

Detekce světla – Detekce jednotlivých fotonů

Antonín Černoch Jan Soubusta Ondřej Haderka

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



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

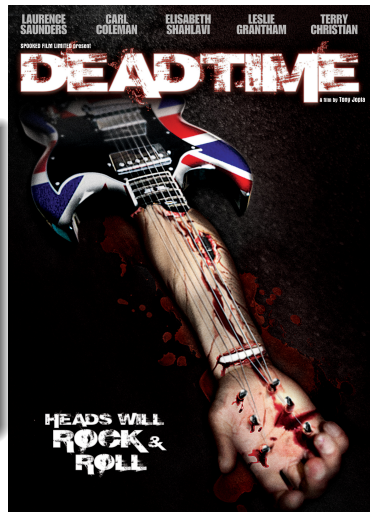
- 1 Vlastnosti kvantových detektorů
 - Metody měření kvantové účinnosti
- 2 Hodnocení kvality detektoru
- 3 Přehled fotonových detektorů
- 4 Multimodové binární detektory

Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

- časový interval po detekci, kdy je detektor 'slepý'
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů ještě prodloužen kvůli *afterpulsům*
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu

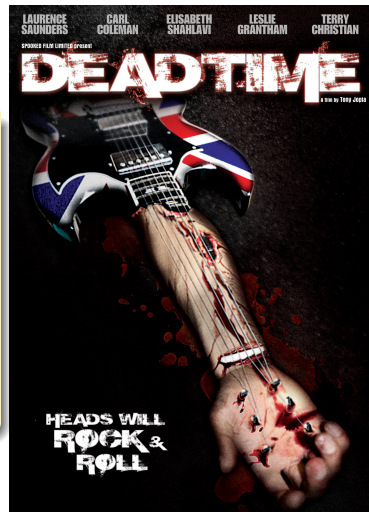
Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

- časový interval po detekci, kdy je detektor 'slepý'
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů ještě prodloužen kvůli *afterpulsům*
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu



Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

- časový interval po detekci, kdy je detektor 'slepý'
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů ještě prodloužen kvůli *afterpulsům*
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu



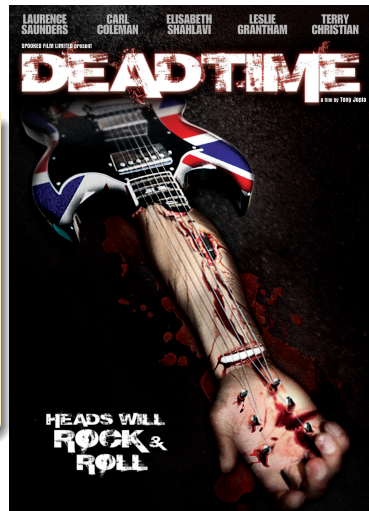
Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

- časový interval po detekci, kdy je detektor 'slepý'
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů ještě prodloužen kvůli *afterpulsům*
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu

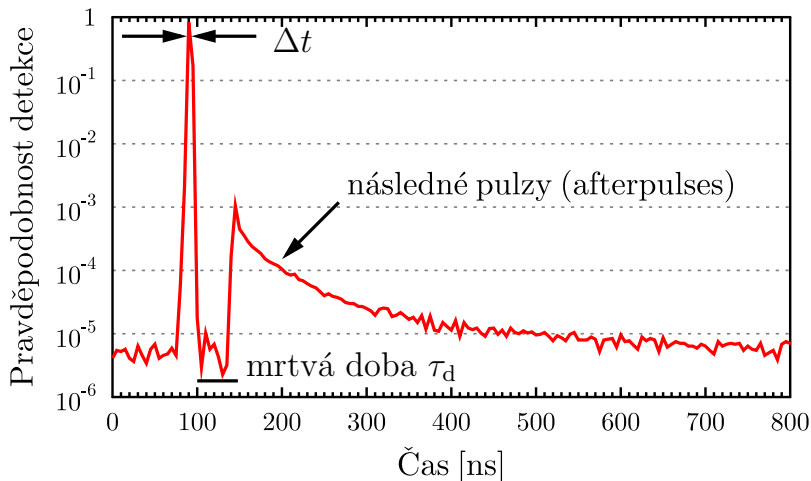


Mrtvá doba τ_d (*Dead time*)

- časový interval po detekci, kdy je detektor 'slepý'
- závisí hlavně na typu detektoru a jeho elektrických obvodů
- u polovodičových detektorů ještě prodloužen kvůli *afterpulsům*
- omezuje operační frekvenci detektoru na $1/\tau_d$ detekcí za sekundu



Mrtvá doba × Následné pulzy



Temné detekce D (*Dark counts*)

- falešné detekční události při začleněném senzoru
- zdroj termální excitace → chlazení
- někdy do nich můžeme zahrnout i šum světelného pozadí
- mohou být potlačeny časováním (*triggering*)

Temné detekce D (*Dark counts*)

- falešné detekční události při začleněném senzoru
- zdrojem termální excitace → chlazení
- někdy do nich můžeme zahrnout i šum světelného pozadí
- mohou být potlačeny časováním (*triggering*)

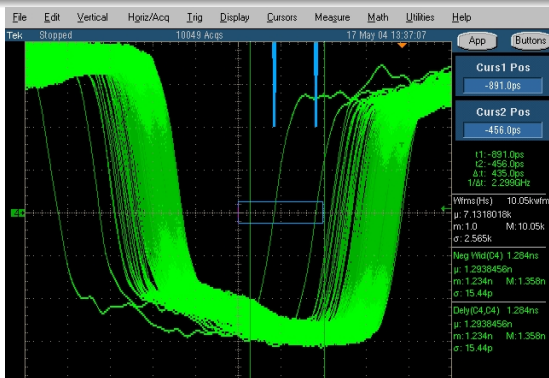


Časová nejistota vzniku proudového pulsu Δt (*Timing jitter*)

- nejistota vzniku výstupního pulzu
- lze určit porovnáním časů detekce s rychlou fotodiodou
- vysoká frekvence děje $\rightarrow$ mohou se překrývat výstupní pulzy

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

- nejistota vzniku výstupního pulzu
- lze určit porovnáním časů detekce s rychlou fotodiodou
- vysoká frekvence děje $\rightarrow$ mohou se překrývat výstupní pulzy



Kvantová účinnost η

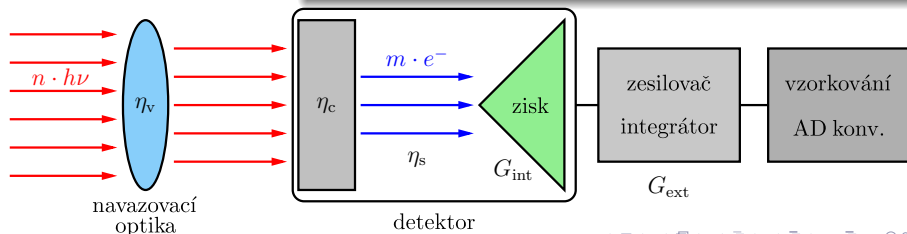
- nejsledovanější parametr
- poměr počtu výstupních pulzů ku počtu dopadajících fotonů

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)



Měření odezvy kalibrovaného zdroje

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



Metody měření kvantové účinnosti

Měření odezvy kalibrovaného zdroje

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

nemáme kalibrované zdroje pro jednofotonové intenzity (zatím)



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

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

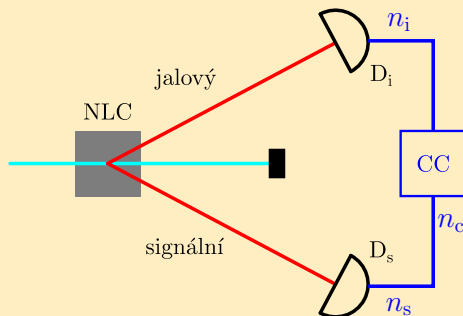
- pro pulzní zdroj o frekvenci f : $\eta = \frac{1}{\mathbf{T}\Phi_r f} \left(\frac{n_s}{1 - n_s \tau_d} - \frac{D}{1 - D \tau_d} \right)$

Metoda korelovaných párů fotonů

Procesem spontánní sestupné parametrické konverze v nelineárním krystalu vygenerováno X fotonových párů za určitý čas.

- měřený detektor – $n_s = \eta_s X$
- pomocný detektor – $n_i = \eta_i X$
- počet současných detekcí (koincidencí) – $n_c = \eta_s \eta_i X$

$$\eta_s = \frac{n_c}{n_i}$$



Kvantová účinnost určena včetně vlivu optické soustavy vedoucí signál na detektor.

Obsah

- 1 Vlastnosti kvantových detektorů
- 2 Hodnocení kvality detektoru**
- 3 Přehled fotonových detektorů
- 4 Multimodové binární detektory

Popis šumu

- můžeme použít SNR, NEP nebo i BER
- nicméně tyto veličiny nepopisují všechny vlastnosti, které detektor má
- vymyslete si svůj parametr, který započítá ty vlastnosti, na kterých vám záleží



Energie odpovídající šumu – NEE

$$\text{NEE} = \frac{hc}{\lambda\eta} \sqrt{2D} [\text{J}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

- čím menší, tím je detektor lepší
- nepopisuje časové vlastnosti, temné detekce mohou být redukovány časováním, kde ale začne mít vliv jitter

Energie odpovídající šumu – NEE

$$NEE = \frac{hc}{\lambda\eta} \sqrt{2D} [\text{J}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

- čím menší, tím je detektor lepší
- nepopisuje časové vlastnosti, temné detekce mohou být redukovány časováním, kde ale začne mít vliv jitter

Faktor efektivity – H

$$H = \frac{\eta}{D\Delta t}$$

čím vyšší, tím je detektor lepší

Energie odpovídající šumu – NEE

$$NEE = \frac{hc}{\lambda\eta} \sqrt{2D} [\text{J}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

- čím menší, tím je detektor lepší
- nepopisuje časové vlastnosti, temné detekce mohou být redukovány časováním, kde ale začne mít vliv jitter

Faktor efektivity – H

$$H = \frac{\eta}{D\Delta t}$$

čím vyšší, tím je detektor lepší

Ekvivalentní počet kanálů – ENC

$$\text{ENC} \propto \eta n (1 - D\Delta t)$$

stejně vlastnosti všech n kanálů

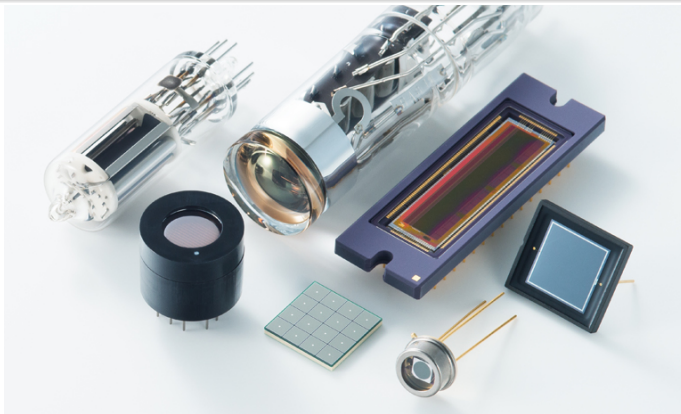
Obsah

- 1 Vlastnosti kvantových detektorů
- 2 Hodnocení kvality detektoru
- 3 Přehled fotonových detektorů
 - Lavinová fotodioda v Geigerově módu
 - Speciální fotonásobič
 - Hybridní fotodetektor
 - VLPC
 - Mrak atomů
 - Ostatní
- 4 Multimodové binární detektory

Rozdělení detektorů s ohledem na šum při zesílení

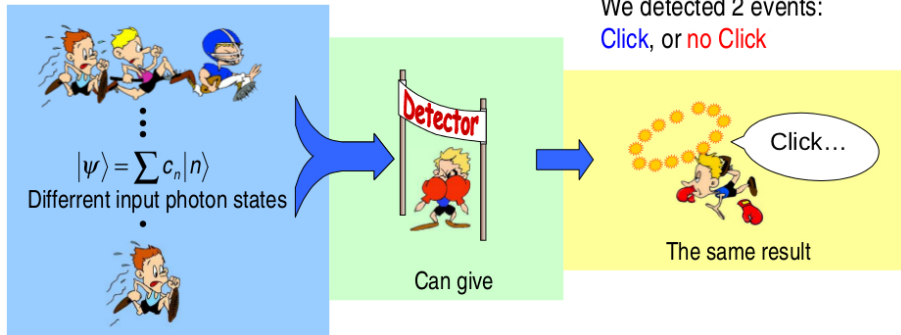
Klasické detektory

- velká η ale i velký šum (temný, odečítací, zesílení)
- nedokáže rozeznat detekci jednotlivých fotonů



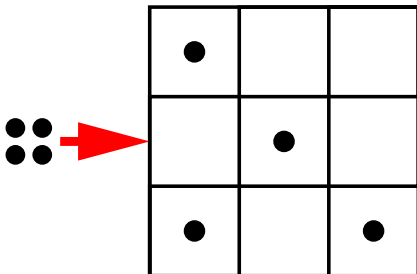
Binární kvantové detektor

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

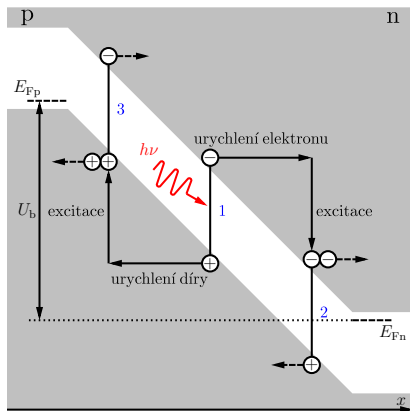


Kvantové detektory s rozlišením počtu

- 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

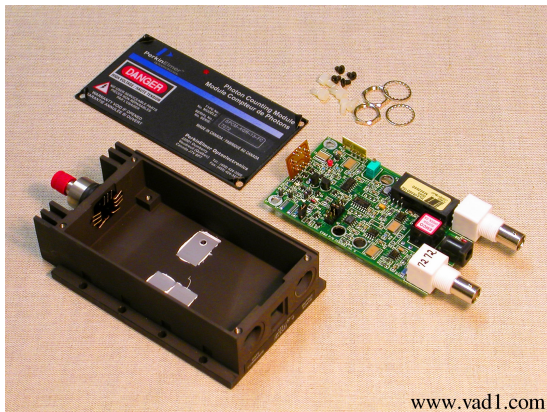
Materiály

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

Optimalizované APD

APD optimalizovaná na η

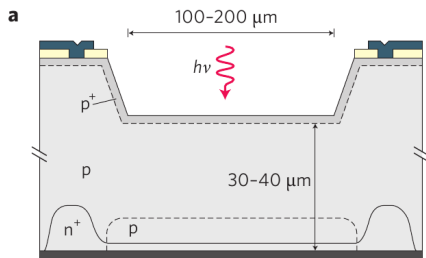
aktivní oblast $200\ \mu\text{m}$

η_{max} 70 % pro 650 nm

$D \sim 25\ \text{Hz}$

$\tau_d \sim 50\ \text{ns}$

$\Delta t \sim 400\ \text{ps}$

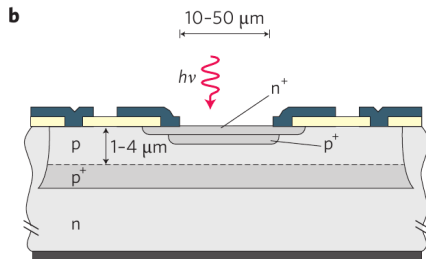


shallow-junction APD

aktivní oblast $50\ \mu\text{m}$

η_{max} 49 % pro 550 nm

$\Delta t < 40\ \text{ps}$



APD pro blízkou IČ

vláknové telekomunikace 1.3 až 1.6 μm

Ge a InGaAs APD

- menší kvantová účinnost cca 20 %
- menší průměr $\sim 40 \mu\text{m}$
- chlazení až na 200 K, trigrování – $D \sim 10 \text{ kHz}$
- $\tau_D \sim 10 \mu\text{s}$ omezuje maximální počet detekcí na 100 kHz

APD pro blízkou IČ

vláknové telekomunikace 1.3 až 1.6 μm

Ge a InGaAs APD

- menší kvantová účinnost cca 20 %
- menší průměr $\sim 40 \mu\text{m}$
- chlazení až na 200 K, trigrování – $D \sim 10 \text{ kHz}$
- $\tau_D \sim 10 \mu\text{s}$ omezuje maximální počet detekcí na 100 kHz

Vzestupná frekvenční konverze do viditelné oblasti

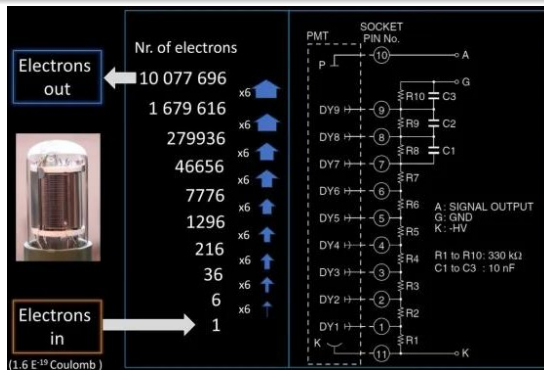
- $\nu_{\text{pump}} + \nu_{\text{NIR}} \rightarrow \nu_{\text{VIS}}$, čerpací laser Nd:YAG, 1 550 nm $\rightarrow$ 630 nm
- účinnost konverze podle výkonu čerpání a nelineárního prostředí 50 až 90 % (v periodicky pólovaných strukturách)
- silné čerpání zdrojem šumu, $D \sim 13 \text{ kHz}$
- koherentní konverze, přenesl se kvantový stav

Fotonásobič s binární odezvou

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

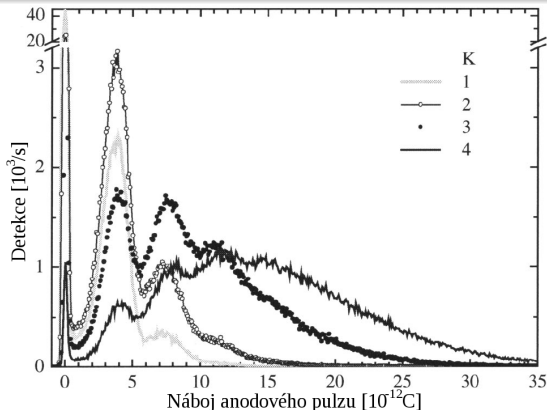
VIS GaAsP, $\eta = 40 \%$ na 500 nm, $D = 100 \text{ Hz}$, $\Delta t = 300 \text{ ps}$

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



Fotonásobič s rozlišením počtu fotonů

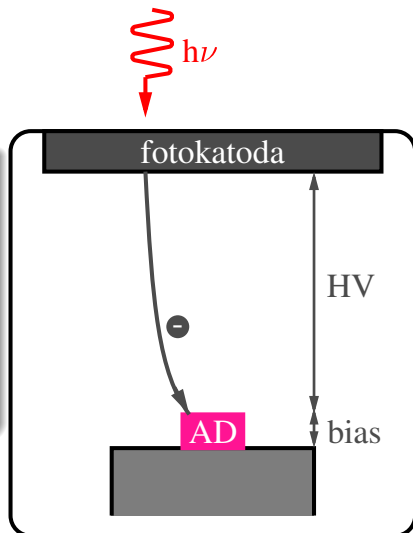
- od 1968, malé počty
- první dynoda (GaP:Cs) – vysoký zisk, další malý
- Burle 8850 (Burle Electron Tubes, Lancaster, PA) $\eta \approx 23\%$



Rev. Sci. Instr. **75**,
2762 (2004)

Hybridní fotodetektor

- kombinace fotonásobiče (fotokatoda) a lavinové diody
- dvojstupňové zesílení
- 1 elektronové bombardování, HV –8 kV, $G = 1\,550$
- 2 lavinové zesílení, bias 400 V, $G = 30$



Hybridní fotodetektor

Výhody

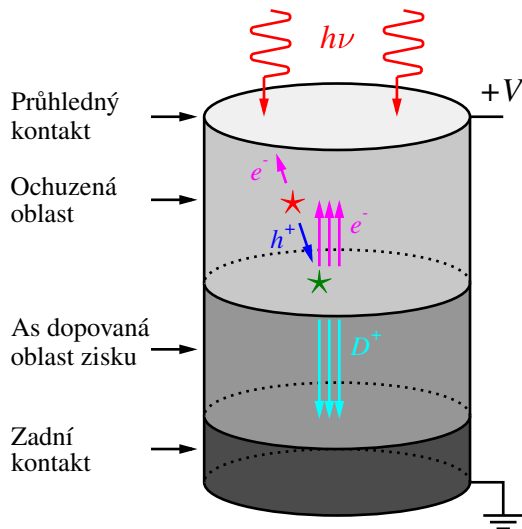
- velká aktivní plocha
- více diod → zobrazování
- dobré časové rozlišení (1 ns)



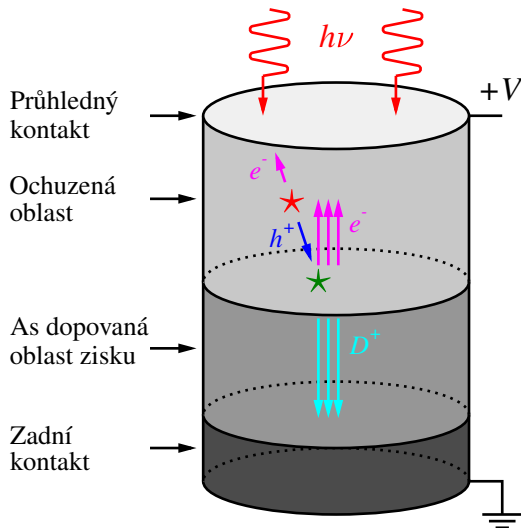
Nevýhody

- je potřeba generátor vysokého napětí
- drahý nízkošumového zesilovač
- $\eta_{max} = 46 \% @ 500 \text{ nm}$,
 $\eta > 10 \% \text{ od } 300 \text{ do } 730 \text{ nm}$
- $D \sim 1 \text{ kHz}$
- $\Delta t \approx 35 \text{ ps}$

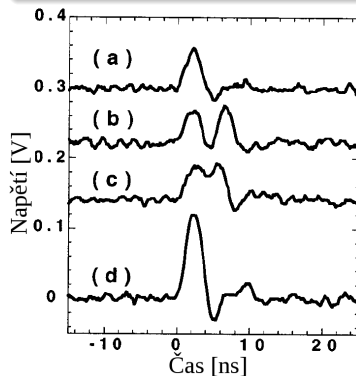
VLPC – *Visible Light Photon Counter*



VLPC – Visible Light Photon Counter



- lavina jen na $\varnothing 20\ \mu\text{m}$ detektor má $\varnothing 1\ \text{mm}$
- rozlišení až pěti fotonů
- η dvou fotonů jen 47 %



VLPC

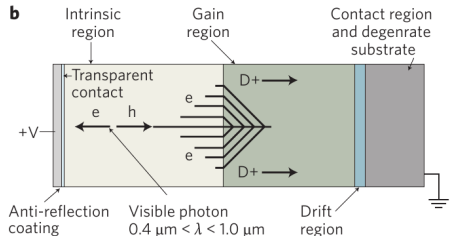
Výhody

- nevykazuje afterpulzy,
 $\tau_D \sim 100$ ns,
max. frekvence 10 MHz
- η – teoreticky 94 %
experimentálně 88 %
- bezšumové zesílení
 $F = 1$, $G \sim 10^4$
- malé napětí (6 až 7.5 V)
- dlouhá dráha mezi ionizacemi

App. Phys. Lett. **70**, 2852 (1997),
App. Phys. Lett. **74**, 902 (1999),
App. Phys. Lett. **74**, 1063 (1999)

Nevýhody

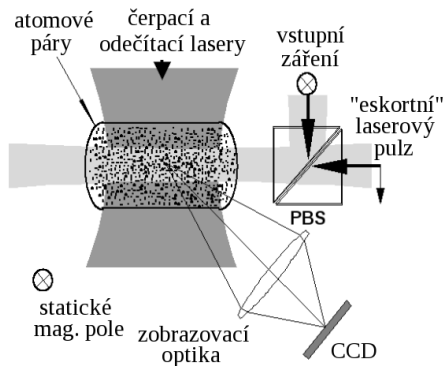
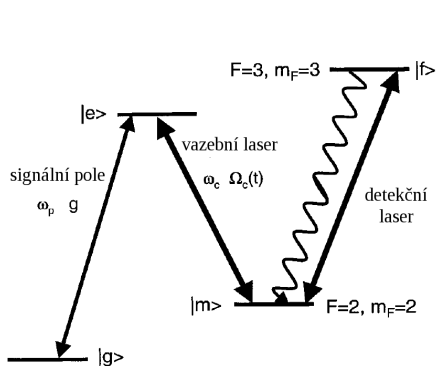
- citlivost na termální záření do
28 μm – kryostat na 6.9 K
- $D \approx 10^4$ Hz roste s η
($\eta \sim$ závěrné napětím)
a s teplotou (± 0.005 K)



Mrak atomů

Atomic vapour

- teoretická účinnost větší jak 99 % s rozlišením v počtu fotonů
- excitace signálním fotonem
- deexcitace eskortním laserovým pulzem – stabilní stav
- čtení atomů cyklickým přechodem



Mrak atomů – vlastnosti

Výhody

- rozlišení až 50 fotonů

Nevýhody

- atomy naladěny jen na jednu vlnovou délku
- magnetické pole k rozštěpení energetických hladin
- účinný průřez excitace signálním fotonem velmi malý – rezonátor
- experimentální účinnost 1/8
- chlazení až na 6 K – omezení termálních a kolizních excitací
- pohyb atomů – rozmazaný záznam na CCD
- temné detekce ~ 50 kHz

Imamoglu, Phys. Rev. Lett. **89**, 163602 (2002)

James, Kwiat, Phys. Rev. Lett. **89**, 183601 (2002)

Kvantové tečky a defekty

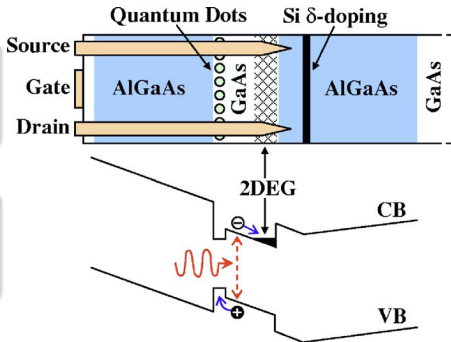
- zachycení náboje na poruše v heterostruktuře slitin polovodičů z III a V skupiny
- změna vodivosti na kontaktech

field-effect tranzistor

$\eta \sim 68\% @ 805 \text{ nm}$
rozlišení do 3 fotonů

rezonanční tunelovací dioda

$\eta \sim 12\% @ 550 \text{ nm}$
temné detekce $2 \times 10^{-3} \text{ Hz}$



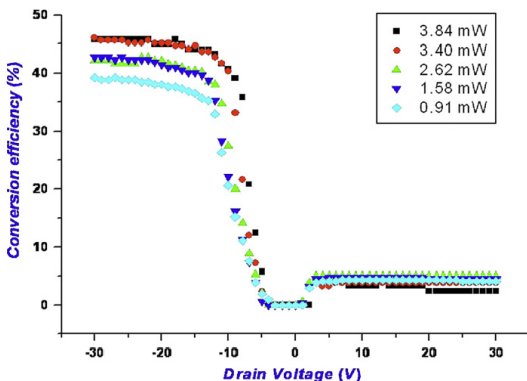
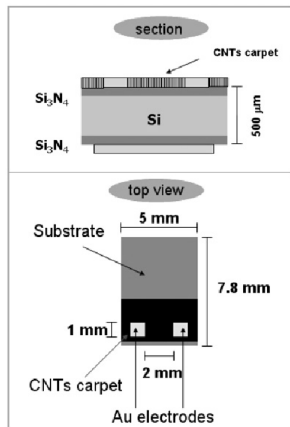
Appl. Phys. Lett. **89**, 253505 (2006)

Appl. Phys. Lett. **90**, 181114 (2007)

Phys. Rev. Lett. **94**, 067401 (2005)

Uhlíkové nanotrubičky

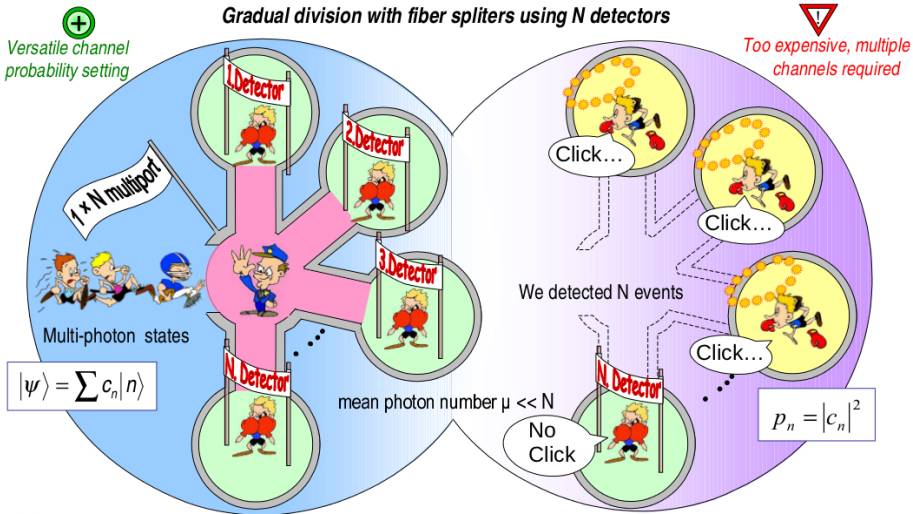
- mnohostěnné uhlíkové nanotrubičky rostlé na p-dopovaném křemíkovém substrátu
- struktura se chová jako fotodioda s účinností 50 %



Obsah

- 1 Vlastnosti kvantových detektorů
- 2 Hodnocení kvality detektoru
- 3 Přehled fotonových detektorů
- 4 Multimodové binární detektory
 - Smyčkové detektory
 - Masivně multikanálové detektory

Princip multiplexace

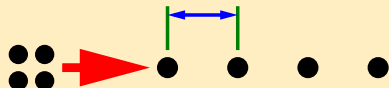


©Martin Hamar

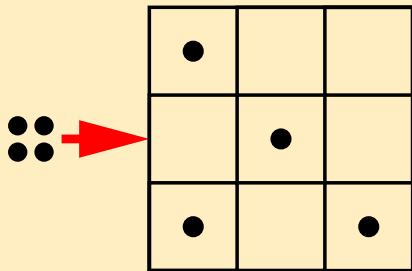
Časové a prostorové rozdělení

Časové rozdělení

$t > \text{mrtvá doba}$

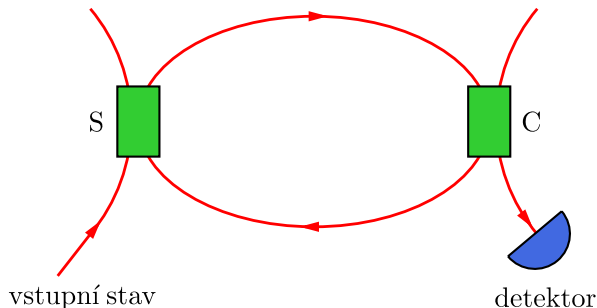


Prostorové rozdělení



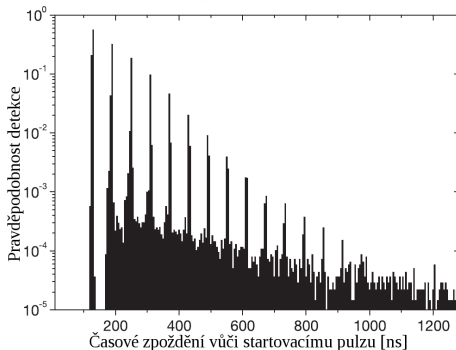
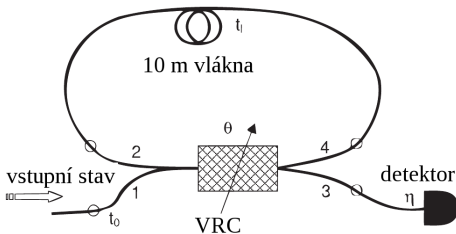
- více módů než fotonů
- nenulová pravděpodobnost více fotonů do jednoho módu → rekonstrukce původní statistiky počtu fotonů

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

Smyčkový detektor s VRC



Výhody

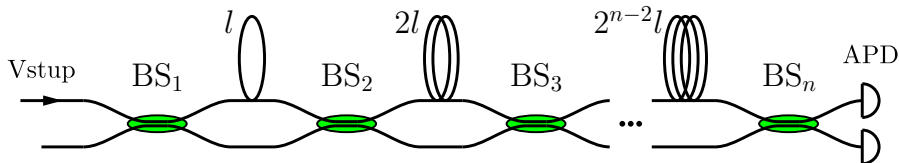
- jednoduché a levné
- počet módů ≈ 15 nad šumem
- možnost ladění dělicím poměrem VRC

Nevýhody

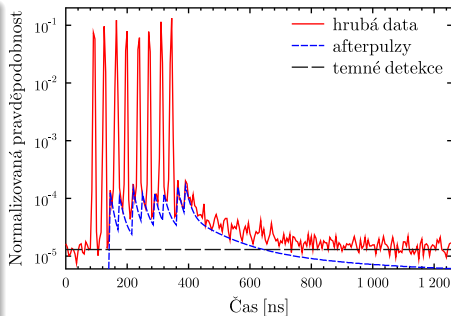
- sestupná tendence intenzit – zahrnutí do rekonstrukce
- limitovaný počet módů
- časová multiplexace snižuje opakovací frekvenci

Eur. Phys. J. D **28**, 149–154 (2004)

N-kanálový smyčkový detektor



- 2^{m-1} časových módů, celkem 2^m módů
- zpoždění odpovídající L větší než mrtvá doba
- dva detektory, výstupy sečteny (druhý zpožděn o půl mrtvé doby)
- více komponent $\rightarrow$ větší ztráty oproti smyčkovému detektoru



Masivně multikanálové detektory

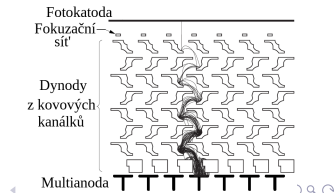
prostorové rozptřeni optického signálu na matici jednofotonových detektorů

Detektory

MPPC matice lavinových fotodiod

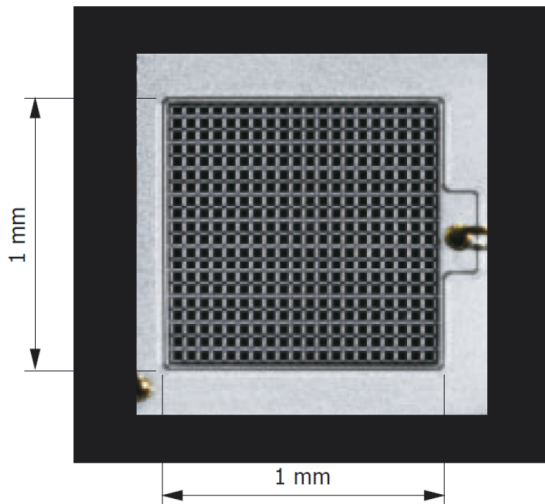
EMCCD CCD kamera s elektronovou multiplikací

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



MPPC Hamamatsu C11208-03

Parametry

- 10×10 pixelů o rozměrech $100 \times 100 \mu\text{m}^2$
- spektrální citlivost: 320-900 nm, maximum na 440 nm
- $\eta_{\text{max}} = 50 \% @440 \text{ nm}$, $D = 40\,000 \text{ s}$
- vnitřní chlazení na -10°C

