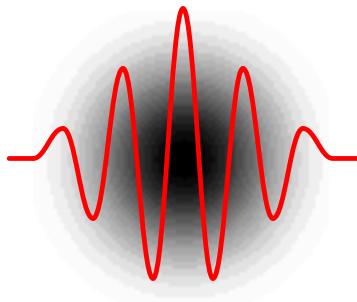


DETEKCE FOTONŮ

Antonín Černoch

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR



Obsah

- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování

Detekce světla

Detektor

Elektromagnetická energie na elektrický signál obsahující informaci o:

- intenzitě (počtu fotonů)
- časovém průběhu (délka a tvar pulzu)
- prostorovém rozložení (tvar svazku)
- barvě resp. spektru

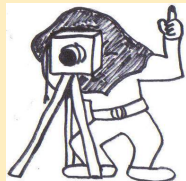
Rychlost šíření signálu

- světlo ve vakuu – $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$, metr za 3.33 ns
- světlo ve vlákně – $v = c/n$, metr za 5 ns ($n = 1.5$)
- elektrický impulz v koaxiálním kabelu – metr za 5 ns

Typy detektorů

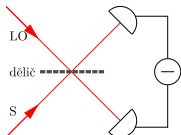
Fotonové detektory

- oko
- fotografie
- fotoelektrický jev



Termální detektory

změna teploty vlivem absorpce fotonů



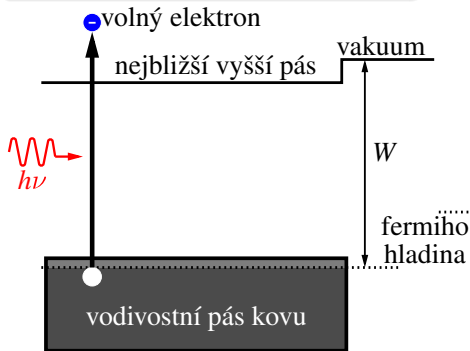
AČ (SLO)

Koherentní detektory

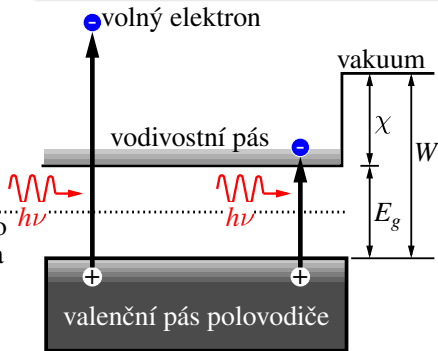
schopné určit fázi dopadajícího záření

Fotoelektrický jev

vnější u kovu



vnější a vnitřní u polovodiče



W – výstupní práce

E_g – šířka zakázaného pásu

χ – elektronová afinita

Detektory využívající fotoefekt

Vnitřní fotoefekt

Fotorezistor 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, až jednofotonová citlivost

Vnější fotoefekt

Fotonka fotokatoda a anoda

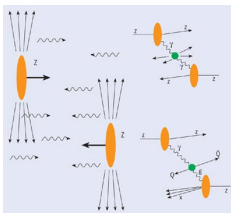
Fotonásobič sekundární emise, zesílení až 10^7

Obsah

- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory**
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování

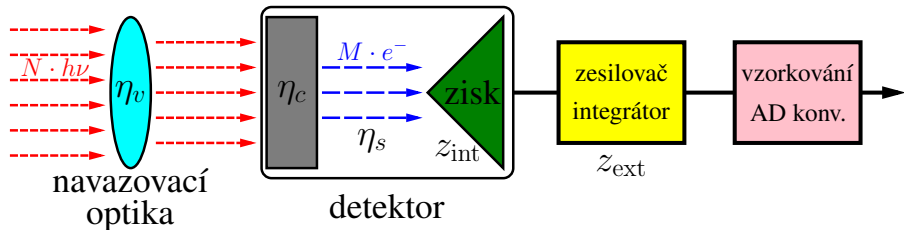
Proč detekovat jednotlivé fotony?

- astronomie – sledování velmi vzdálených objektů
- částicová fyzika – produkty srážek a rozpadů
- biofyzika – sledování pohybu látek ve tkáních
- ekologie – měření znečištění atmosféry
- kvantová optika – kryptografie a informatika



Základní schéma detektoru

- navazovací optika
- konverze fotonu na fotoelektron popř. elektron-děrový pár
- vnitřní zesílení na makroskopickou úroveň
- vnější elektronické zesílení
- zpracování signálu (diskriminátor, digitální konverze)



u jednotlivých členů sledujeme účinnost η (popř. ztráty), zisk z a šum

Vlastnosti jednofotonových detektorů

kvantová účinnost η

Časové vlastnosti

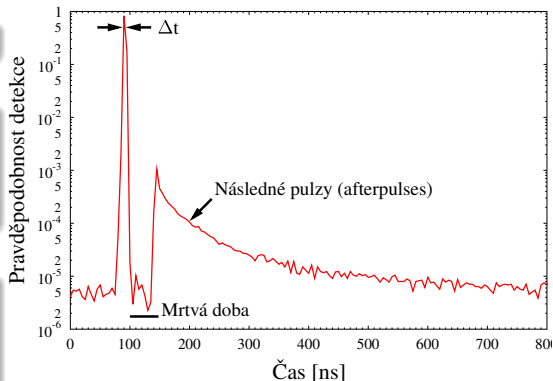
- mrtvá doba
- jitter (Δt)

Šumové vlastnosti

- temné detekce D
- afterpulzy

Technické parametry

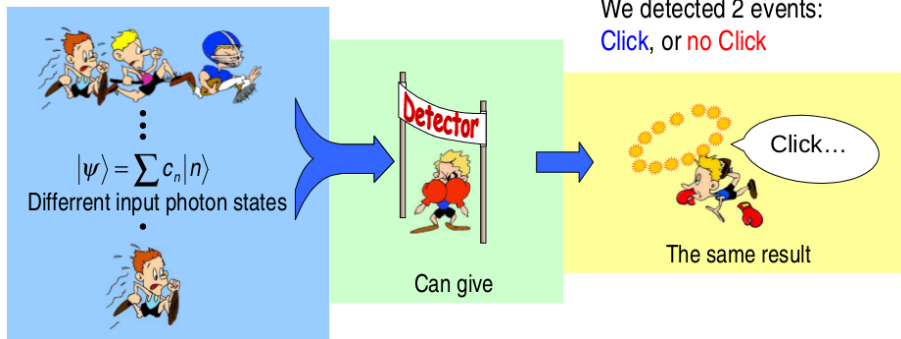
- velikost detekční plochy, provozní teplota
- životnost, provozní náklady atd.



Obsah

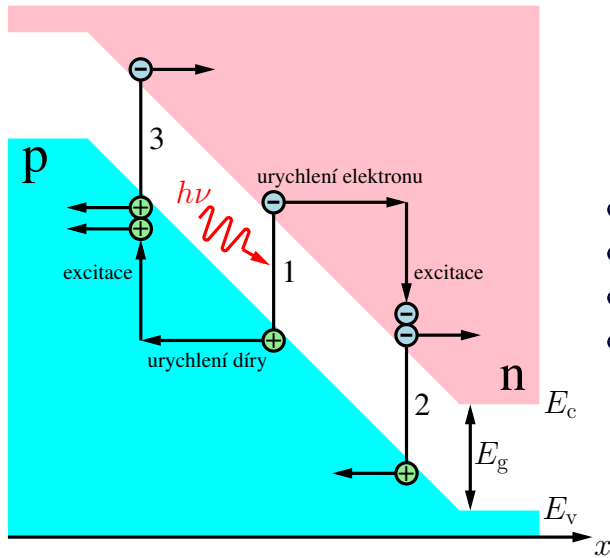
- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory**
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování

Binární detektory



©Martin Hamar

Lavinová fotodioda v geigerově módu



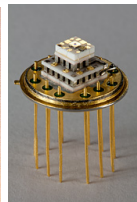
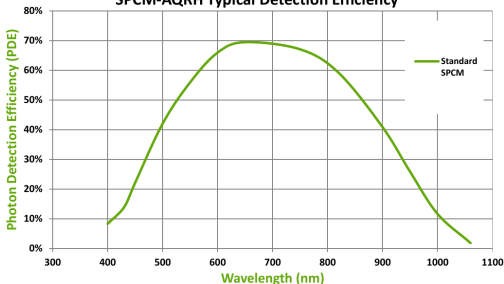
- p-n popř. p-i-n
- $V > V_{break}$
- lavinové násobení
- aktivní nebo pasivní zhášení – mrtvá doba

VIS APD

SPCM-AQRH (Excelitas)

- průměr aktivní plochy $180\ \mu\text{m}$
- temné detekce od 25 Hz
- mrtvá doba $< 40\ \text{ns}$
- timing jitter 350 ps
- max opakovací frekvence 37 Mc/s

SPCM-AQRH Typical Detection Efficiency

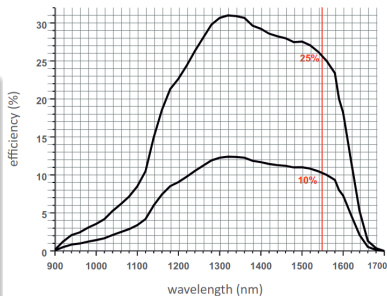


NIR APD

ID 230 (ID Quantique)

- připojení na optické vlákno (kvantová kryptografie)
- temné detekce od 50 Hz do 200 Hz
- mrtvá doba od 2 μ s do 100 μ s (nastavitelná)
- timing jitter 150 ps
- váha 30 kg :-)

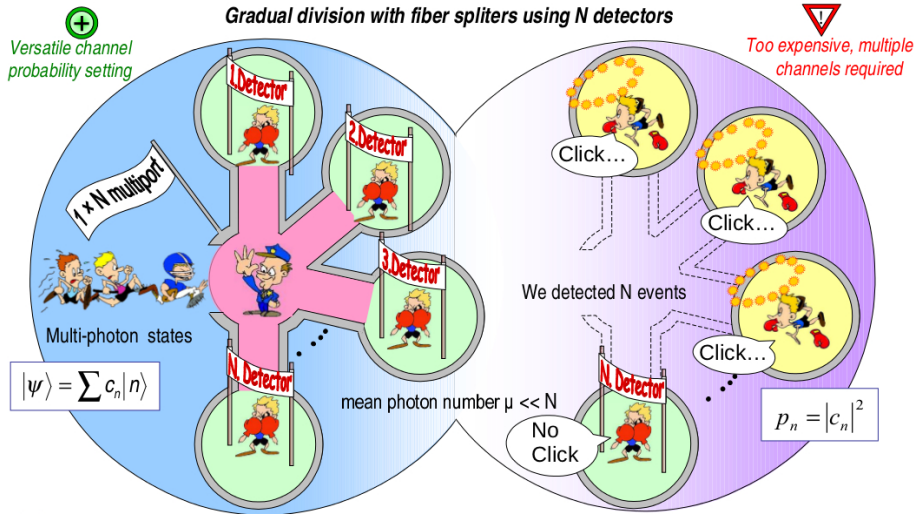
Quantum efficiency vs wavelength (tendency)



Obsah

- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy**
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování

Multimodové binární detektory

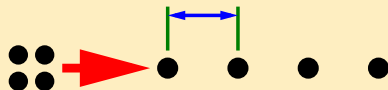


©Martin Hamar

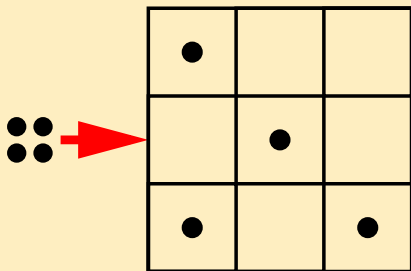
Časové a prostorové rozdělení

Časové rozdělení

$t > \text{mrtvá doba}$

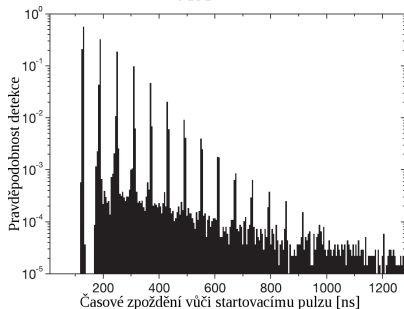
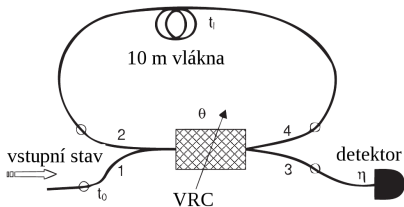


Prostorové rozdělení



- více kanálů než fotonů
- nenulová pravděpodobnost více fotonů na jeden kanál → rekonstrukce fotonové statistiky

Vláknová smyčka



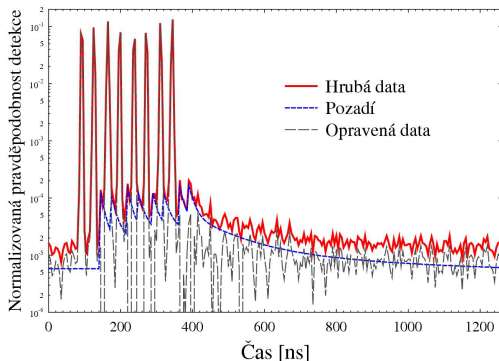
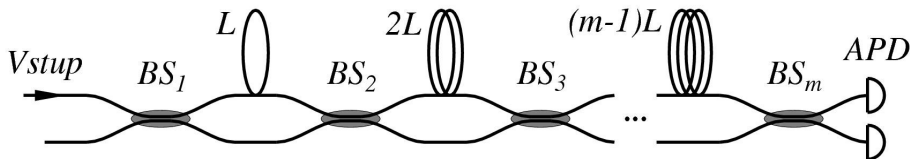
Výhody

- jednoduché a levné
- malé ztráty
- nastavitelný dělicí poměr VRC
- jen jeden detektor

Nevýhody

- různé pravděpodobnosti časových kanálů
- omezený počet kanálů
- omezení opakovací frekvence

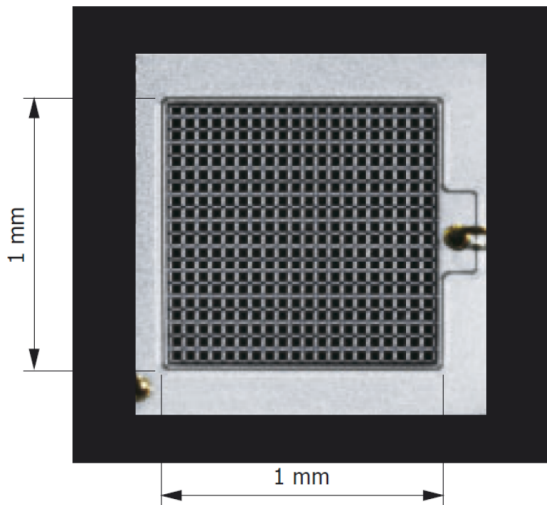
N-kanálový vláknový detektor



- pevně daný počet kanálů
- nevyvážené pravděpodobnosti jen díky nedokonalostem
- omezuje opakovací frekvenci
- potřeba dvou detektorů

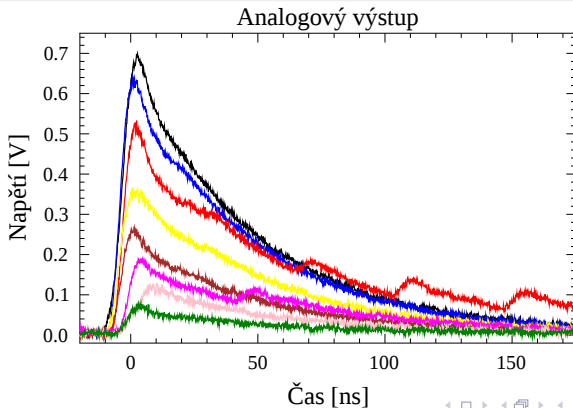
MPPC – Multi photon counting module

- matice APD sdílející jednu elektroniku zpracovávající signál
- mnoho temných detekcí
- přeslechy
- chlazení Peltierovým článkem
- komerčně dostupné, snadno ovladatelné



Hamamatsu C11208-03

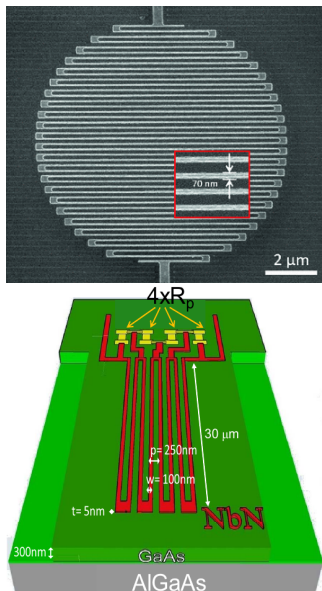
- 10x10 pixelů o velikosti 100x100 μm
- spektrální citlivost – 320 - 900 nm, maximum na 440 nm
- $\eta = 50\%$ @440nm, $D = 40\,000/\text{s}$



Obsah

- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná**
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování

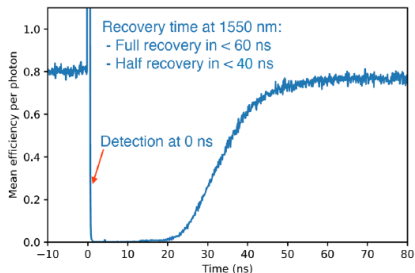
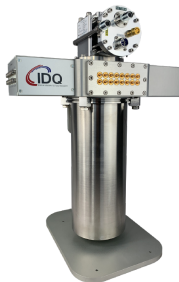
Supravvodivá nanovlákna



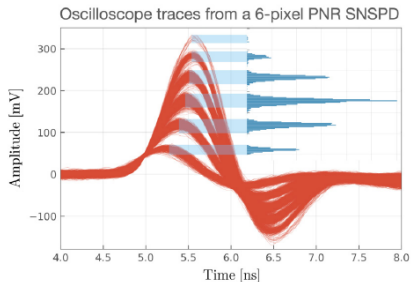
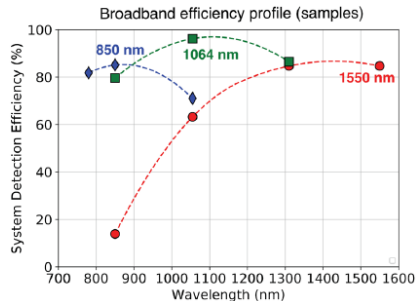
- těsně pod teplotou supravodivosti
- absorpce fotonu způsobí slabý zákmit napětí, který je potřeba zesílit
- optimalizovatelné od UV po IČ
- možnost detekce fotonů z vlákna nebo přímo na vlnovodu
- binární, rozlišení počtu multiplexací
- nastavitelný poměr účinnost $\times$ šum
- temné detekce pod 100 Hz
- timing jitter do 60 ps
- max opakovací frekvence 20 – 50 MHz

ID Quantique ID281

- + 16 kanálů
- + 0.8 K kryostat
- + vestavěný zesilovač
- 12 hodin chlazení
- závislost na polarizaci 30 %



AČ (SLO)



Detekce fotonů

Obsah

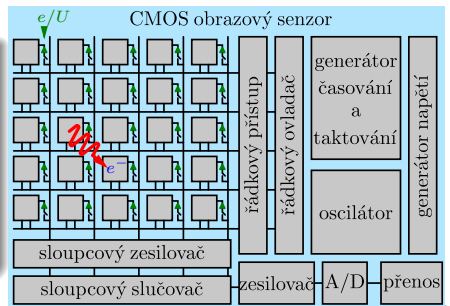
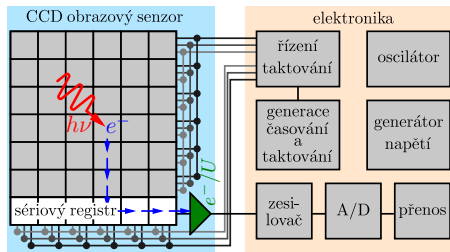
- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery**
- 7 Elektronické zpracování

CCD a CMOS

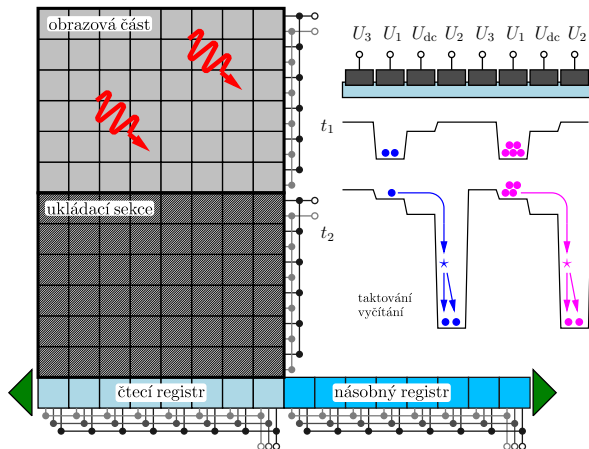
- polovodičové fotorezistory
- fotoelektrony zachyceny v potenciálových jamách
- převod náboje na napětí
- digitalizace

Šum

- termální $\rightarrow$ chlazení
- přenosu náboje (CIC) – zanedbatelný
- **vyčítací** $\rightarrow$ slow scan, $\sim 50 e^-$

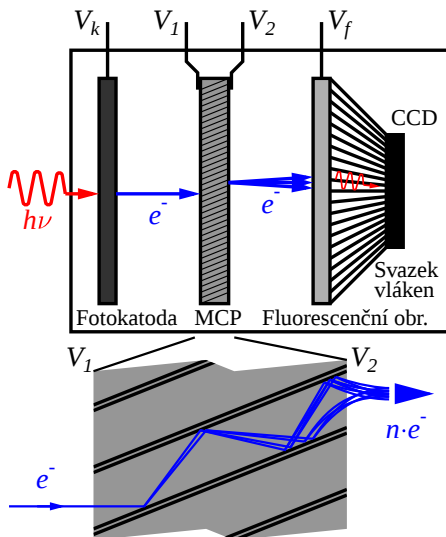


EM-CCD kamera



- multiplikace elektronů přímo na čipu
- nastavitelné zesílení $1 - 1000 \times$
- ztratí se informace o počtu fotonů

iCCD kamera



- zesilovač obrazu
 - fotokatoda
 - MCP – mikrokanálková destička
 - fluorescenční obrazovka
- chlazený CCD čip
- nízkošumová elektronika
- celková účinnost limitována fotokatodou ($\eta_k \approx 50\%$)

Hamamatsu qCMOS

- střední odečítací šum $0.27/e^-/px$
- max účinnost 90 % na 475 nm
- 9.4 Mpix, 5 snímků/s



10 fotonů/pixel 3

qCMOS

EMCCD

AČ (SLO)

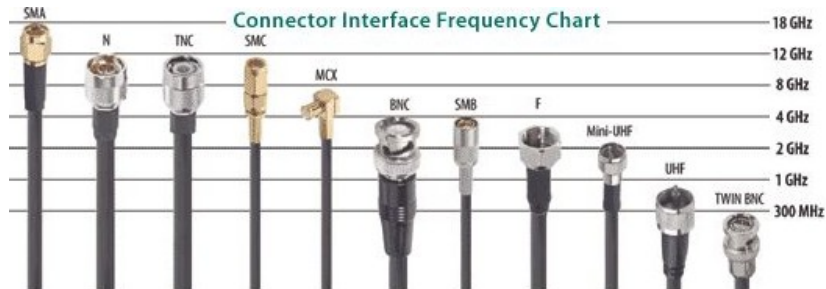
Detekce fotonů

30/34

Obsah

- 1 Detekce světla
- 2 Jednofotonové detektory
- 3 Binární detektory
- 4 Multiplexy
- 5 Supravodivá nanovlákná
- 6 Jednofotonové kamery
- 7 Elektronické zpracování**

Elektronický výstup z detektoru



- složitější zařízení mají svou vlastní elektroniku a software
- analogový výstup zpracován pomocí osciloskopu

TTL (do 1 MHz)

1 napětí 2 až 5 V

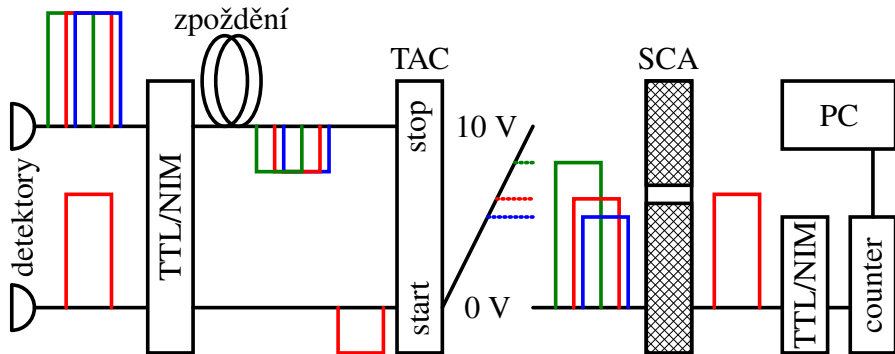
0 napětí 0 až 0.8 V

negative NIM

1 proud -12 až -36 mA

0 proud -4 až +20 mA

Postselekce na současné detekce



TAC *Time to amplitude convertor*, převádí časové zpoždění na amplitudu napěťového pulzu

SCA *Single Channel analyzer*, rozlišuje pulzy podle velikosti

counter *Dual Counter Timer*, načítá pulzy po daný čas

Další elektronické moduly

Časové zpoždění

- pro přesnou synchronizaci
- od 0.5 ns až po ms

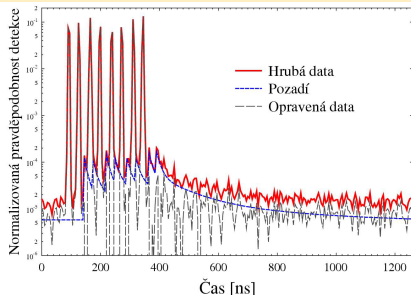
Analýza pulzu

- amplituda
- tvar

Koincidence

- více vstupů
- nastavitelné zpoždění

Vícekanálový analyzátor



- zesilovače
- integrátory
- generátory

<https://www.ortec-online.com/products/electronics>