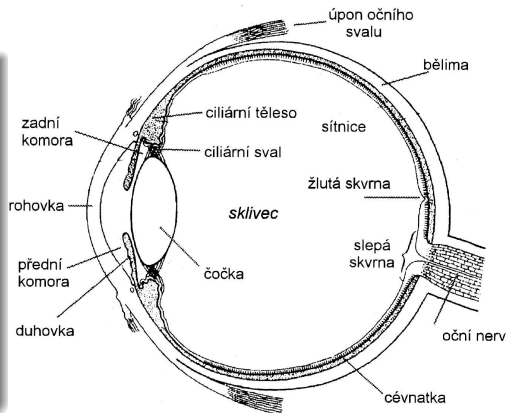
FUV 100 - 315 nm, v rohovce a komorové vodě

SUV 315 - 400 nm, v čočce - přeměna proteinů

VIS 400 - 700 nm, na sítnici

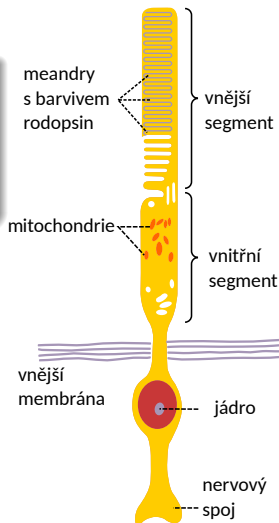
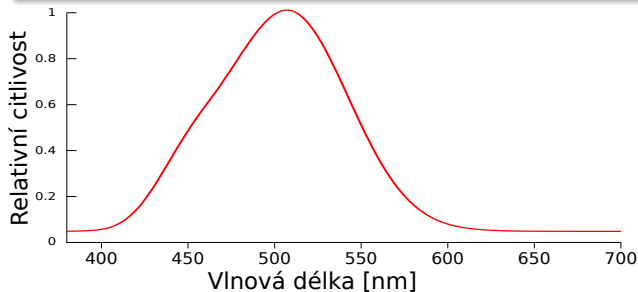
IČ do 1 400 nm, na sítnici
(možné poškození)

ostatní v rohovce

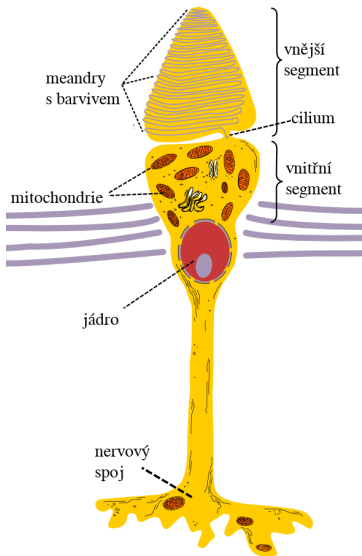


Tyčinky

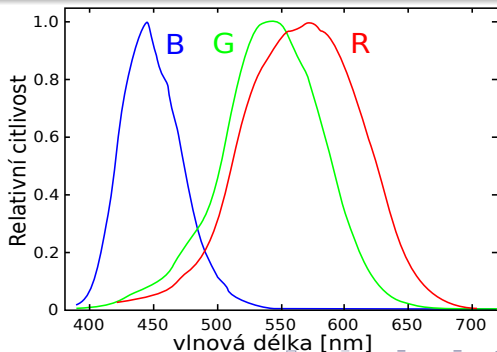
- barvivo rodopsin
- skotopické (černobílé) vidění
- 120 milionů rovnoměrně po sítnici
- neostré vidění za šera



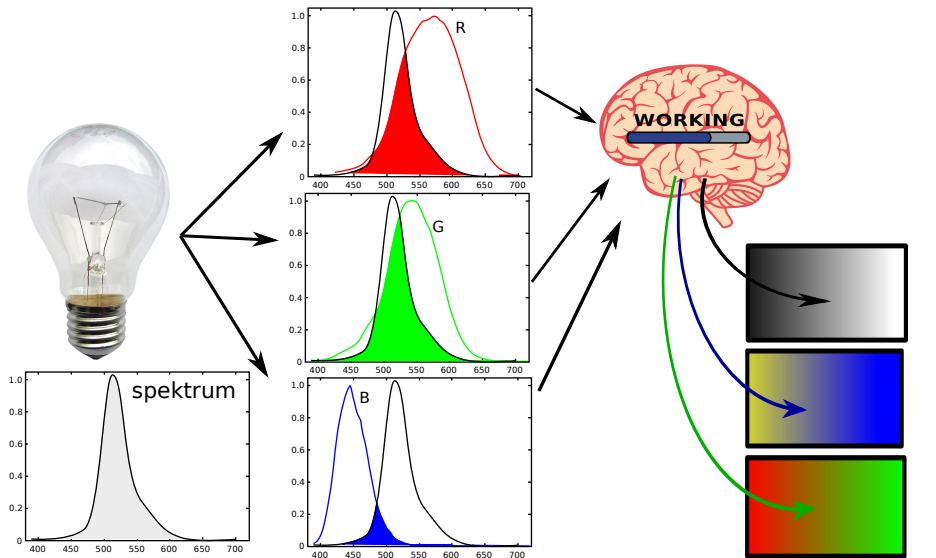
Čípky



- fotonické (barevné) vidění
- barviva **B**, **G** a **R** (1:16:32)
- max. citlivosti na 555 nm
- 7 mil., většina ve žluté skvrně

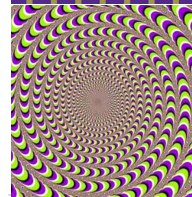
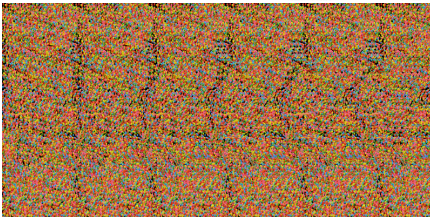
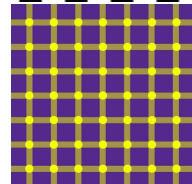
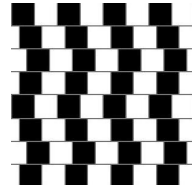
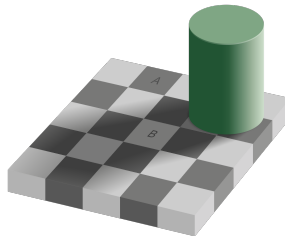
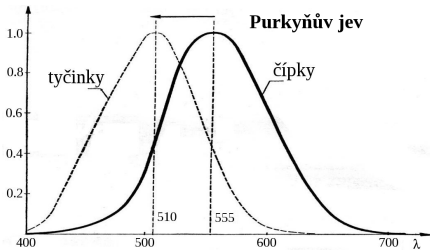


Vnímání barev



Zajímavosti

- subjektivní vjem oka $\sim \log(\Phi)$, 11 řádů v intenzitě
- průměr pupily – 2 mm pro 10 000 lx, 6 mm pro 1 lx



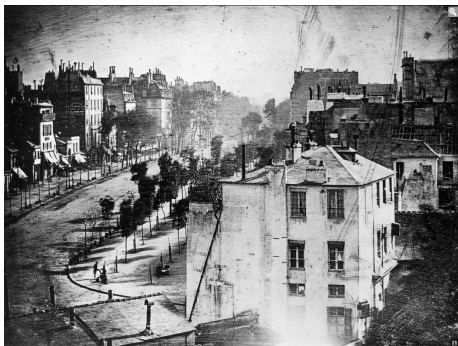
Analogová fotografie

- zčernání chemické sloučeniny po dopadu světla
- po expozici nutná chemická úprava
- 160 let intenzivního vývoje
- levný způsob uchování záznamu
- nepřekonané rozlišení



Luis Daguarre – daguerreotypie

- záznam na leštěné destičce ze stříbra
- příprava v parách jódu, na povrchu vrstva AgI
- několikaminutová expozice v dírkové komoře, kde se AgI redukoval zpět na stříbro v závislosti na osvětlení
- stabilizace - páry rtuti reagují se stříbrem na bílý amalgám
- destička náchylná na poškození
- nešly dělat kopie



„Boulevard du Temple“ z přelomu let 1838 a 1839 v Paříži, expozice 10 minut

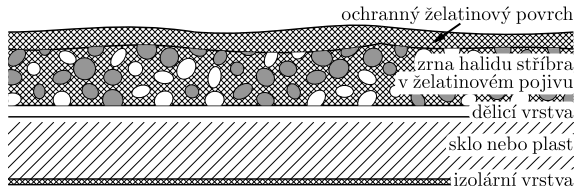
Princip fotografie

Záznam

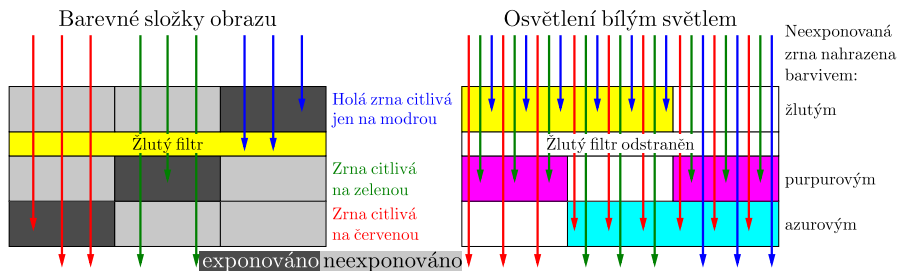
- dopad fotonu na halid stříbra (AgBr , AgCl , AgBrI) \rightarrow volný Ag
- $\text{Ag} + \text{Ag} \rightarrow$ stabilní černé zárodečné centrum Ag_2
- účinnost 1-5 %

Vyvolání

- chemický proces
- redukce AgBr na Ag
- 3Ag katalyzátorem
- zesílení 10^8 - 10^{11}
- odstranění AgBr
- 10-20 fotonů/zrno – 50 % že zčerná
- binární záznam



Barevná fotografie



- zcitlivění zrn barvivou pro detekci delších vlnových délek
- více vrstev pro zvětšení dynamického rozsahu (až $1:10^6$), jednorázové fotoaparáty s fixní závěrkou
- vrstva navíc citlivá na modrou, při vyvolání nahrazena azurovým barvivem, záznam více odpovídá vjemu oka

Obsah

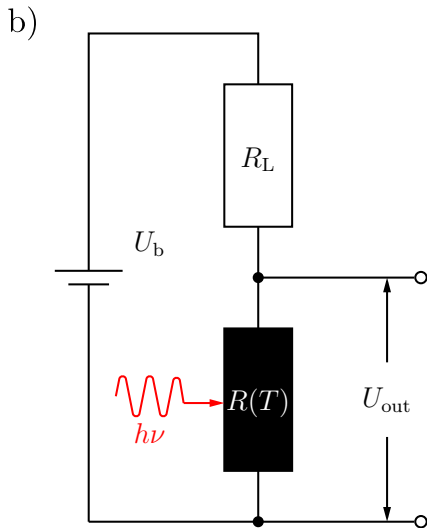
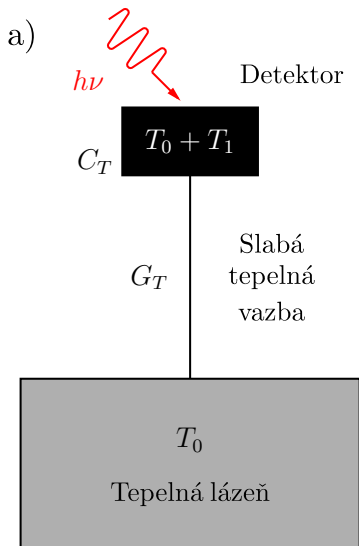
- 3 Rozdělení detektorů
 - Termální detektory

Termální detektory

- absorpce fotonů → změna teploty → změna vlastností materiálu (většinou elektrických)
- pomalá odezva (10^{-3} s)
- velká η od X po IČ
- bolometry a termoelektrický efekt



Princip

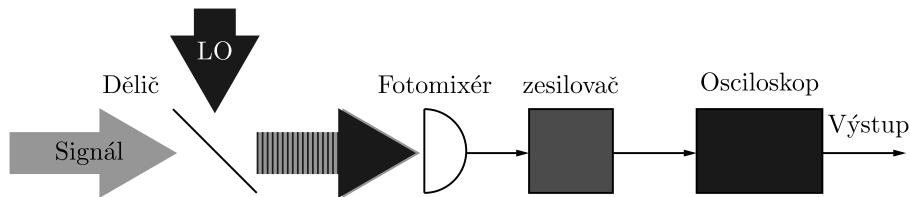


Obsah

- 3 Rozdělení detektorů
 - Koherentní detektory

Koherentní detektory

- reakce na změnu velikosti elektrického pole signálu, možnost určení fáze dopadajících fotonů
- IČ po rádio



Heterodynní detektor

signál a LO mají rozdílnou frekvenci

Homodynní detektor

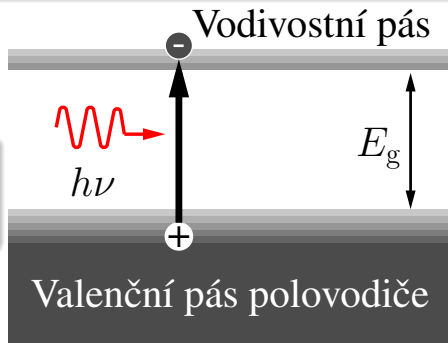
signál a LO mají stejnou frekvenci, měří se rozdíl intenzit na dvou výstupech děliče, určení kvadratur kvantového stavu

- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt**
 - Fotorezistory
 - Fotodiody
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Vnitřní fotoefekt

- detekce v polovodičovém materiálu v oblasti bez volných nosičů proudu (velký odpor)
- dopad fotonu ($h\nu > E_g$) excituje elektron ($-e$) do vodivostního pásu, na jeho místě zůstává díra ($+e$)

změna vodivosti materiálu nebo pohyb nosičů vlivem elektrického pole \rightarrow elektrický proud v obvodu



Obsah

- 4 Vnitřní fotoefekt
 - Fotorezistory
 - Vlastní fotorezistory
 - Nevlastní fotorezistory
 - Heterostruktury

Fotorezistory

Photoconductors

- za tmy počet volných nosičů úměrný teplotě → nenulová vodivost
- dopadající fotonový tok Φ_p → zvýšení vodivosti materiálu σ

Materiál polovodičového detektoru

Vlastní intristické, čistý polovodič bez příměsí, jen mezipásové přechody

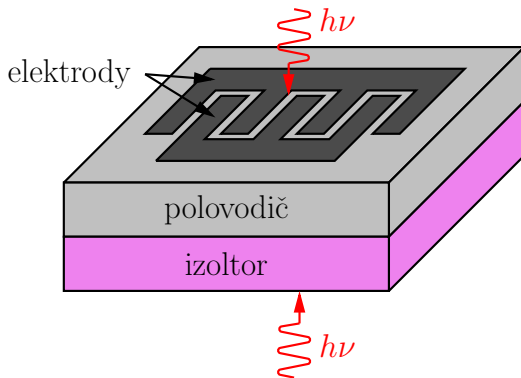
Nevlastní extrinsické, dopovaný polovodič, přechody z donorové nebo akceptorové hladiny

Heterostruktury vrstvy různě dopovaných polovodičů, kvantové bariéry a jámy

Vlastní fotorezistory

Intrinsic photoconductors

- absorpce fotonů jen díky mezipásmovým přechodům, $h\nu > E_g$
- tvar a vzdálenost elektrod – minimalizace doby průchodu
- průhledný substrát osvětlený zezadu, beze ztrát na kontaktech



Zisk G

$$G = \tau / \tau_e \quad \rightarrow \quad I \approx \eta e \Phi_p G$$

$\tau < \tau_e$ – $G < 1$, rekombinace nosičů

$\tau > \tau_e$ – $G > 1$, malá vzdálenost kontaktů (meandry)

Zákon zachování kontinuity proudu

$v_h \ll v_e \rightarrow$ elektron dorazí na kontakt dříve než díra \rightarrow nový elektron z opačného kontaktu, průchod celým polovodičem, opakuje se to dokud rekombinace nebo díra na kontakt

Example (Zisk fotorezistoru)

$d = 1 \text{ mm}$, $v_e = 10^7 \text{ cm/s} \rightarrow \tau_e \approx 10^{-8} \text{ s}$, τ podle materiálu od 10^{-13} s po několik sekund. G od 10^{-5} teoreticky do 10^9 , prakticky ale jen do 10^6 (hustotou proudu, nárazová ionizace a průrazem dielektrika)

Vlastnosti materiálů vlastních polovodičů

Materiál	ϵ_r	τ [s]	μ_e [cm ² /(Vs)]	μ_h [cm ² /(Vs)]	E_g [eV]
Si	11.8	10^{-4}	1 350	480	1.11
Ge	16	10^{-2}	3 900	1 900	0.67
PbS	161	2×10^{-5}	575	200	0.37
InSb	17.7	10^{-7}	105	1 700	0.18
GaAs	13.2	$\geq 10^{-6}$	8 500	400	1.43
InP	12.4	$\sim 10^{-6}$	4 000	100	1.35

Citlivost \mathcal{R}

- úměrná G a η , tvar a velikost kontaktů, předpětí až po průrazné (potom fluktuace vodivosti, nárůst šumu, destrukce)
- materiály s velkou τ (nepřímý přechod, vysoká čistota bez rekombinačních center)

Nevlastní fotorezistory

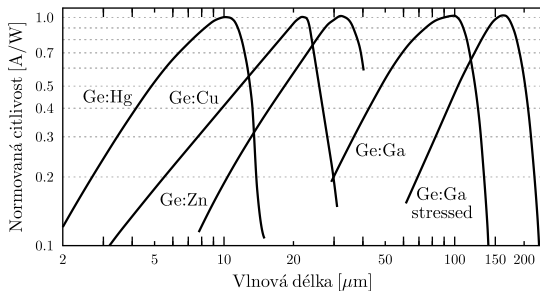
Extrinsic photoconductors

- excitace elektronu z donorové hladiny do vodivostního pásu za vzniku vázané díry
- excitace díry z akceptorové hladiny do valenčního pásu za vzniku vázaného elektronu

větší pravděpodobnost termální excitace – chlazení až na 4 K

Absorpční koeficient $\alpha(\lambda) = \sigma_i(\lambda)N_{a,d}$

- $\sigma_i(\lambda)$ – fotoionizační průřez, $N_{a,d}$ – koncentrace dopantu
- koncentrace N_i limitována rozpustností (10^{14} - 10^{21} cm⁻³) a nežádoucím nárůstem vodivosti (10^{15} - 10^{16} cm⁻³)
- absorpční koeficient menší cca o tři řády oproti vlastním polovodičům → zvětšení objemu



Dopant	Typ	Ge		Si	
		λ_m [μm]	σ_i [10^{-15} cm ²]	λ_m [μm]	σ_i [10^{-15} cm ²]
Al	p			18.5	0.8
B	p	119	10	28	1.4
Be	p	52		8.3	0.005
Ga	p	115	10	17.2	0.5
In	p	111		7.9	0.033
As	n	98	11	23	2.2
Cu	p	31	1	5.2	0.005
P	n	103	15	27	1.7
Sb	n	129	16	29	6.2

Heterostruktury

- vrstvení různě dotovaných polovodičů → potenciálové jámy (GaAs) a bariéry (AlGaAs)
- QWIP *Quantum-well* a QDIP *quantum-dot infrared photodetector*
- stlačený materiál (*stressed*) – narušení krystalové mřížky, snížení excitační energie

Komerční fotorezistory Tesly Blatná a.s.

Typ	U_{\max} [V]	P_{\max} [mW]	$\lambda_{\mathcal{R}\max}$ [nm]	R_{10lx} [k Ω]	R_{\min} [M Ω]
M0856 20	250	125	560	13...27	2
P0860 200	320	125	600	130...260	50
K0772 10	150	125	720	6.5...13.5	10

Obsah

- 4 Vnitřní fotoefekt
 - Fotodiody
 - p-n fotodiody
 - p-i-n fotodiody
 - Lavinové fotodiody
 - APD v Geigerově módu

Fotodiody

Photodiodes

Princip

- materiály s velkou vodivostí nelze použít jako fotorezistory
- p-n rozhraní – selektivní přesun termálně excitovaných majoritních nosičů, elektrony do n a díry do p-typu, kde rekombinují
- vnitřní elektrické pole (difuzní potenciál U_0)
- ochuzená oblast bez volných nosičů
- mimo ochuzenou oblast zanedbatelný potenciálový rozdíl (relativně velká vodivost dotovaného materiálu)
- jen mezipásmové přechody majoritního čistého polovodiče
- excitovaný elektron a díra se pohybují opačným směrem díky vnitřnímu elektrickému poli
- změna vodivosti přechodu s dopadajícím zářením
- nevykazují zisk

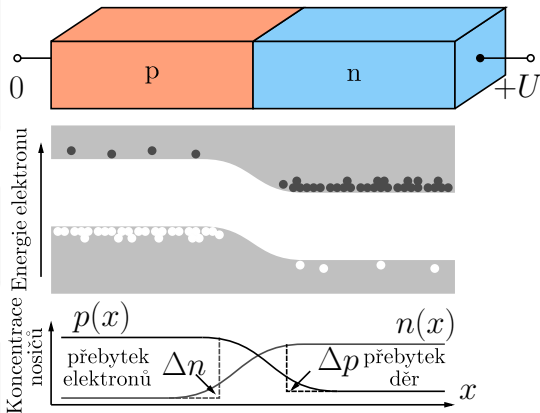
p-n fotodiody

závěrné napětí (kladné na n-typ) → sečtení potenciálů, zvětšení ochuzené oblasti, zvětšení odporu, zmenšení kapacity

proud $I_f = \eta e \Phi_p$ a citlivost $\mathcal{R} = \frac{I_f}{\Phi_r} = \frac{e\eta}{h\nu}$ podobně jako u fotorezistoru

$$I = I_s \left[e^{(eU/k_B T)} - 1 \right] - I_f$$

I_s – satureovaný proud



Doba odezvy

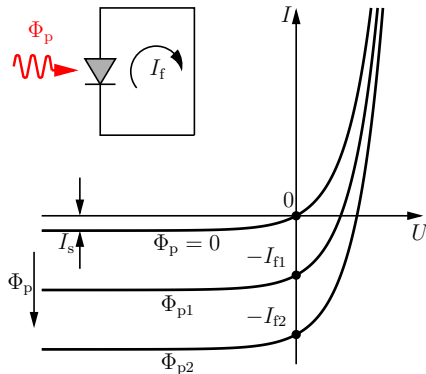
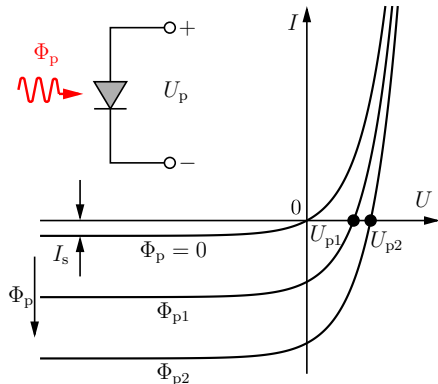
závisí na $\tau_{e,h}$ a RC konstantě stejně jako u fotorezistoru
navíc doba difuze nosičů vzniklých mimo ochuzenou oblast

Materiály fotodiód s mezní vlnovou délkou

diamantové vrstvy	230 nm	GaN	370 nm
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	200-370 nm	GaP	520 nm
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$	0.75-1.7 μm	Si	1.1 μm
GaInAs	1.65 μm	Ge	1.8 μm
InAs	3.4 μm	InSb	6.8 μm
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	1-15 μm		

Elektrické zapojení I

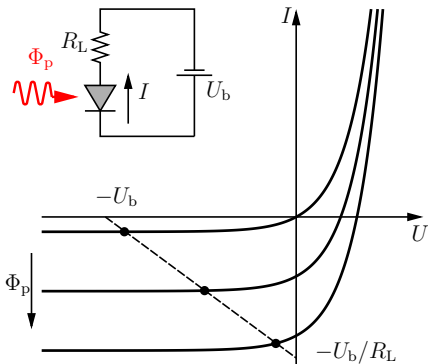
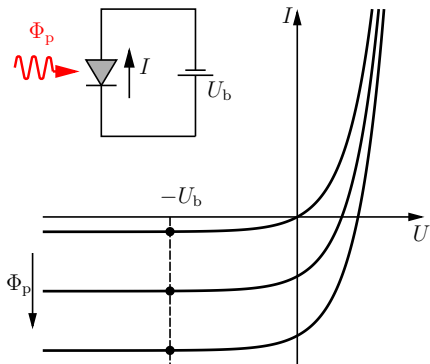
- 1 **na prázdko** – zvýšení elektrického pole (napětí na kontaktech), citlivost ve V/W
- 2 **na krátko** – přímé spojení, měří se fotoproud i_p



Elektrické zapojení II

3 se závěrným napětím

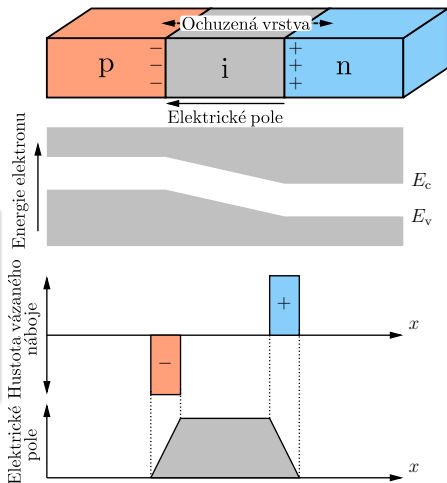
4 se závěrným napětím s odporem v sérii



p-i-n fotodiody

vlastní nebo slabě dotovaný polovodič mezi p a n-typ \rightarrow širší ochuzená vrstva

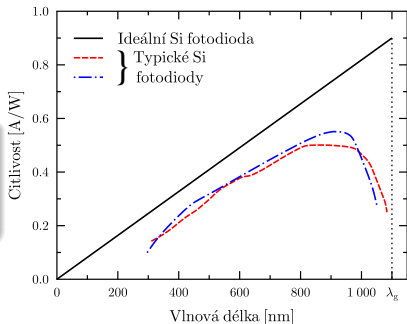
- větší světlocitlivá oblast
- snížení C ale prodloužení $\tau_{e,h}$
- menší poměr mezi difuzní a driftovou vzdáleností \rightarrow rychlejší odezva



Vlastnosti p-i-n

Citlivost

nepřímý zakázaný pás – maximum \mathcal{R}
pro $\lambda < \lambda_g$



Heterostruktury

- vrstva s větší šířkou zakázaného pásu – průhledné okénko
- AlGaAs/GaAs – 700-780 nm
- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ – 1.3-1.6 μm , $\eta \sim 75\%$, $\mathcal{R} \sim 0.9 \text{ A/W}$
- $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ – 3-17 μm , noční vidění, komunikace

Technické parametry komerčních fotodiód

$\lambda_{\mathcal{R}_{\max}}$ pro maximum citlivosti

R_L odporový bočník

C kapacita přechodu

U_b předpětí

B šířka pásma, $B = \frac{1}{2\pi R_L C}$

U_{out} výstupní napětí $U_{\text{out}} = \Phi_r \mathcal{R}(\lambda) R_L$

I_d temný proud

NEP (*noise equivalent power*)

$$\text{NEP} = \frac{\Delta I_{\text{noise}}}{\mathcal{R}G} [\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

I_{noise} šumový proud

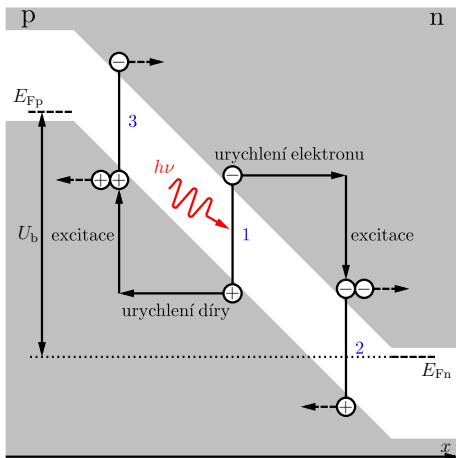
(termální+temný+signální+ziskový)

G zisk transimpedančního zesilovače

- aktivní oblast
- rozsah detekovaných vlnových délek
- mez linearity
- práh zničení
- délka náběžné a úběžné hrany impulzu ($t_r \approx 0.35/B$)

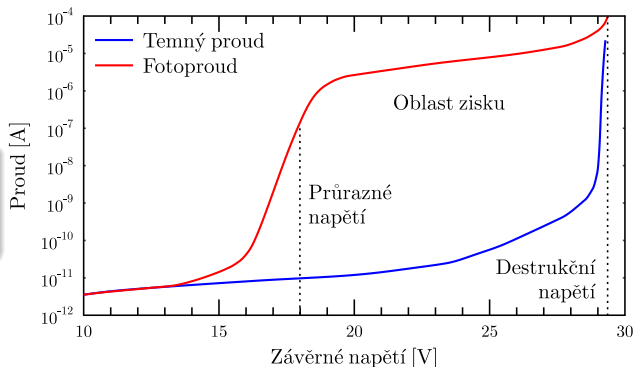
Lavinové fotodiody APD – *Avalanche photodiodes*

- naprůrazné napětí na p-n přechodu
- urychlení nosičů náboje
- nárazová ionizace
- lavinové násobení nosičů náboje



Citlivost APD

$$\mathcal{R} = \frac{\eta Ge}{h\nu}$$



Materiály

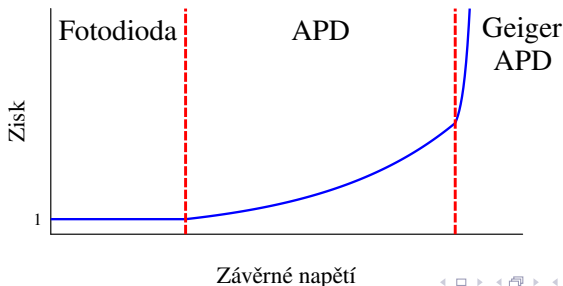
podobně jako u p-i-n fotodiód

Si 700-900 nm

InGaAs 1.3-1.6 μm , větší citlivost, střední šum,
pracovní napětí 10^5 V/cm

APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu \rightarrow velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton \times nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru**
 - Zdroje šumu
 - SNR a BER
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Obsah

- 5 Šum detektoru
 - Zdroje šumu
 - Fotonový šum
 - Fotoelektronový šum
 - Šum fotoproudu
 - Šum zisku
 - Obvodový šum

Šum fotodetektorů

Generovaný elektrický proud $I(t)$ je náhodná veličina

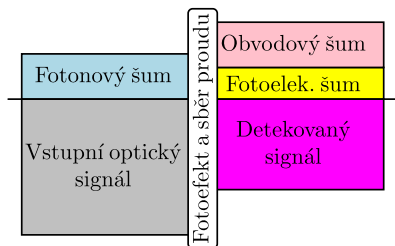
$$\bar{I} = \eta e \Phi_p, \quad \sigma_I^2 = \langle (I - \bar{I})^2 \rangle$$

Zdroje šumu

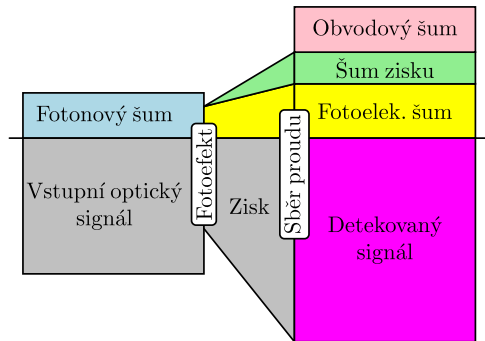
- 1 Fotonový šum – dopadající fotony, většinou Poissonovo rozdělení
- 2 Fotoelektronový šum – vždy pro $\eta < 1$
- 3 Šum zisku – u fotorezistorů a APD zisk náhodný
- 4 Šum vnějšího obvodu – rezistory, kondenzátory atd.
- 5 Šum pozadí – neodstíněné světlo z nesledovaných zdrojů, termální záření objektů
- 6 Temný šum – náhodná generace nosičů termálně nebo tunelováním

Zdroje šumu

Detektor bez zisku



Detektor se ziskem



Veličiny poměřující šum

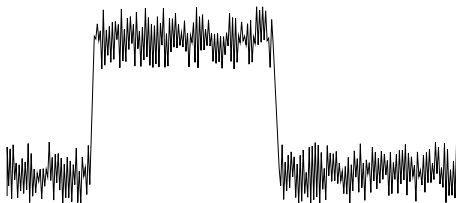
SNR Poměr signálu k šumu (*Signal to Noise Ratio*), $SNR = \bar{I}^2 / \sigma_I^2$
popř. \bar{n}^2 / σ_n^2 , minimální detekovaný signál má $SNR = 1$

NEP Výkon odpovídající šumu (*Noise Equivalent Power*)

F Faktor zvýšení šumu (*Excess noise factor*), $F = \langle G^2 \rangle / \langle G \rangle^2$

BER Chybovost na bit informace (*Bit error rate*)

Citlivost přijímače (*Receiver sensitivity*) minimální Φ_p pro určitou hodnotu SNR_0 (10^{-3}) popř. BER (10^{-9})



Fotonový šum

- neodstranitelný, charakteristika dopadajícího záření
- Laserové záření nebo termální s šířkou spektra $> 1/T \rightarrow$ Poissonova statistika

Poissonova statistika (výstřelový šum)

$\bar{n} = \Phi_p t_r$, $p(m) = (\bar{n}^m e^{-\bar{n}}) / m!$, $\sigma_n^2 = \bar{n}$, $\text{SNR} = \bar{n}$,
 minimální detekovaný signál je 1 foton

Example

pro $t = 1 \mu\text{s}$ a $\lambda = 1.24 \mu\text{m}$ je minimální detekovaný výkon 0.16 pW (jeden foton). Pro $\text{SNR}_0 = 10^3$ (30 dB) potřeba 10^3 fotonů. Pro $t = 10 \text{ ns}$ to odpovídá 10^{11} fotonů/s tedy 16 nW .

Fotoelektronový šum

Náhodnost vzniku páru nosičů po dopadu fotonu

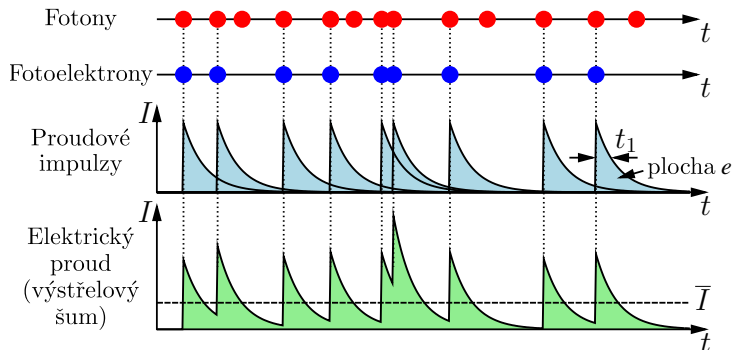
- s pravděpodobností η vznikne
- s pravděpodobností $1 - \eta$ nevznikne

Počet fotoelektronů

- náhodná veličina
- střední hodnota $\bar{m} = \eta \bar{n} = \eta \Phi_p t_r$
- kopíruje statistiku dopadajícího záření (Poissonova $\rightarrow \sigma_m^2 = \text{SNR} = \bar{m} = \eta \bar{n}$)
- fotoelektronový a fotonový šum nejsou aditivní

Šum fotonového proudu

- fluktuace elektrického proudu $I(t)$ v obvodu fotodetektoru v závislosti na dopadajícím fotonovém toku
- zahrnuje fotonový a fotoelektronový šum, charakteristickou dobu odezvy a elektrické zapojení detektoru



Šum fotoproudu

- dopadající záření Φ_p generuje $\eta\bar{n} = \bar{m}$ fotoelektronů za charakteristickou dobu odezvy $t_r = \frac{1}{2B}$ (rozlišovací schopnost)
- fotoproud $\bar{I} = \bar{m}e/t_r$, $\sigma_I^2 = (e/t_r)^2\sigma_m^2$

Poissonovské dopadající záření

$$\bar{I} = e\eta\Phi_p, \quad \sigma_I^2 = 2e\bar{I}B, \quad \text{SNR} = \frac{\bar{I}^2}{\sigma_I^2} = \frac{\bar{I}}{2eB} = \frac{\eta\Phi_p}{2B} = \bar{m}$$

Example

Pro $\bar{I} = 10 \text{ nA}$ a $B = 100 \text{ MHz}$ je $\sigma_I \approx 0.57 \text{ nA}$, $\text{SNR} = 310$ (25 dB). Tedy 310 fotoelektronů je detekováno v každém časovém intervalu $t_r = 5 \text{ ns}$. Minimální zaznamenaný fotonový tok je $\Phi_p = 2B/\eta$ a pro citlivost přijímače $\text{SNR}_0 = 10^3$ dostaneme $\Phi_p = 1\,000(2B/\eta) = 2 \times 10^{11}/\eta$ fotonů za sekundu.

Šum zisku

Proces zesílení

- deterministický, potom $e \rightarrow q = Ge$, žádný šum navíc
- náhodný (u fotorezistoru, APD i fotonásobiče)
potom \bar{G} s σ_G^2
proud v obvodu $\bar{I} = e\bar{G}\eta\Phi_p$, $\sigma_I^2 = 2e\bar{G}\bar{I}BF$

Faktor zvýšení šumu F

- $F = \frac{\langle G^2 \rangle}{\langle G \rangle^2} = 1 + \frac{\sigma_G^2}{\langle G \rangle^2}$
- $F \geq 1$ a roste s náhodností zesílení

$$\text{SNR} = \frac{\bar{I}}{2e\bar{G}BF} = \frac{\eta\Phi_p}{2BF} = \frac{\bar{m}}{F}$$

Obvodový šum

tepelný pohyb nosičů náboje v rezistorech a v tranzistorech zesilovače

Tepelný šum (Johnsonův, Nyquistův)

- náhodné fluktuace proudu pro $T > 0\text{ K}$
- je-li $B \ll k_B T/h = 6.24\text{ THz}$ ($T = 300\text{ K}$), potom $\sigma_I^2 \approx 4k_B TB/R$

Parametr šumu obvodu σ_q

$$\sigma_q = \frac{\sigma_r t_r}{e} = \frac{\sigma_r}{2Be}$$

- σ_r/e - variance elektronového toku
- obvod limitován odporem – $\sigma_q = \sqrt{\frac{k_B T}{e^2 R_L B}}$
- obvod limitovaný zesílením – $\sigma_q \approx \sqrt{\frac{B}{10}}$

Obsah

- 5 Šum detektoru
 - SNR a BER

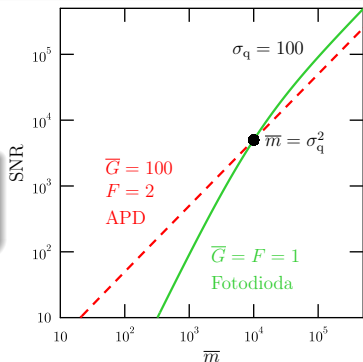
Poměr signálu k šumu SNR

Poissonovský signál

$$\text{SNR} = \frac{\bar{I}}{2e\bar{G}\bar{I}BF + \sigma_r^2} = \frac{(e\bar{G}\eta\Phi_p)^2}{2e^2\bar{G}^2\eta BF\Phi_p + \sigma_r^2} = \frac{\bar{G}^2\bar{m}^2}{\bar{G}^2 F\bar{m} + \sigma_q^2}$$

Detektor bez zisku

$$\text{SNR} = \bar{m}^2 / (\bar{m} + \sigma_q^2)$$



Chybovost BER

- "1" – detekce \bar{n} fotonů \times "0" – bez detekce (0 fotonů)
- průměrný počet fotonů na bit $\rightarrow \bar{n}_b = \bar{n}/2$
- Poissonovo rozdělení – BER = $e^{-\bar{n}}/2 = e^{-2\bar{n}_b}/2$

Minimální průměrný počet fotonů na bit pro BER₀ = 10⁻⁹

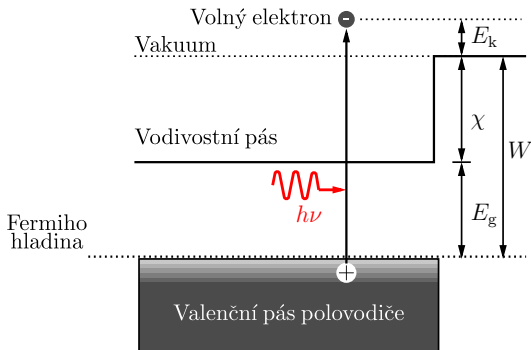
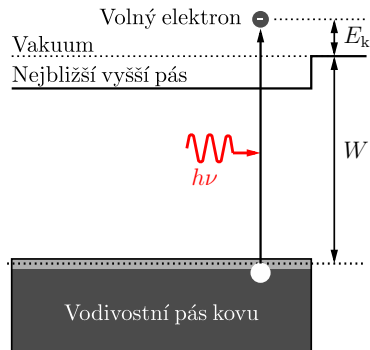
ideální detektor	10	InGaAs APD	500
Si APD	125	p-i-n fotodioda	6 000

Střední počet fotoelektronů na bit \bar{m}_b

$$\bar{m}_b = 18F + \frac{6\sigma_q}{G}$$

- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev**
 - Součásti fotonásobiče
 - Výběr fotonásobiče
 - Vlastnosti fotonásobičů
 - Šum fotonásobiče
 - Konstrukce fotonásobičů
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Fotoelektronová emise z kovu a z polovodiče



$$h\nu = W + E_k = E_g + \chi + E_k$$

W výstupní práce

E_k kinetická energie elektronu

E_g šířka zakázaného pásu

χ elektronová afinita

Fotonka

- fotokatoda – generace elektronů po ozáření světlem
- anoda – sběr elektronů



Fotonásobič

- fotokatoda + anoda a mezi nimi
- dynody – znásobení počtu elektronů



Vlastnosti

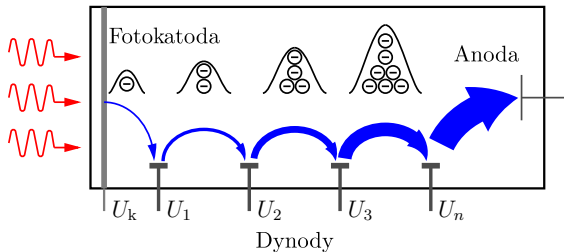
- dobrá citlivost a kvantová účinnost v UV a viditelné oblasti
- rychlý čas odezvy
- nízký šum



Obsah

- 6 Vnější fotoelektrický jev
 - Součásti fotonásobiče
 - Okénko
 - Fotokatoda
 - Dynody
 - Anoda a periferie

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton \rightarrow fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu \rightarrow proudový impulz

Okénko



- průhledná část krytu
- neprodyšný spoj, pokud je kryt z jiného materiálu
- dostatečná propustnost v detekované části spektra
- v UV oblasti speciální materiály

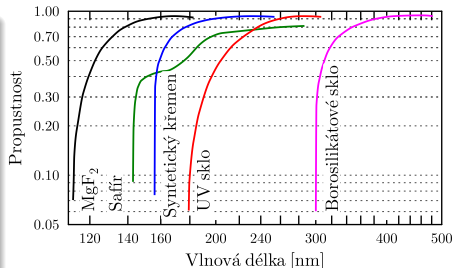
Materiál okénka

MgF₂ od 115 nm, není tolik hydrofilní

Safír (Al₂O₃) od 150 nm

Syntetický Si od 160 nm, menší absorpce než tavený Si, penetrace He₂

UV sklo od 185 nm



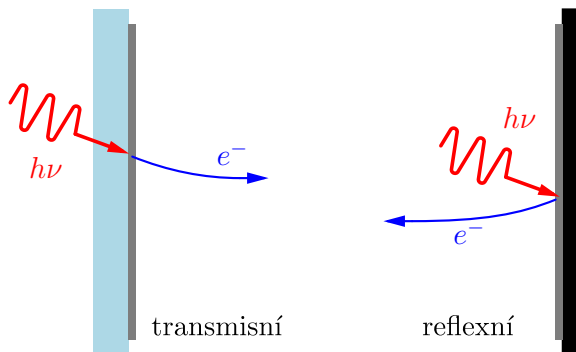
Borosilikátové (Kovarové) sklo od 300 nm, teplotní roztažnost blízka kovarovým slitinám (vodiče), málo ⁴⁰K (K-free), scintilační čítání

Fotokatoda

Dělení fotokatod podle směru elektronové emise

Transmisní *head on*, tenká vrstva aktivního materiálu na skleněné destičce

Reflexní *side on*, na kovovém substrátě



Kvantová účinnost fotokatody

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{v_e}{\alpha v_e + 1} p$$

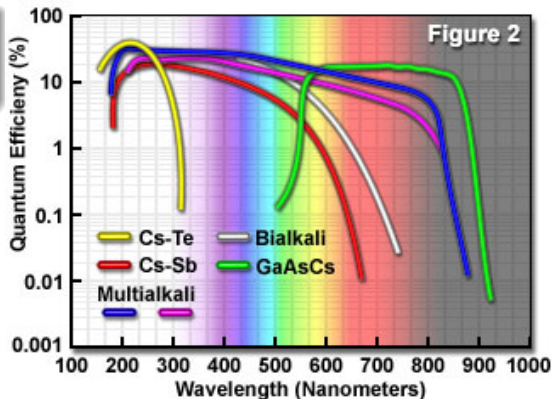
R intenzitní odrazivost materiálu

α absorpční koeficient

v_e střední úniková rychlost elektronů

p pravděpodobnost úniku elektronu do vákua

Photocathode Spectral Responses



Materiály fotokatod

CsI a CsTe od 200 resp. 300 nm, *solar blind*, s okénky z MgF_2 , syntetického Si nebo bez

Sb-Cs UV a VIS, pro větší intenzity, malý odpor, jen reflexní

Bialkalické Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs, UV a VIS, vysoká citlivost, malý temný proud

Vysokoteplotní bialkalické Sb-Na-K, UV a VIS, menší citlivost, pracovní teplota až 175°C (normal 50°C)

Multialkalické Sb-Na-K-Cs, od UV po 900 nm

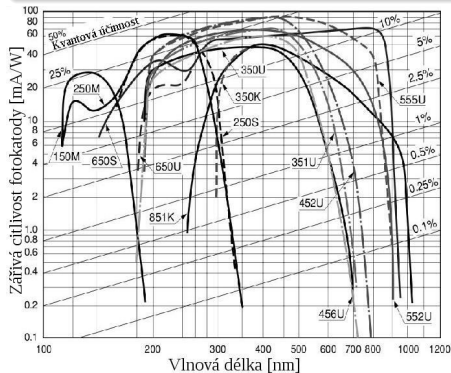
Ag-O-Cs od 300 po 1 200 nm transmisní, po 1 100 nm reflexní, malá citlivost ve VIS

GaAsP(Cs) transmisní ve VIS, velká citlivost, degraduje pro velké intenzity

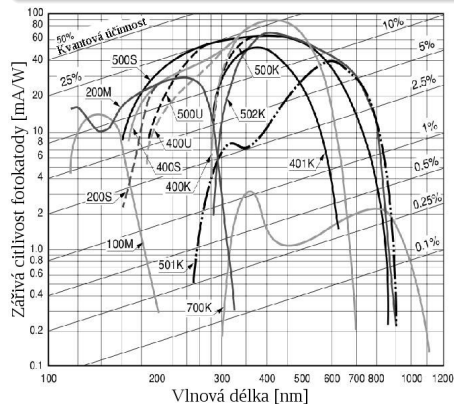
GaAs(Cs) transmisní od UV po 900 nm, plochá závislost citlivosti, degraduje pro velké intenzity

Zářivé citlivosti fotokatod

Reflexní fotokatoda

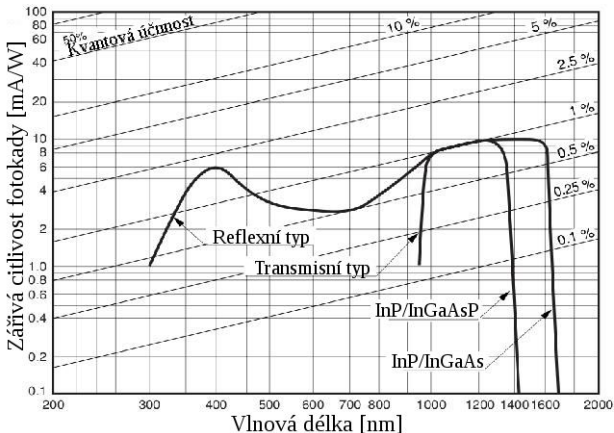


Transmisní fotokatoda



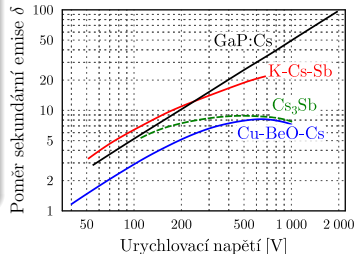
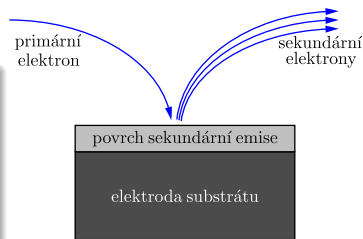
Infračervené fotokatody

InGaAs(Cs) posunutá do IČ, výborný SNR mezi 900 a 1 000 nm
 InP/InAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs) polovodičový p-n přechod, až do
 1 700 nm, nutné chlazení až na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ kvůli šumu



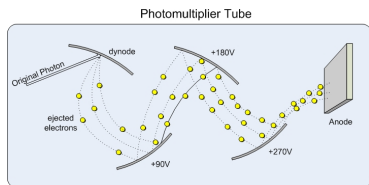
Dynody

- násobení počtu elektronů sekundární emisí
- spojitá (MCP) \times oddělené, stupňovité napětí 100-200 V, počet 1-19
- zisk 10-100, poměr sekundární emise δ závisí na materiálu a napětí
- zisk na n dynodách – δ^n
- materiály – alkalicko antimonové slitiny BeO, MgO, GaP, GaAsP na elektrodách z Ni, oceli a CuBe slitin



Trajektorie elektronů

- fokuzace elektronů na dynody
- minimální rozdíl časů průchodu elektronů
- zamezení zpětné vazby (iontová, světelná)
- optimalizováno numerickou analýzou



Sběrná účinnost δ_0

počet elektronů na první dynodě / emitovaných z fotokadody
hodnota mezi 60 až 90 %

Konstrukce

závisí na použití
kruhová, komůrková, lineární fokuzovaný typ a jiné viz dále

Anoda

- tvar tyče, desky nebo sítě
- optimalizace napětí pro omezení prostorového náboje a maximalizaci zisku

Periferie (elektronika a kryt)

- stabilizovaný zdroj vysokého napětí $1\text{-}2\text{ kV} \pm 0.1\%$
- obvody rozdělující napětí na dynody, anodu a směrovací elektrody
- kryt stíní elektrické a magnetické pole, nechtěné světlo
- změna charakteristik fotonásobiče podle vnějších vlivů (teplota, vlhkost, mechanické napětí, elemag. pole)



Obsah

- 6 Vnější fotoelektrický jev
 - Výběr fotonásobiče

Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení

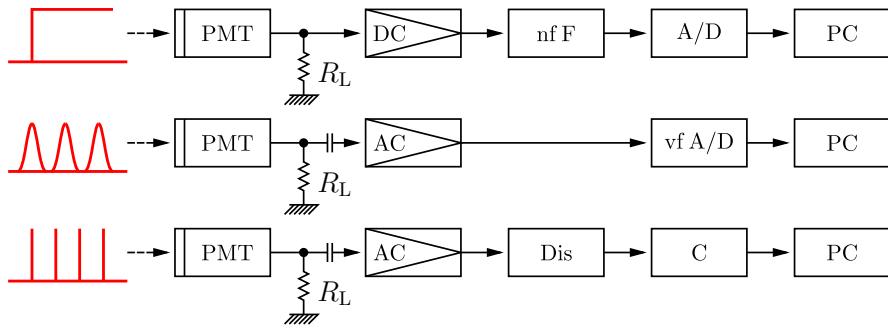


Režim činnosti

DC kontinuální, pomalá změna intenzity signálu

AC pulzní, rychlé změny intenzity signálu

PC čítání fotonů, binární odezva, nastavení diskriminátoru



Obsah

- 6 Vnější fotoelektrický jev
 - Vlastnosti fotonásobičů

Zářivá citlivost

$$\mathcal{R}(\lambda) = I_f / \Phi_r \text{ [A/W]}$$

I_f fotoproud

Φ_r vstupní zářivý tok

Kvantová účinnost

$$\eta(\lambda) = \frac{hc}{\lambda e} \mathcal{R}(\lambda) \approx \frac{1240}{\lambda[\mu\text{m}]} \mathcal{R}(\lambda)$$

- porovnání s kalibrovanou fotodiodou nebo fotonásobičem

Rozsah spektrální odezvy

- krátkovlnný limit – materiál okénka
- dlouhovlnný limit – materiál fotokatody
 - pokles na 1 % z maxima pro bialkalické a Ag-O-Cs
 - pokles na 0.1 % z maxima pro multialkalické

Světelná odezva

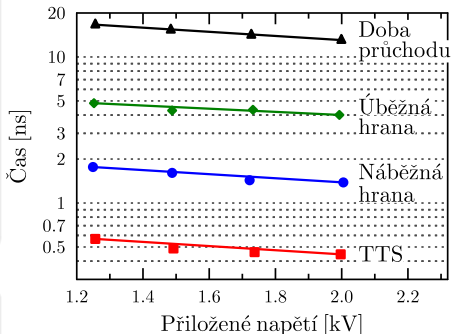
- závislost výstupního proudu na svítivém toku (v lumenech) z wolframové lampy teploty 2 856 K
- katodová a anodová (vlastnosti po multiplikaci)

Zisk

- sběrná účinnost δ_0
- dynodový zisk (poměr sekundární emise) $\delta = aUk$
materiálová konstanta $k = 0.7 \div 0.8$
 $\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k}$ - počet sekundárních elektronů ku fotoelektrickému proudu, $\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}}$
- celkový zisk $G = \delta_0 \delta_1 \cdot \delta_2 \cdots \delta_n$, stejný zisk na všech dynodách $\rightarrow G = \delta_0 (aUk)^n$ – velká citlivost na změnu napětí

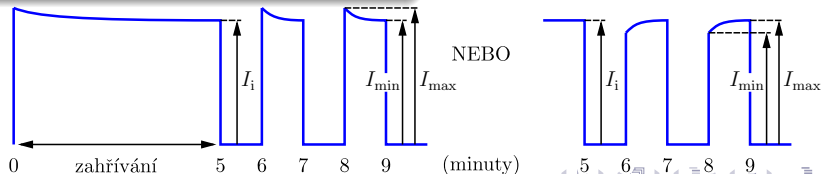
Časová odezva

- zpoždění způsobené prvky od katody po anodu
- $TTS \sim U^{-2}$
- minimální pro lineární fokuzovaný typ a kovové kanálky



Hystereze

závislost výstupního proudu na předchozí hodnotě



Linearita

- horní mez intenzity pro katodu 0.1 až 10 μA , pro anodu 10 mA
- AC – limituje efekt prostorového náboje
- DC – limitují obvody napěťového zesilovače
- lepší u reflexních fotokatod – malý odpor substrátu
- roste s napětím a počtem dynod

Uniformita

změna vlastností fotonásobiče na poloze a úhlu dopadu fotonů

Stabilita

změna vlastností v čase, krátkodobě drift (zahřívání) 30 až 60 minut, dlouhodobě životnost fotokatody 10^3 až 10^4 hodin

Obsah

- 6 Vnější fotoelektrický jev
 - Šum fotonásobiče

Temný proud (temný šum)

- anodový proud se zakrytým detektorem

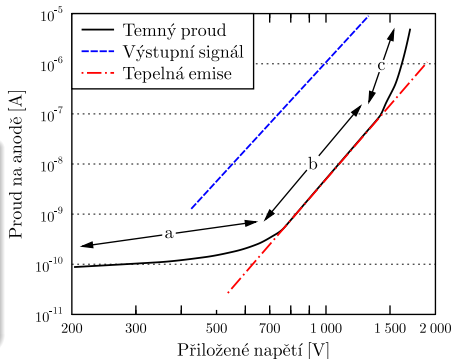
Zdroje

a proniklý proud z dynod na anodu nebo patici (špatná izolace)

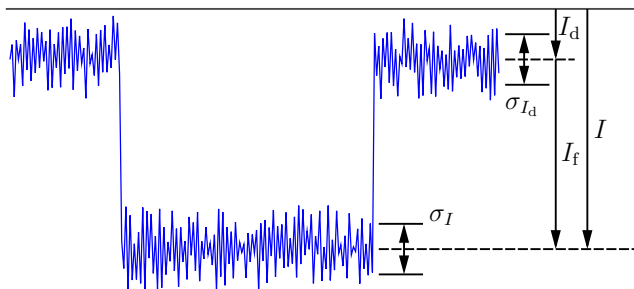
b tepelná emise fotokatody a

$$\text{dynod} \sim T^{4/5} e^{\frac{-eW}{k_B T}}$$

c scintilace na skle a držácích elektrod, elektrony vytržené polem ostatní ionizace na zbylém plynu (vakuum 10^{-6} až 10^{-5} Pa), kosmické záření (Čerenkovovo záření z mionů), radioizotopy obsažené ve skle (betazáření z ^{40}K)



Poměr signálu k šumu SNR



$$\text{SNR} = \frac{I_f^2}{\sigma_I^2} = \frac{(I - I_d)^2}{\sigma_I^2}$$

I_f střední
fotoproud

B šířka pásma

δ dynodový zisk

$$\text{SNR} = \frac{I_k^2}{2eB \frac{\delta}{\delta-1} (I_k + 2I_d) + \sigma_r^2}$$

I_d temný proud

σ_r^2 variance šumového proudu
zesilovacího obvodu

SNR elektronového násobiče (dynod)

- $\text{SNR} = \frac{\eta' n_0 \delta'_1}{\delta'_1 + 1}$
- $\eta' = \eta \delta_0$
- $\delta'_1 = \delta_1 (\delta - 1) / \delta$

Zlepšení SNR

- maximální účinnost pro dané λ
- optimalizace přenosu elektronů
- maximální zachycení světla
- rozšíření B



Afterpulsing – pravděpodobnost následného pulzu

rychlé $1 \div 100$ ns

- důsledek elastických odrazů na první dynodě
- lze eliminovat speciální elektrodou
- fotonového čítání – elektronika je nestihne zaznamenat

pomalé 100 ns \div 1 μ s

- důsledek zpětné iontové vazby (penetrující He^+)
- rostou s napětím

Závislost na polarizaci

ztráty na rozhraních okénka a fotokatody podle úhlu dopadu a typu polarizace (Fresnelovy vztahy)

Obsah

- 6 Vnější fotoelektrický jev
 - Konstrukce fotonásobičů

Porovnání konstrukcí fotonásobičů

Typ konstrukce	Náběžná hrana [ns]	Linearita [mA]	Imunita mag. pole [mT]	Uniformita	Sběrná účinnost	Klady
Kruhový	0.9-0.3	1-10	0.1	slabá	dobrá	kompaktní, rychlý
Komůrkový	6-20	1-10	0.1	dobrá	výborná	velká koleční účinnost
Lin. fok.	0.7-3	10-250	0.1	slabá	dobrá	rychlý, vysoká linearita
Žaluziový	6-18	10-40	0.1	dobrá	dobrá	velký průměr
Síťový	1.5-5.5	300-1 000	500-1 500	dobrá	slabá	vysoká linearita
MCP	0.1-0.3	700	1 500	dobrá	dobrá	rychlý
Kovové kan.	0.65-1.5	30	5	dobrá	dobrá	kompaktní, rychlý
Elek. bomb.	závisí na polovodiči	-	-	výborná	výborná	vysoké elek. rozlišení

Diagramy a fotografie ukazující různé konstrukce fotonásobičů a hybridních detektorů. Ukazují se různé typy fotokatod, dynod, anod a detekčních matic. Včetně označení komponent jako: fotokatoda, dynody, patice, Si-detektor, matice A-diod, světelné pouzdro fotonásobič, krytal, dělič, scintilační sonda.

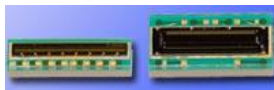
Diagramy také zobrazují vnitřní strukturu a proudění elektronů a fotonů v různých uspořádáních: lineární uspořádání fokusovaných dynod, kompaktní kruhové uspořádání dynod, segmentové "žaluziové" dynody, multianodový polohově citlivý fotonásobič, hybridní foto-detektor HPD, pixelový zobrazovací foto-detektor HPD a polovodičový Si-PM "fotonásobič".

Uvedené napětí: -20kV, -15 kV, -8kV, +200V, +800V, -20,80 V.

- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS**
 - Vlastnosti
 - Snímání obrazu CCD
 - Další technologie CCD a softwarová úprava obrazu
 - Barevné snímání
 - Porovnání CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Využití kamer

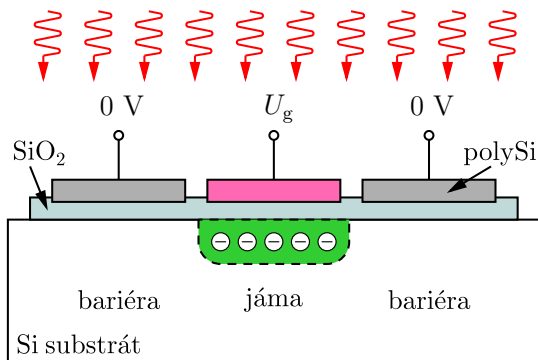
- kamera
- foťák
- fax
- scanner (kopírka)
- čtečka čárových kódů
- ...



Výstup:



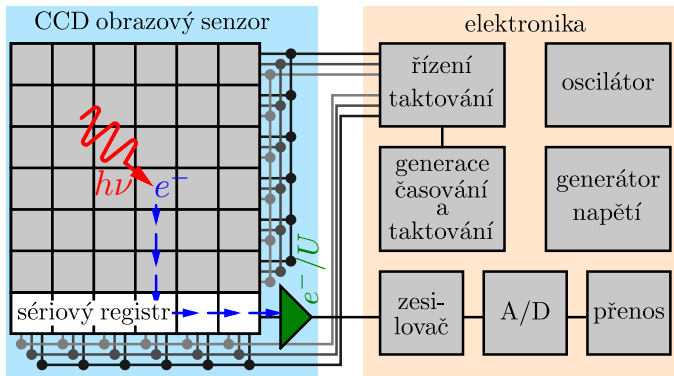
Pixel



- polykřemík – vodič, SiO_2 – izolant
- vznik elektron-děrového páru po dopadu fotonu
- zachycení elektronů v potenciálových jamách
- počet fotoelektronů úměrný počtu absorbovaných fotonů

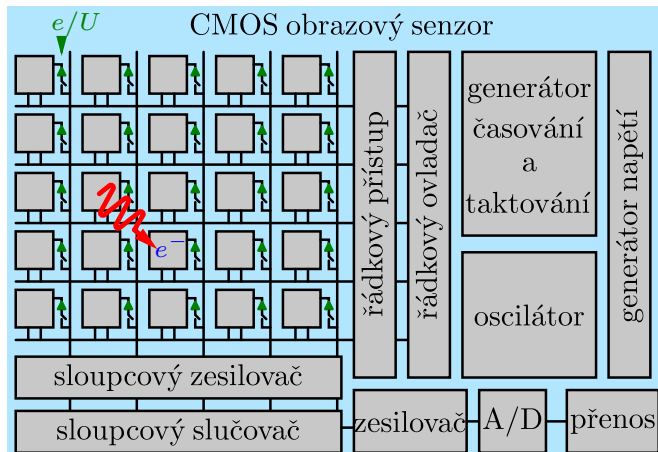
Zpracování obrazu u CCD

- změnou napětí na kontaktech přenos náboje po řádcích z paralelního do sériového registru, potom po pixelech k jedinému převodníku – převod na napětí
- výstupní zesilovač, zpracování a řízení mimo čip



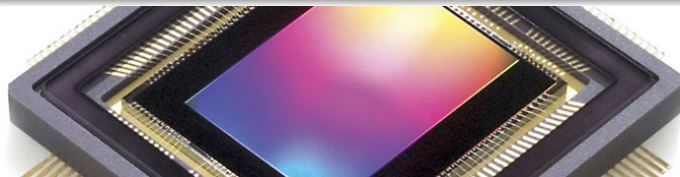
Zpracování obrazu u CMOS

- převodník na napětí u každého pixelu (menší aktivní plocha)
- zpracování a řízení na stejném čipu



Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



Obsah

7 Maticové detektory CCD a CMOS

- Vlastnosti

- Proces detekce
- Ztráty
- Prostorové rozlišení

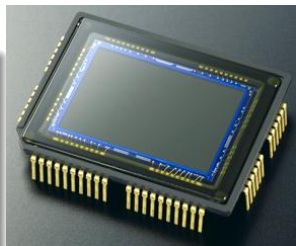
Proces detekce

$$E_\nu = h\nu = hc/\lambda \geq E_g$$

Kritická vlnová délka λ_g

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.24}{E_g[\text{eV}]} [\mu\text{m}]$$

- pro Si je $E_g = 1.12 \text{ eV}$, tedy $\lambda_g = 1.11 \mu\text{m}$
- detekce delších vlnových délek – nevlastní polovodič



Kvantová účinnost η

- závisí na λ
- pro Si pod 400 nm může být $\eta > 100\%$ (elektronový mrak)

Citlivost \mathcal{R}

- $\mathcal{R} = \frac{e\lambda\eta}{hc}$ [A/W]
- $\mathcal{R}_{\text{pixel}} = \frac{\lambda\eta S_p}{hc}$ [cm²/μJ]
- S_p - plocha pixelu

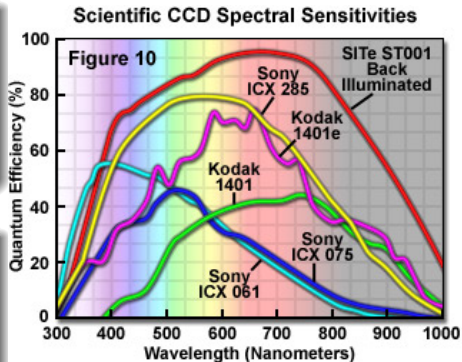
Absorpční koeficient α

pro Si je

- $1/\alpha_{400\text{ nm}} = 0.2\ \mu\text{m}$
- $1/\alpha_{650\text{ nm}} = 3.33\ \mu\text{m}$

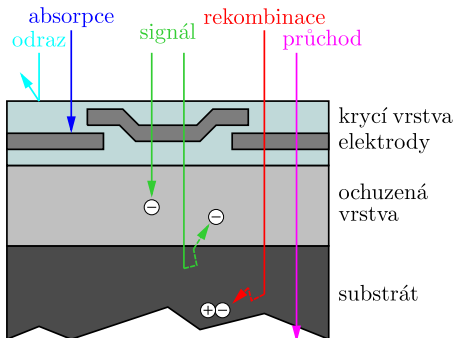
Rekombinační čas τ

- mimo ochuzenou oblast velice krátký
- závisí na čistotě a příměsích
- povrchové rekombinace v důsledku poruch na rozhraní



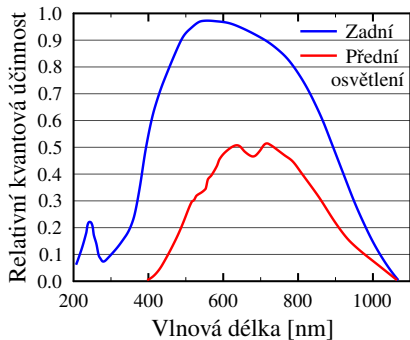
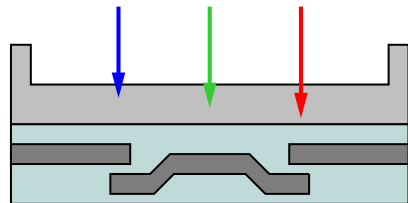
Ztráty × signál

- odraz na povrchu (Fresnelovy vztahy)
- absorpce krycími materiály – ochrana CCD proti degradaci, barevné filtry, elektrody
- excitace elektronu v nebo poblíž ochuzené oblasti
- excitace a následná rekombinace mimo ochuzenou oblast, průchod



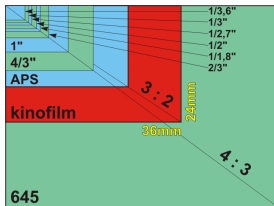
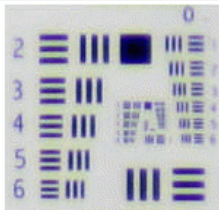
Tenčený CCD čip osvětlený zezadu

- *Thinned back-illuminated CCD*
- beze ztrát na kontaktech a krycím filmu
- zvýšení citlivosti, posun ke kratším vlnovým délkám
- substrát vyleštěn na tloušťku 10 až 15 μm
- náročná a drahá technologie



Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech



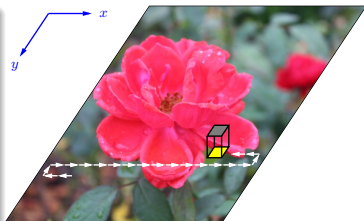
Obsah

- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
 - Snímání obrazu CCD
 - Konverze náboje na napětí

Způsoby snímání obrazu CCD

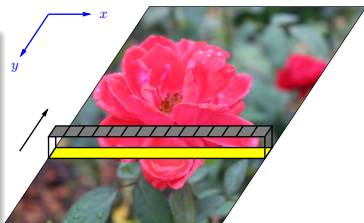
Bodové snímání

- rozlišení úměrné kroku a rozlišení detektoru
- stejné charakteristiky pro celý obraz
- nepřesnost v určení pozice
- záznam jen statických obrazů



Lineární snímání

- jednodušší pohybový aparát
- velikost a rozložení pixelů omezuje rozlišení v x
- skenery, spektrometry, satelity



Plošné snímání

- omezené rozlišení velikostí pixelů
- různé charakteristiky pixelů

Architektury plošných CCD

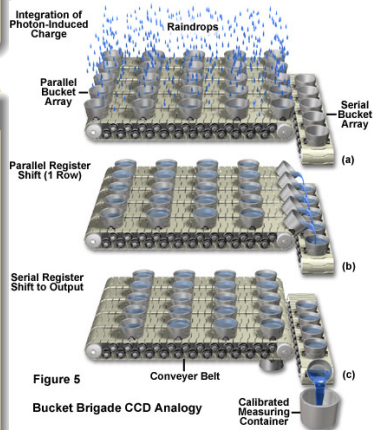
Metody přenosu náboje mezi jednotlivými pixely:

FF *Full-Frame transfer*

FT *Frame Transfer*

IL *Interline transfer*

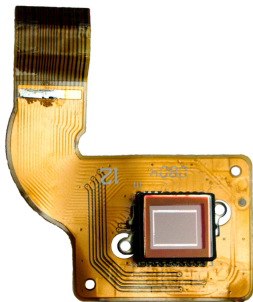
další *Frame Interline transfer*, *Accordian*,
Charge Injection,
MOS XY adresování



FF, FT a IL lze použít i pro lineární CCD

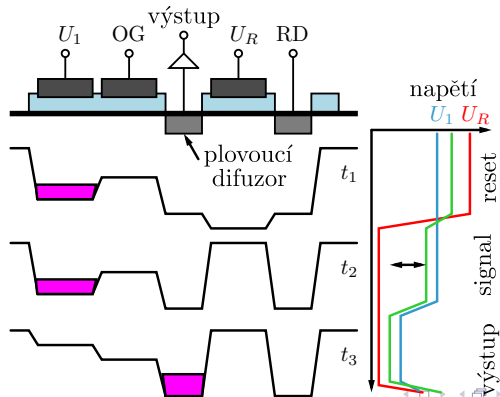
Techniky přenosu náboje na čipu CCD

- pixel tvoří kontakty (dopovaný Si) na polovodiči (Si) oddělené izolantem (SiO_2)
- napětí na kontaktech tvoří potenciálové jámy (vyšší napětí) a bariéry (nižší napětí)
- excitované elektrony jsou zachycovány v potenciálových jamách
- změnou napětí přepínání mezi potenciálovou jámou a bariérou \rightarrow pohyb náboje na čipu
- techniky: čtyřfázová (4Φ), třífázová (3Φ), pseudo-dvoufázová ($P2\Phi$), pravá dvoufázová ($T2\Phi$), virtuální fáze ($V\Phi$)



Konverze náboje na napětí

- 1 vynulování plovoucího difuzního senzoru resetovací elektrodou → referenční hodnota napětí
- 2 přenesení náboje z posledního pixelu sériového registru
- 3 dochází ke změně potenciálu, po odečtení reference → signál



Obsah

- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
 - Další technologie CCD a softwarová úprava obrazu
 - Kapacita pixelu
 - Odtokové kanálky
 - Vady CCD čipů
 - Softwarová úprava

Kapacita pixelu q_w

Full well capacity

$$q_w = C(U - U_c), \quad C = S_p \epsilon_r \epsilon_0 / d$$

S_p plocha pixelu (typicky $15 \times 15 \mu\text{m}^2$)

ϵ_r pro SiO_2 hodnota 4.5

d tloušťka SiO_2 (typicky $0.1 \mu\text{m}$)

U napětí na elektrodě

U_c mezní napětí pro vytvoření potenciálové jámy

$$U - U_c \approx 3 \text{ V}$$



Example

$$C = 225 \mu\text{m}^2 \times 4.5 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} / 0.1 \mu\text{m} \approx 9 \times 10^{-14} \text{ F}$$

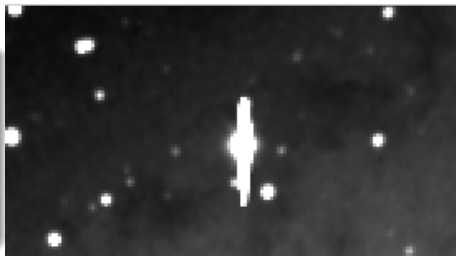
$$\rightarrow q_w \approx 2.7 \times 10^{-13} \text{ C} \approx 1.7 \times 10^6 e^-$$

Odtokové kanálky

Overflow Drain

Přetékání náboje *Blooming*

- překročení kapacity pixelu v důsledku přeexpozice
- nejnáze ve směru paralelního posuvu



VOD vertikální obvod přetečení

LOD laterální obvod přetečení

- + možnost elektronické uzávěrky
- omezení kapacity pixelu, zhoršená linearita

Detekce kratších vlnových délek

- tenčené čipy osvětlené zezadu (FF a FT, nelze VOD)
- pokrytí CCD čipu fosforem – průhledný nad 450 nm, osvětlen UV emituje ve VIS, snížené rozlišení v důsledku rozptylu

Vysokorychlostní CCD

- rychlost CCD omezena zesilovačem na čipu, zrychlení → větší energie → lokální ohřevy, snížení uniformity
- řešením je rozdělit čip na více bloků s paralelním vyčítáním → složitější zpracování
- další zrychlení limitováno časovačem na čipu, šum v důsledku kapacitního chování CCD

Vady CCD čipů

Původ

- znečištění povrchu
- vady ve struktuře
- nežádoucí příměsi

Tmavé pixely horší odezva jak 75 % průměru

Horké pixely přeexponovány v důsledku temného proudu (více jak 50x)

Pasti zachycují posouvané elektrony, těžko odhalitelné (až od 200 elektronů)

Flat field nehomogenní odezva v různých místech čipu

Softwarová úprava

A: obrazový záznam



B: temný snímek



C: homogenní osvětlení



D: $(A-B)$



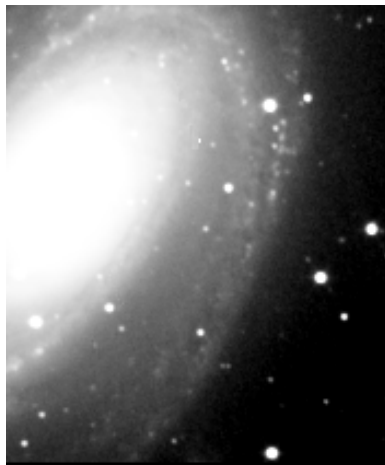
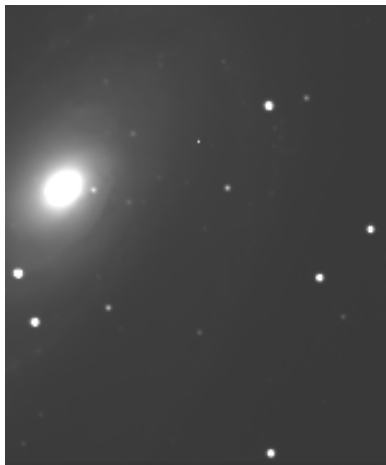
E: $(A-B)/(C-B)$



Skládání expozic

Stretching

- softwarové sečtení více expozic s kratší expozicí
- kompenzace nedostatečného dynamického rozsahu CCD

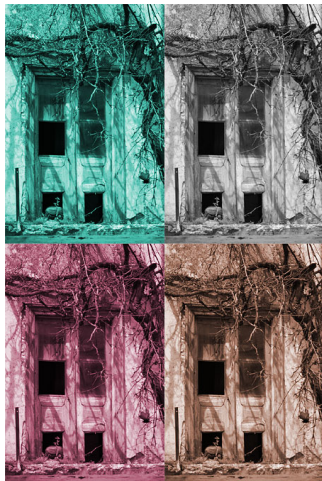


Obsah

- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
 - Barevné snímání

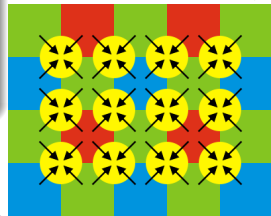
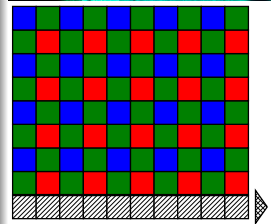
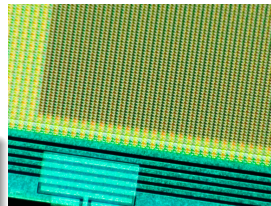
Barevné snímání

- Si CCD čipy jsou monochromatické, změnu podle vlnové délky nelze odlišit od změny v intenzitě
- použití filtrů pro získání informace o barvě (VIS)
 - RGB *Red*, *Green*, *Blue*, někdy navíc L (*Light*)
celková propustnost 1/3
 - CMY *Cyan*, *Magenta*, *Yellow*
celková propustnost 2/3, M je obtížné vyrobit
- kompenzace na spektrální citlivost oka



Integrované filtry na čipu – Bayerova maska

- na pixely při výrobě nanесeny RGB nebo CMY filtry
- zachování rozlišení v jasové složce, prostorové klesne na 1/4
- interpolace barevné informace ze sousedních pixelů
- filtry nelze odstranit
- nelze snímat za úzkopásmovými filtry
- nelze sdružovat pixely

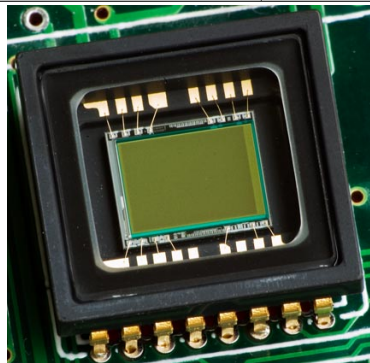


Obsah

- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
 - Porovnání CCD a CMOS

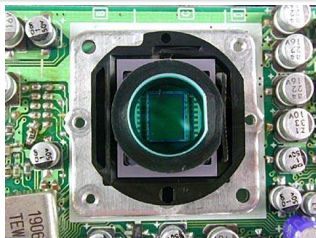
Porovnání CCD a CMOS

Kvantová účinnost	CCD	lepší pokrytí světlocitlivou plochou
Citlivost	CMOS	zesílení přímo na čipu
Šum	CCD	u CMOS přispívá elektronika na čipu
Uniformita za světla	–	obě platformy srovnatelné
Uniformita za tmy	CCD	u CMOS různé zesílení u pixelů
Rychlost	CMOS	zpracování na čipu, paralelnost



CCD

- dynamický rozsah
- elektronická uzávěrka (IL)
- změna rychlosti a dynamického rozsahu
- sdružování pixelů
- nelineární analogové zpracování
- možnost přetečení



CMOS

- elektronická uzávěrka
neuniformní a uniformní
- windowing
- řízení napětí a časování
- méně energeticky náročné
- menší úniky energie
- spolehlivé
- možnost integrace



- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory**
 - EM-CCD
 - Intenzifikátor obrazu
 - iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
 - Streak kamera
 - Šum CCD, EM-CCD a iCCD
- 9 Detekce jednotlivých fotonů

Poziční jednofotonové detektory

EM-CCD speciální kamery s elektronovou multiplikací
intenzifikátory obrazu zesilovače světla zachovávající informaci o
poloze dopadu

iCCD intenzifikovaná CCD kamera

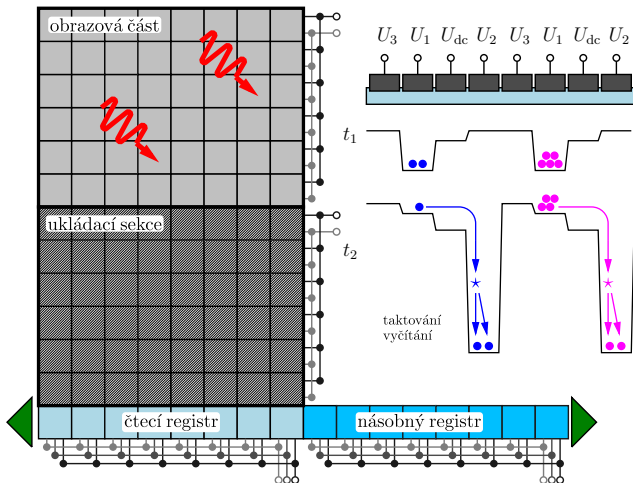
Fotonásobiče MCP, kovové kanálky a síťový typ s multianodou



Obsah

- 8 Poziční jednofotonové detektory
 - EM-CCD
 - Princip
 - Šum
 - Laboratorní kamera

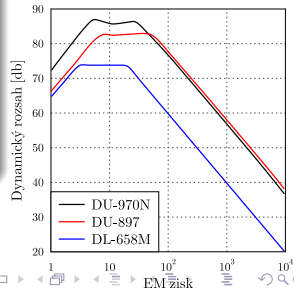
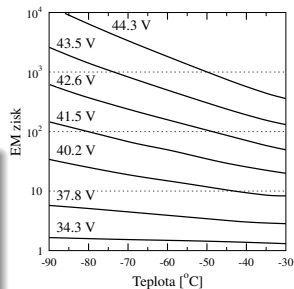
Princip EM-CCD



- EM přímo na čip za čtecím registrem
- většinou FT architektura
- překonání odečítacího šumu

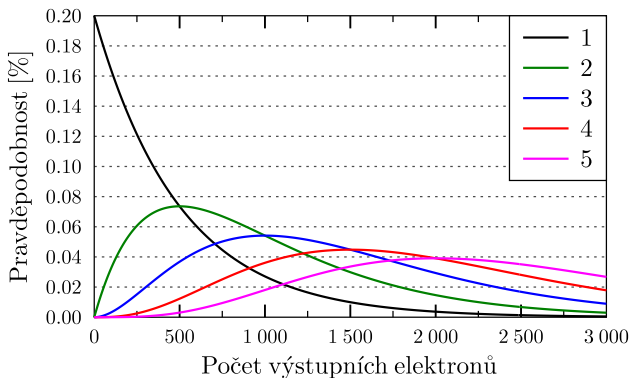
Násobný registr EM-CCD

- série hlubších potenciálových jam
- množení elektronů nárazovou ionizací (až 1 000x)
- informace o původním počtu elektronů se "zašumí"
- zisk závisí na teplotě a velikosti napětí
- velký zisk omezuje dynamický rozsah – omezená kapacita pixelů



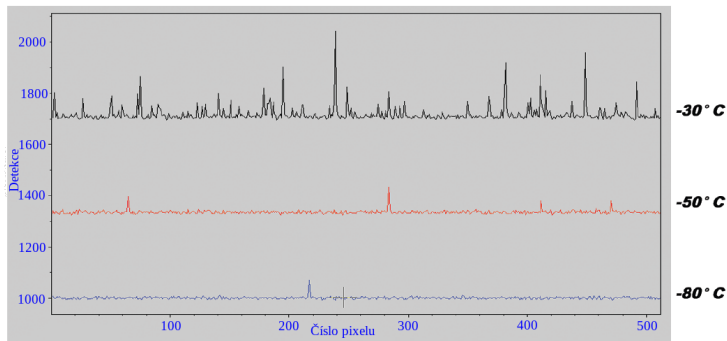
Čítání fotonů u EM-CCD

- zesílení $> 30x$, po odečtením šumové hladiny
- počet fotonů ale neurčíme – statistiky se překrývají



Šum EM-CCD

- odečítací, termální a šum světelného signálu +
- σ_{cic}^2 – šum indukovaný přesunem náboje (*Clock Induced Charge*), u běžné CCD zanedbatelný (cca 0.05 elektronů na pixel)
- u EM-CCD je vynásoben zesílením až 1 000krát



Andor iXon Ultra 888 Back-Illuminated EMCCD

rozlišení	1 024 × 1 024
velikost pixelu	13 μm × 13 μm
kapacita pixelu aktivního	80 ke ⁻
kapacita pixelu násobného	730 ke ⁻
odečítací šum bez EM	49 e ⁻ (10 MHz)
EM zisk	1-1 000×
maximální η	92.5 % @ 580 nm
temný proud [e ⁻ /px/s]	0.000 11 (-95 °C)
falešné detekce na pixel	0.005
AD převodník	16ti bitový



Obsah

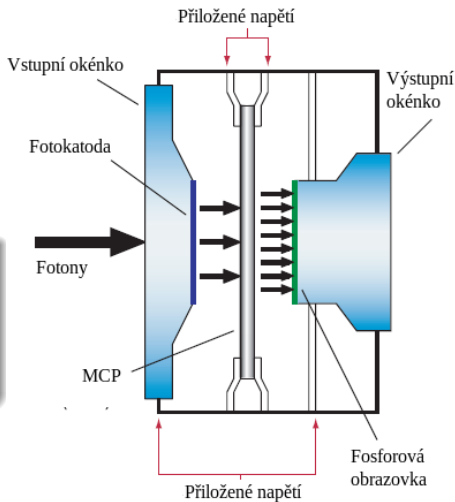
- 8 Poziční jednofotonové detektory
 - Intenzifikátor obrazu

Intenzifikátor obrazu

znásobí intenzitu světelného signálu, ale zachová informaci o poloze

Typická sestava

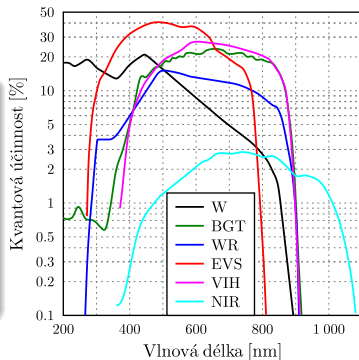
- 1 fotokatoda
- 2 mikrokanálková destička
- 3 fosforová obrazovka



2. Generace intenzifikátorů obrazu

GEN II

- bialkalické nebo multialkalické fotokatody na křemenném skle
- použitelné v krátkovlnné oblasti spektra (UV a VIS)
- rychlost závěrky okolo 50 ns



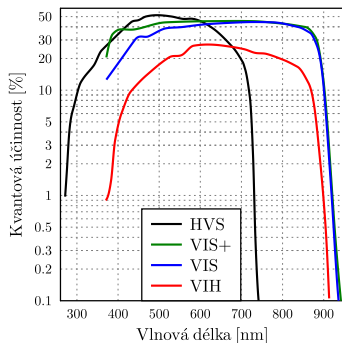
3. Generace intenzifikátorů obrazu

GEN III

- GaAs fotokatoda na běžném skle
- použitelné ve VIS a blízké IČ oblasti

Filmed krycí ochranná vrstva z hliníku
vyšší pracovní napětí
rychlost elektronické závěrky
5 ns

Filmless bez krycí vrstvy
rychlost závěrky 2 ns
speciální konstrukce i pod 1 ns

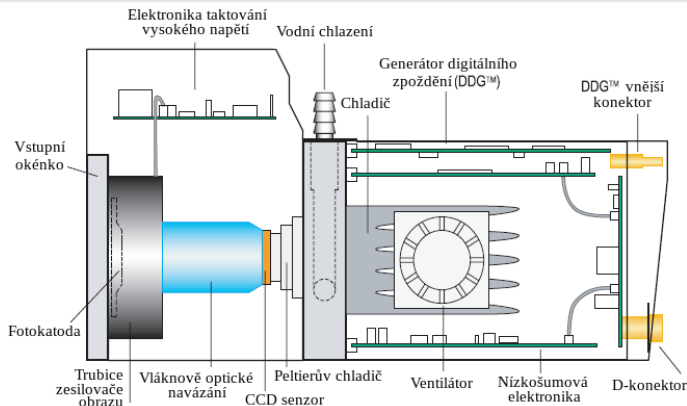


Obsah

- 8 Poziční jednofotonové detektory
 - iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
 - Princip
 - Laboratorní kamery

iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera

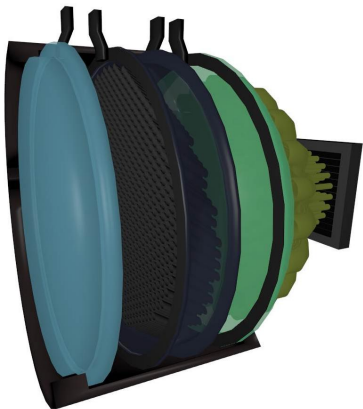
- intenzifikátor obrazu + chlazený CCD čip + nízkošumová elektr.
- malá opakovací frekvence 50 až 500 kHz
- zesílení je dáno pevným napětím na MCP



Kvantová účinnost iCCD

prvky ovlivňující celkovou kvantovou účinnost:

- 1 kvantová účinnost fotokatody
 - 2 ztráty při přenosu elektronů v zesilovací části
 - 3 účinnost navázání do svazku optických vláken
 - 4 kvantová účinnost CCD čipu
- ⇒ výsledná hodnota 5-20 %



Laboratorní kamery

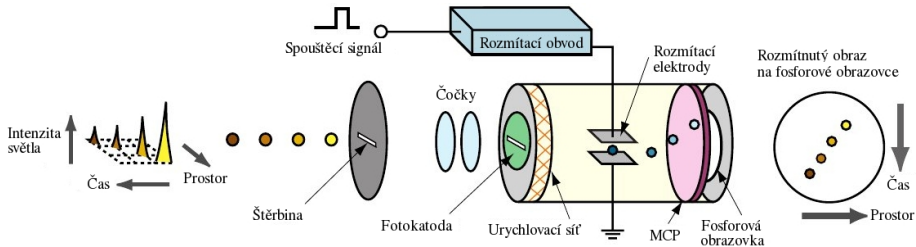
kamera	Andor DH 735	PI-MAX 512	Andor CMOS
rozlišení	1 024 × 1 024	512 × 512	2 560 × 2 160
hrana pixelu [μm]	13	19	6.5
spek. rozsah [nm]	265-740	500-900	300-800
η_{max} [%]	~ 20	~ 5	40
pro [nm]	500	600	500



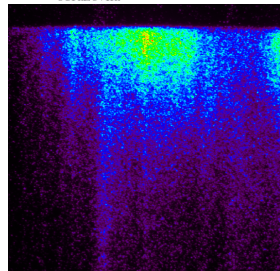
Obsah

- 8 Poziční jednofotonové detektory
 - Streak kamera

Streak kamera



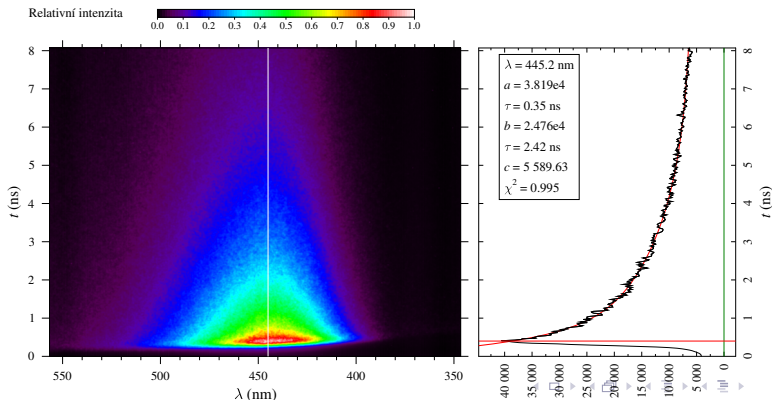
- kamera s časovým rozlišením (až 1 ps)
- štěrba v horizontálním směru
- časově závislá změna vychýlení ve vertikálním směru
- často v kombinaci se spektrometrem



Hamamatsu C10910



- časové rozlišení 1 ps až 1 ms
- spektrální rozsah 230-900 nm
- jednofotonová citlivost
- spektroskopie s časovým rozlišením



Obsah

- 8 Poziční jednofotonové detektory
 - Šum CCD, EM-CCD a ICCD

Šum CCD, EM-CCD a iCCD

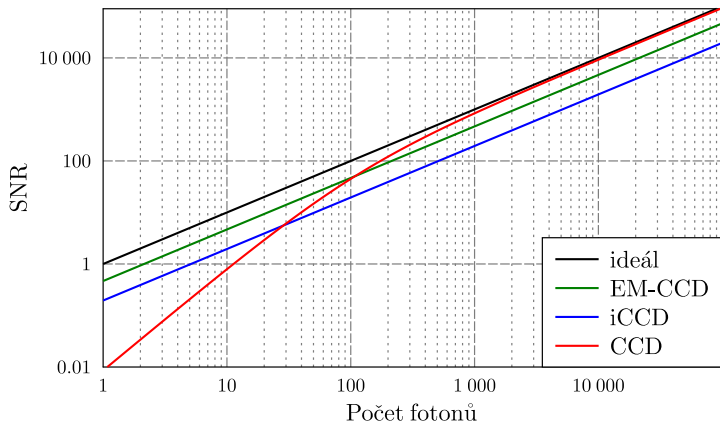
$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ro}^2 + F^2 G^2 (\sigma_d^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{cic}^2)}$$

Poissonovský signál $\eta G \bar{n} \Rightarrow$

$$\text{SNR} = \frac{(\eta G \bar{n})^2}{\sigma^2} = \frac{(\eta G \bar{n})^2}{\sigma_{ro}^2 + F^2 G^2 (\sigma_d^2 + \eta \bar{n} + \sigma_{cic}^2)}$$

		Ideál	CCD	EM-CCD	iCCD
kvantová účinnost	η	1	0.93	0.93	0.50
zisk	G	1	1	1 000	1 000
faktor zvýšení šumu	F	1	1	1.41	1.6
odečítací šum	σ_{ro}	0	10	60	20
temný šum	σ_d	0	0.001	0.001	0.001
CIC šum	σ_{cic}	0	0.05	0.005	0

- pro silné signály nad 100 fotonů na pixel je nejlepší CCD
- pro slabší signály vyniká EM-CCD
- pro jednofotonové aplikace, kdy záleží na každé události, je nejlépe použít iCCD



- 1 Úvod
- 2 Zdroje světla
- 3 Rozdělení detektorů
- 4 Vnitřní fotoefekt
- 5 Šum detektoru
- 6 Vnější fotoelektrický jev
- 7 Maticové detektory CCD a CMOS
- 8 Poziční jednofotonové detektory
- 9 Detekce jednotlivých fotonů**
 - Vlastnosti kvantových detektorů
 - Metody měření kvantové účinnosti
 - Přehled fotonových detektorů
 - Multimodové binární detektory

Kvantové detektory

dokáží rozlišovat jednotlivá kvanta elektromagnetického záření –

FOTONY

Využití

- v astronomii při sledování vzdálených kosmických objektů o malém světelném výkonu
- v částicové fyzice
- v biomedicíně
- při měření znečištění atmosféry
- **v kvantové optice**

Obsah

- 9 Detekce jednotlivých fotonů
 - Vlastnosti kvantových detektorů

Vlastnosti kvantových detektorů

Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

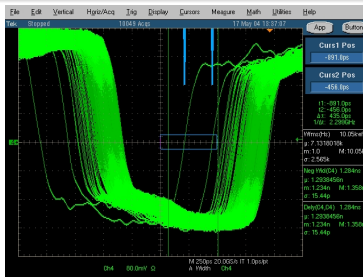
- časový interval po detekci fotonu, po který není detektor schopen zaregistrovat další foton
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů je uměle prodloužena – zmenšení pravděpodobnosti následné falešné detekce (*afterpulsing*, zachycení náboje z předchozí detekce na nečistotách v materiálu)
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu

Temné detekce D (*Dark counts*)

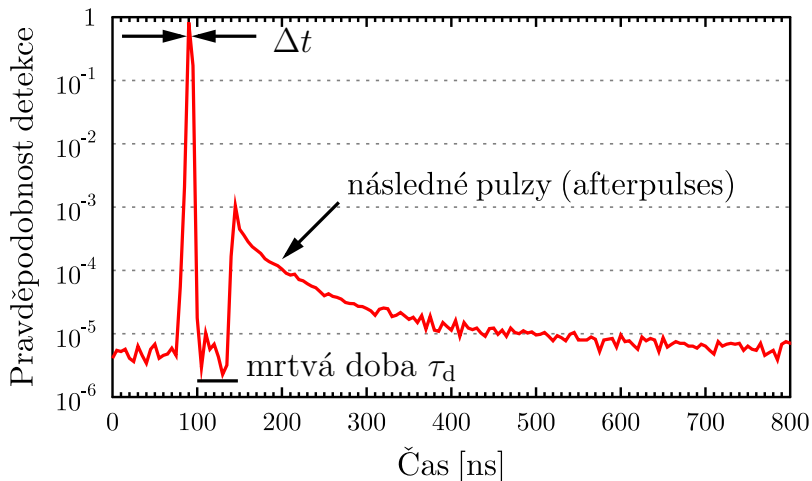
- falešné detekční události při zacloněném senzoru (analogie temného proudu)
- zdrojem termální excitace – chlazení
- někdy do nich můžeme zahrnout i šum světelného pozadí

Časová nejistota vzniku proudového pulsu Δt (*Timing jitter*)

- časový interval, ve kterém se po dopadu fotonu na detektor nachází náběžná hrana elektrického výstupního pulsu
- lze určit porovnáním časů detekce s rychlou fotodiodou
- může ovlivnit výsledky měření, pokud je opakovací frekvence při měření tak velká, že se začnou překrývat výstupní proudové pulsy



Časový histogram detektoru APD

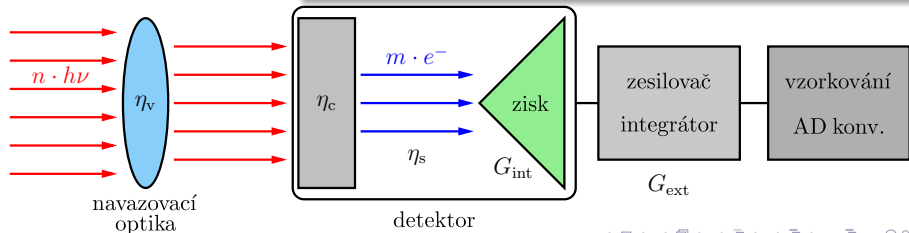


Kvantová účinnost η

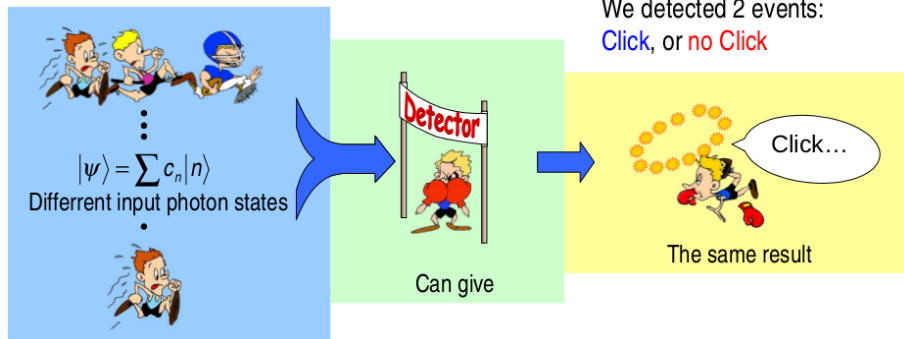
- nejsledovanější parametr
- poměr počtu výstupních pulzů ku počtu dopadajících fotonů

Faktory ovlivňující kvantovou účinnost

- účinnost vstupní optiky
- navázání do materiálu detektoru
- účinnost konverze z fotonu na fotoelektron
- účinnost sběru fotoelektronů
- zesílení
- diskriminace (fotonová událost \times šum)



Binární detektor



©Martin Hamar

Obsah

- 9 Detekce jednotlivých fotonů
 - Metody měření kvantové účinnosti

Metody měření kvantové účinnosti

Měření odezvy kalibrovaného zdroje

$$\frac{n_s - D}{n_{in}}$$

nemáme kalibrované zdroje pro jednofotonové intenzity (zatím)

Porovnání s kalibrovaným „kvantovým“ detektorem

porovnání odezvy pro stejný jednofotonový zdroj



Porovnání s kalibrovaným „klasickým“ detektorem

- změření intenzity zdroje Φ_r pomocí kalibrovaného detektoru
- definovaný utlum intenzity na kvantovou úroveň pomocí kalibrovaných filtrů – $\mathbf{T}\Phi_r$
- změření fotonového toku n_s na měřeném detektoru
- pro kontinuální zdroje s Poissonovou statistikou
 - D a τ_d zanedbatelné, potom $n_s = \frac{1 - e^{-\mathbf{T}\Phi_r \eta}}{\tau_d} \approx \frac{\mathbf{T}\Phi_r \eta}{\tau_d} \rightarrow \eta \approx \frac{n_s \tau_d}{\mathbf{T}\Phi_r}$
 - v reálném případě

$$\eta = \frac{\tau_d}{\mathbf{T}\Phi_r} \left(\frac{n_s}{1 - n_s \tau_d} - \frac{D}{1 - D \tau_d} \right)$$

- pro pulzní zdroj o frekvenci f : $\eta = \frac{1}{\mathbf{T}\Phi_r f} \left(\frac{n_s}{1 - n_s \tau_d} - \frac{D}{1 - D \tau_d} \right)$

Obsah

- 9 Detekce jednotlivých fotonů
 - Přehled fotonových detektorů
 - Lavinová fotodioda v Geigerově módu
 - Speciální fotonásobič
 - Hybridní fotodetektor
 - Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti – TES
 - Supravodivá nanovlákna

Rozdělení detektorů

Klasické detektory

- velká η ale i velký šum
- nedokáže zaznamenat detekci jednotlivých fotonů (PIN fotodiody)

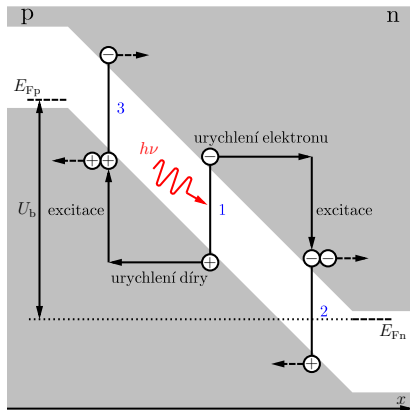
Binární kvantové detektory

- dobrá η , velmi nízký temný šum ale velký zesilovací šum
- mají jednofotonovou citlivost ale nerozlišují počty fotonů (APD a většina fotonásobičů)

Kvantové detektory s rozlišením počtu

- malý zesilovací šum – výstupní proudový signál (počet elektronů) úměrný počtu fotonů
- nebo multiplex binárních jednofotonových detektorů

Lavinová fotodioda v Geigerově módu



- p-n nebo p-i-n přechod
- $V > V_{\text{break}}$
- lavinové násobení nosičů náboje
- aktivní a pasivní zhášení – délka mrtvé doby

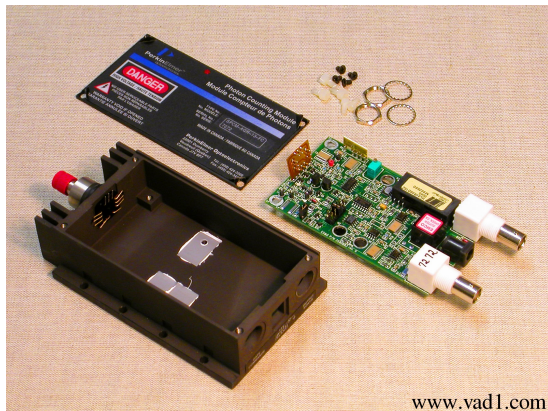
Materiály

VIS Si, 400-1 000 nm, $\eta_{\text{max}} = 75\%$, $D < 100$ /s

NIR Ge, InGaAs/InP, $\eta_{\text{max}} \sim 20\%$, $D \sim 5\,000$ /s, pomalejší

SPCM – *Single photon counting module*

Perkin-Elmer EG&G Canada SPCM-AQR-14(-FC)



- $\eta_{\max} \sim 73\%$ na 700 nm
- $D < 100$ /s
- maximální opakovací frekvence 16 Mcounts/s

Speciální fotonásobič

Fotonásobič s binární odezvou

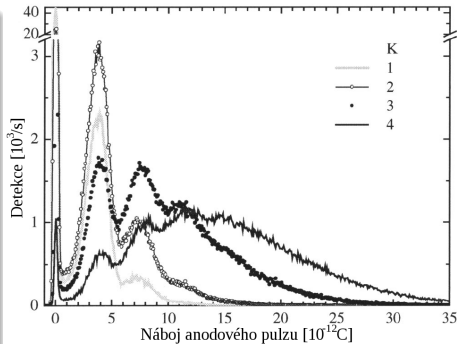
poprvé roku 1949, velká aktivní plocha ($\varnothing > 1 \text{ cm}$)

VIS GaAsP, $\eta = 40 \%$ na 500 nm, $D = 100 \text{ Hz}$, $\Delta t = 300 \text{ ps}$

NIR InP/InGaAs, $\eta = 2 \%$ na 1 550 nm, $D = 200 \text{ kHz}$, $\Delta t = 300 \text{ ps}$,
navíc chlazení na 200 K

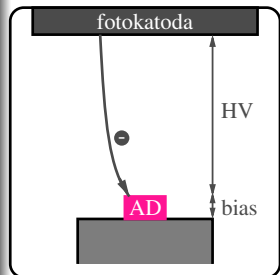
Rozlišení počtu fotonů

- od 1968, malé počty
- první dynoda (GaP:Cs) – vysoký zisk, další malý
- Burle 8850 (Burle Electron Tubes, Lancaster, PA)
 $\eta \approx 23 \%$
- Zambra et al., Rev. Sci. Instr. **75**, 2762 (2004)

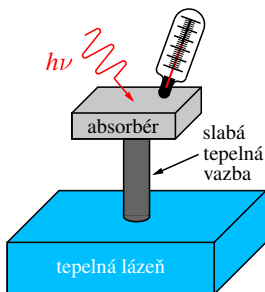


Hybridní fotodetektor

- kombinace fotonásobiče (fotokatoda) a lavinové diody
- dvojestupňové zesílení
 - 1 elektronové bombardování, HV – 8 kV, $G = 1\,550$
 - 2 lavinové zesílení, bias 400 V, $G = 30$
- velká aktivní plocha
- více diod → zobrazování
- potřeba vysokého napětí a nízkošumového zesilovače
- $\eta_{max} = 46\% @ 500\text{ nm}$,
 $\eta > 10\%$ od 300 do 730 nm
- $D \sim 1\text{ kHz}$, $\Delta t \approx 35\text{ ps}$
- dobré časové rozlišení (1 ns)



TES – Transition Edge Sensor



Mikrokalorimetr na hraně supravodivosti

- nárůst teploty → změna odporu
- teplota supravodivosti $T_c = 125$ mK
- tenký wolframový film $25 \times 25 \times 0.035 \mu\text{m}^3$ na Si substrátu s Al konektory
- širokospektrální, nutná kalibrace podle energie fotonů ($E = hc/\lambda$)

Kvantová účinnost

- teoreticky 80 %, v praxi 20 % (pro 1 550 a 1 310 nm)
- optická past nebo rezonátoru – $\eta \rightarrow 95$ %
- malá absorpce, velká odrazivost

Supravodivá nanovlákna *Superconducting nanowires*

Nanovlákno

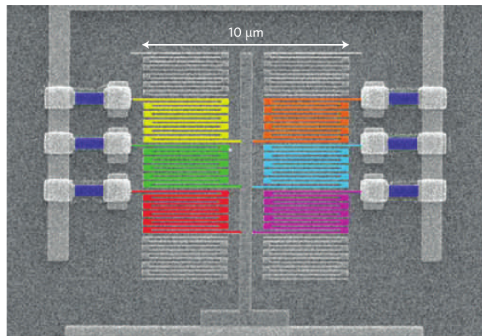
- vytvořeno litograficky z NbN, NbTiN nebo MoSi
- tvar a velikost meandrů optimalizována pro největší absorpci
- lze integrovat na vlnovodnou strukturu

Princip

- podobný jako u TES
- binární, fotonového rozlišení prostorovou multiplexací

Goltsman *et al.*, App. Phys. Lett. **79**, 705 (2001)

Marsili *et al.*, New J. Phys. **11**, 045022 (2009)



Obsah

- 9 Detekce jednotlivých fotonů
 - Multimodové binární detektory
 - Smyčkové detektory
 - Masivně multikanálové detektory

Princip multiplexace

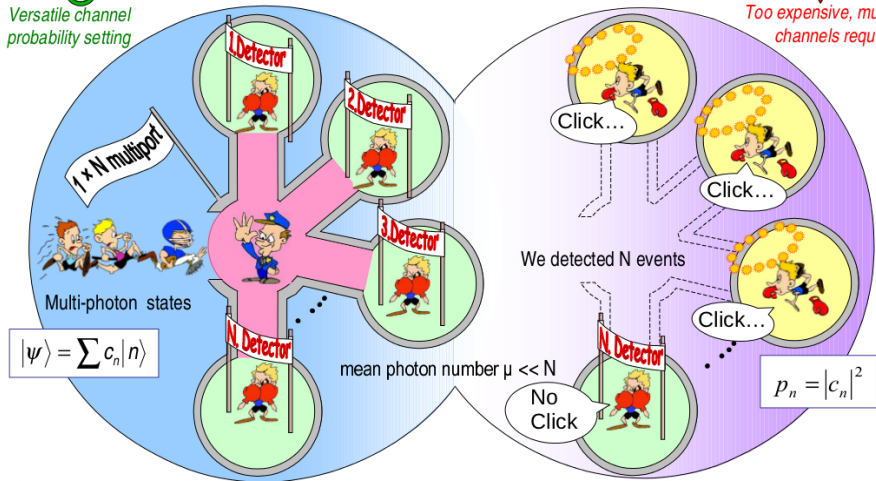


Versatile channel probability setting

Gradual division with fiber splitters using N detectors



Too expensive, multiple channels required

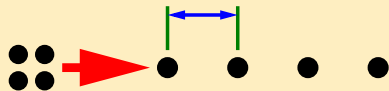


©Martin Hamar

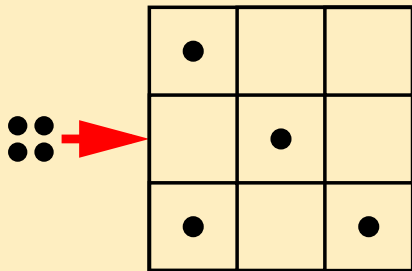
Časové a prostorové rozdělení

Časové rozdělení

$t > \text{mrtvá doba}$

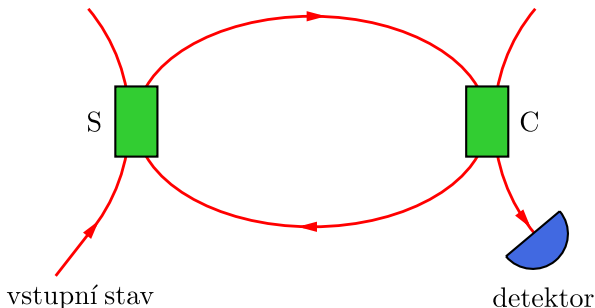


Prostorové rozdělení



- více módů než fotonů
- nenulová pravděpodobnost více fotonů do jednoho módu → rekonstrukce původní statistiky počtu fotonů

Smyčkové detektory



- rozdělení signálního pulzu do částí s intenzitou ≤ 1 foton/pulz
- pro ideální rekonstrukci fotonpulzní statistiky stejná intenzita pulzů
- zpoždění $>$ mrtvá doba detektoru
- konstrukce s rychlým (50 ns) optickým přepínačem nebo bez

Masivně multikanálové detektory

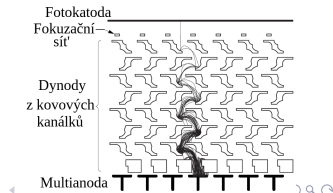
prostorové rozptření optického signálu na matici jednofotonových detektorů

Detektory

MPPC matice lavinových fotodiod

EMCCD CCD kamera s elektronovou multiplikací

iCCD CCD kamera se zesilovačem obrazu
fotonásobiče s multianodou



MPPC – *Multi photon counting module*

- matice APD se společnou elektronikou
- temné detekce součtem ze všech APD
- přeslech mezi kanály
- různé názvy - MPPC (Hamamatsu), Silicon photomultiplier (Ketek), Solid State photomultiplier (RMD)

