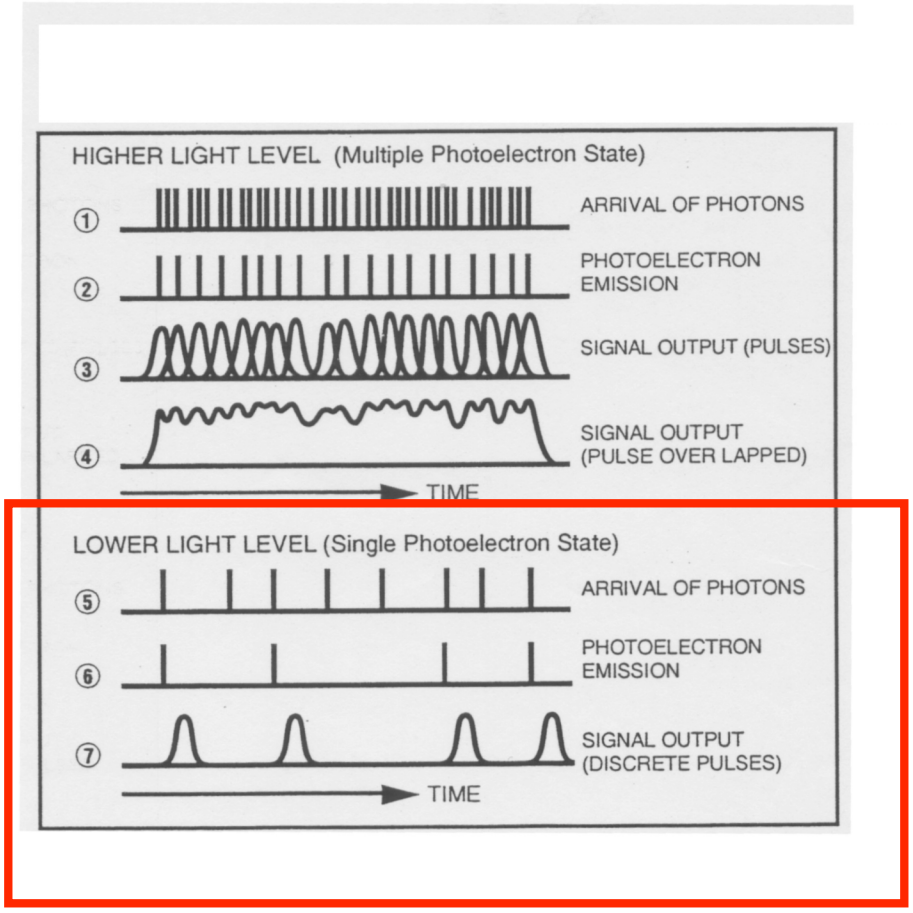
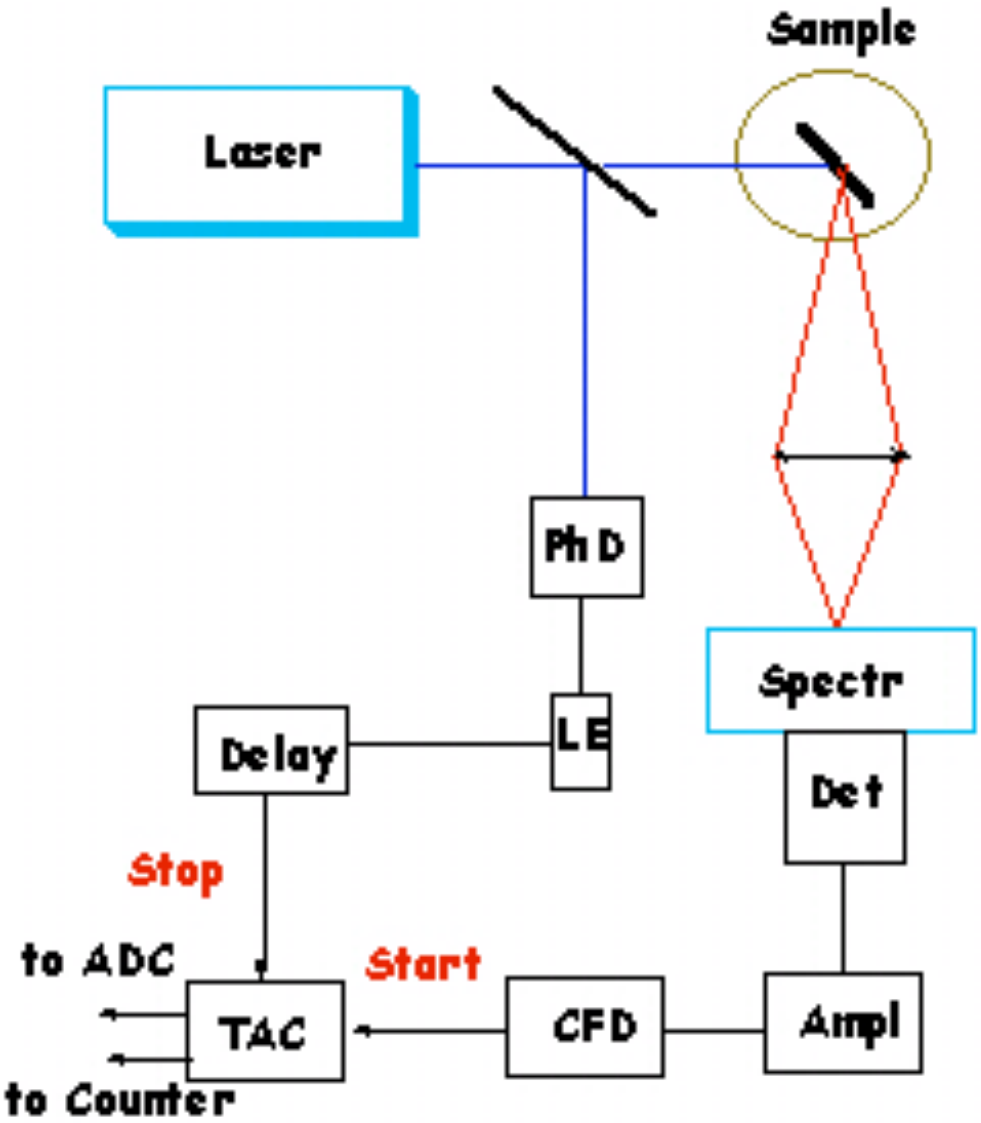
Correlazione temporale di singolo fotone
TCSPC



Si vuole estrarre informazione sulla distribuzione dei tempi di arrivo dei fotoni rivelati

Apparato sperimentale



Statistica emissione fotoni=statistica fotolettroni

Poisson

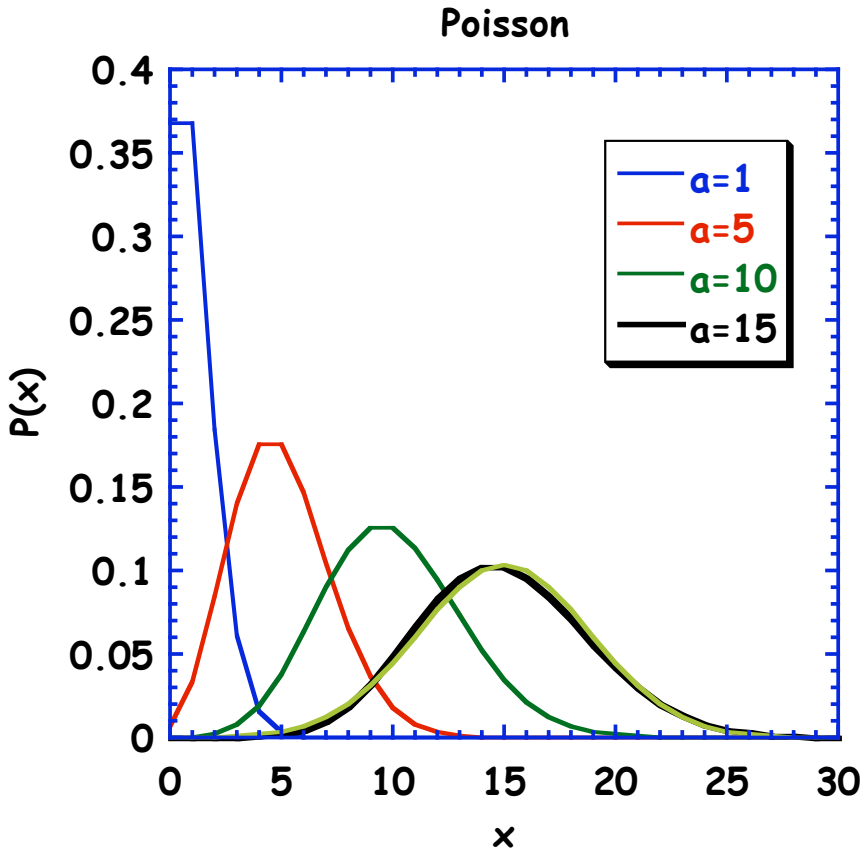
$$P(x) = \frac{a^x e^{-a}}{x!}$$

$$\Sigma P(x) = 1$$

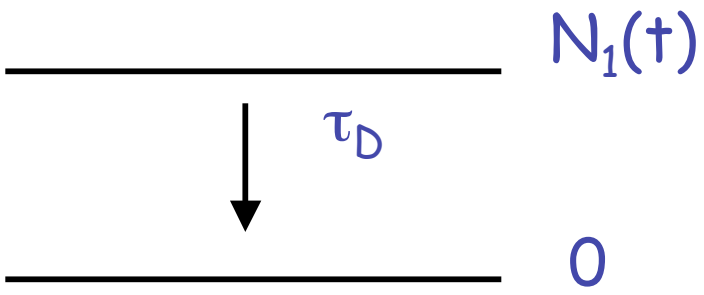
$$a = \Sigma x P(x)$$

$$\sigma^2 = \overline{(x^2)} - \bar{x}^2 = a$$

Per a grande P(x) ≈ G(x)



Problema: Misurare la cinetica di ricombinazione radiativa



$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\frac{N_1}{\tau_R} - \frac{N_1}{\tau_{NR}} + P$$

$$P = A\delta(t)$$

$$N_1(t) = N_{10}e^{-t/\tau_D}$$

$$\tau_D^{-1} = \tau_R^{-1} + \tau_{NR}^{-1}$$

$$I(t) = \eta_0 \frac{N_{10}e^{-t/\tau_D}}{\tau_R} = \eta \frac{dN_1}{dt} = \eta\, r$$

Hp per TCSPC

1. Regime di fotoconteggio: bassa efficienza "rivelazione" η
2. Statistica Poisson

Rate di conteggio=ηr

Hp: $\eta r << 1$

Probabilità P(t)dt di rivelare 1 evento al tempo t nell'intervallo dt:

$P_0 \times \eta r dt$

Nessun evento rivelato fino al tempo t

$P_0 = (\eta r t)^0 \exp(-\eta r t)/0! = \exp(-\eta r t)$

$P(t)dt = \eta r \exp(-\eta r t)\, dt$

Se $\eta << 1$

$$P(t) = \eta r \propto \exp(-t / \tau)$$

È proprio il decadimento che si vuole misurare!

$\delta(t)$

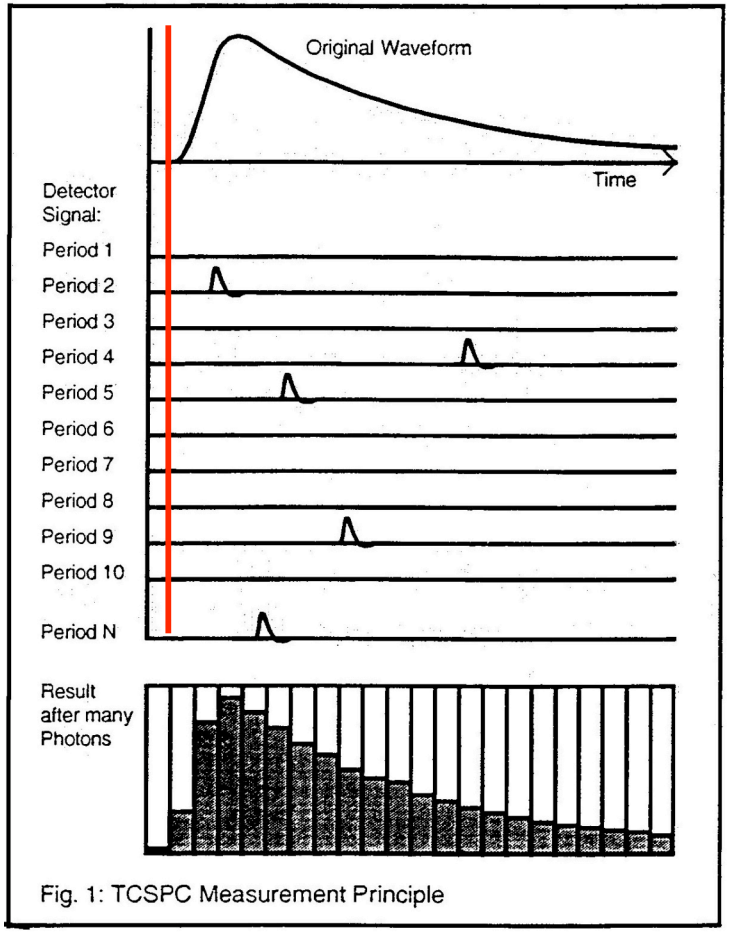
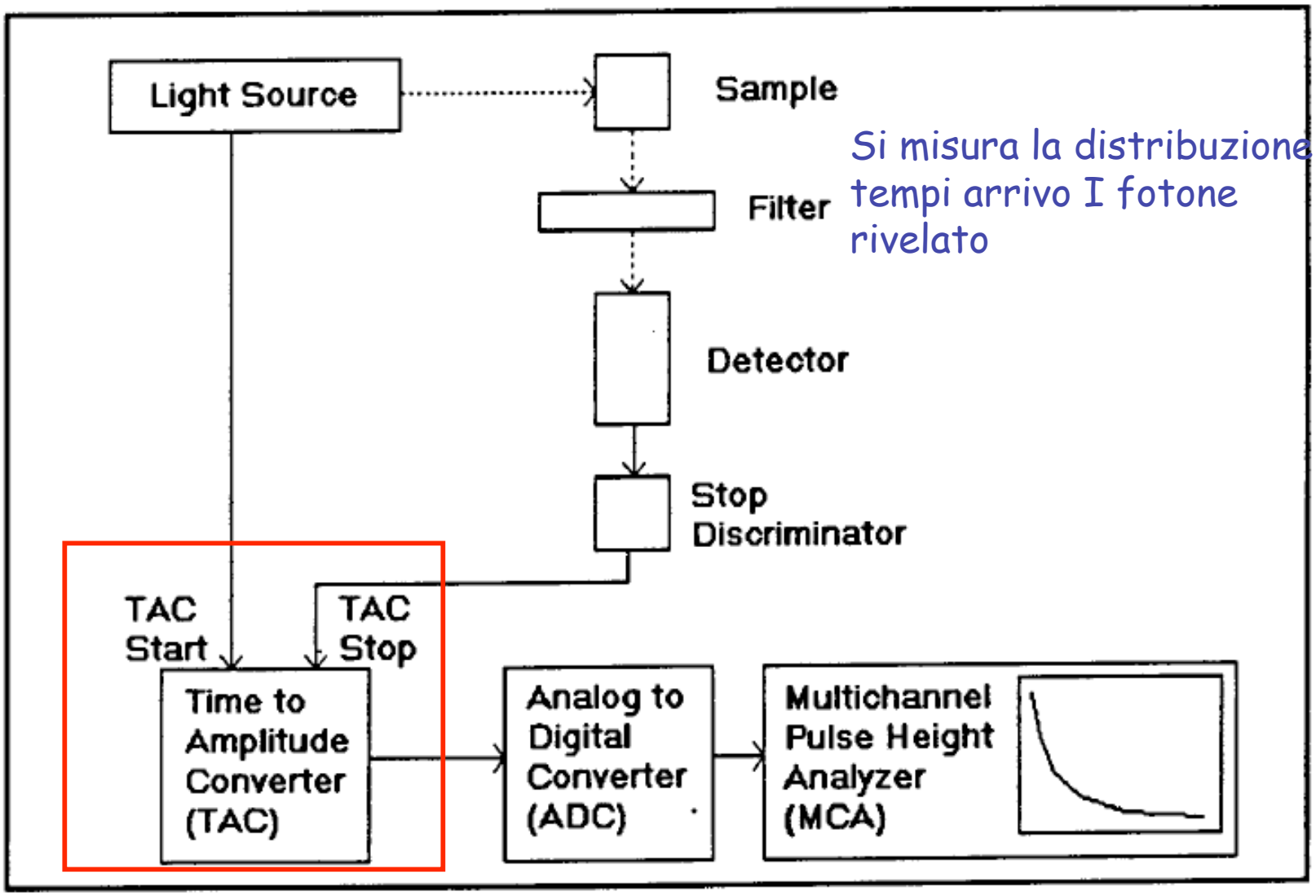


Fig. 1: TCSPC Measurement Principle

Decadimento ricostruito su molte (10^6) acquisizioni

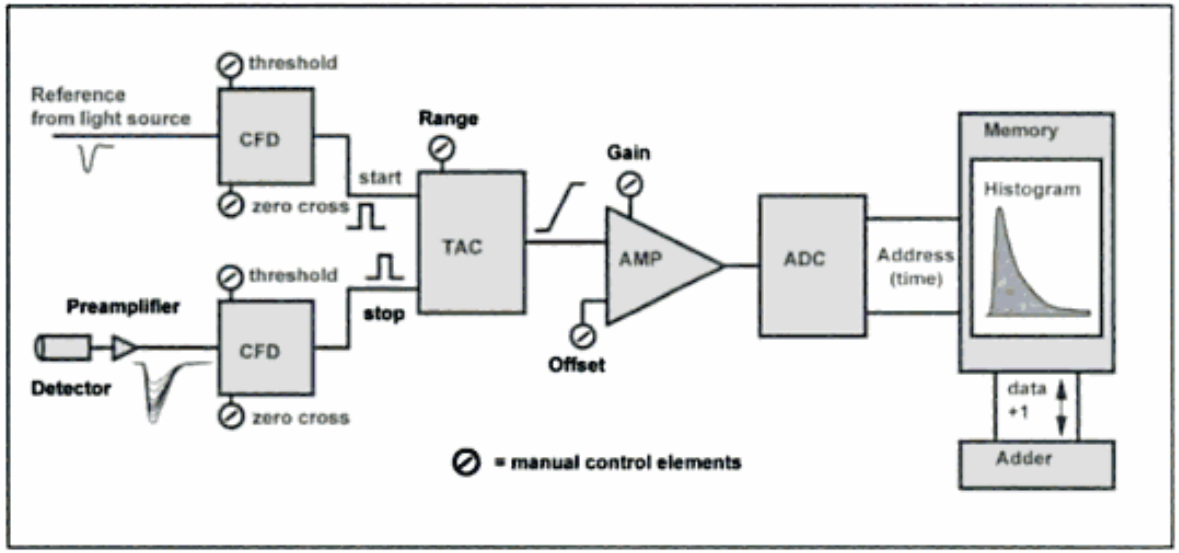
Segnale periodico:
Eccitazione e rivelazione
Alta stabilità



Si misura la distribuzione tempi arrivo I fotone rivelato

Figure 2
The Basics of a TC/SPC System

Configurazione diretta



Configurazione invertita

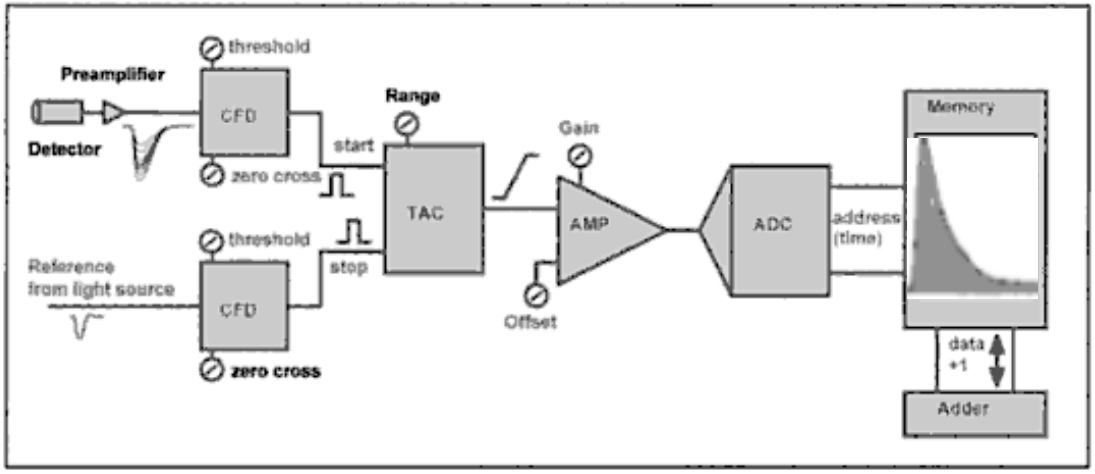
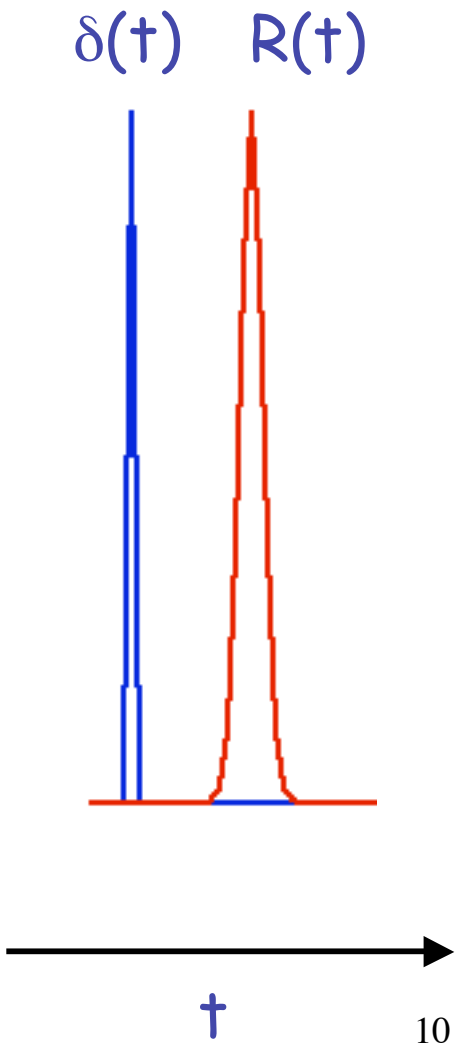


Fig. 2.14 Reversed start-stop configuration of TCSPC

Che cosa si misura veramente ?

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) S(t-\tau) d\tau$$

Risposta strumentale



Risoluzione temporale

•Area del rivelatore

•Caratteristiche temporali del rivelatore: Transit time spread (TTS). È una frazione del tempo di transito e dipende dalla geometria del PM. Ottima MCP, ma basso guadagno, ridotto range dinamico. OK diodi a valanga (APD) (Jitter dovuto ad innesco valanga: area piccola)

•Jitter dovuto a tecnica di discriminazione: rumore e walk___ Fluttuazioni ampiezza/tempo

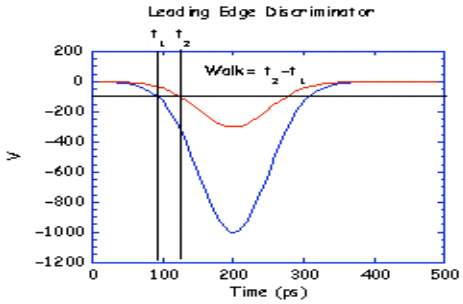
Per ottimizzare R(t)

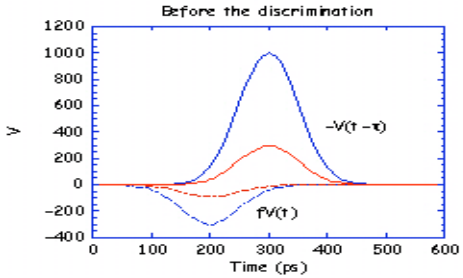
- Geometria di rivelazione: angolo solido
- Risoluzione spettrale $\Delta t = \frac{W}{c} M \frac{\lambda}{d}$

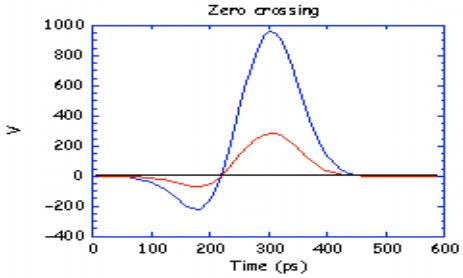
M=ordine diffrazione W=dim.reticolo d=spaziatura grooves

- Transit Time Spread
- Discriminare correttamente

Per discriminare correttamente LE o CFD?



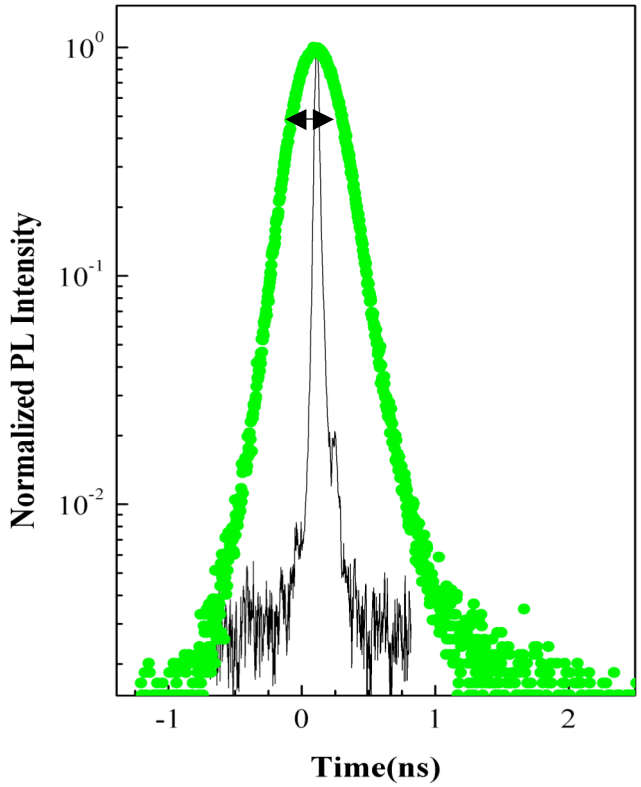




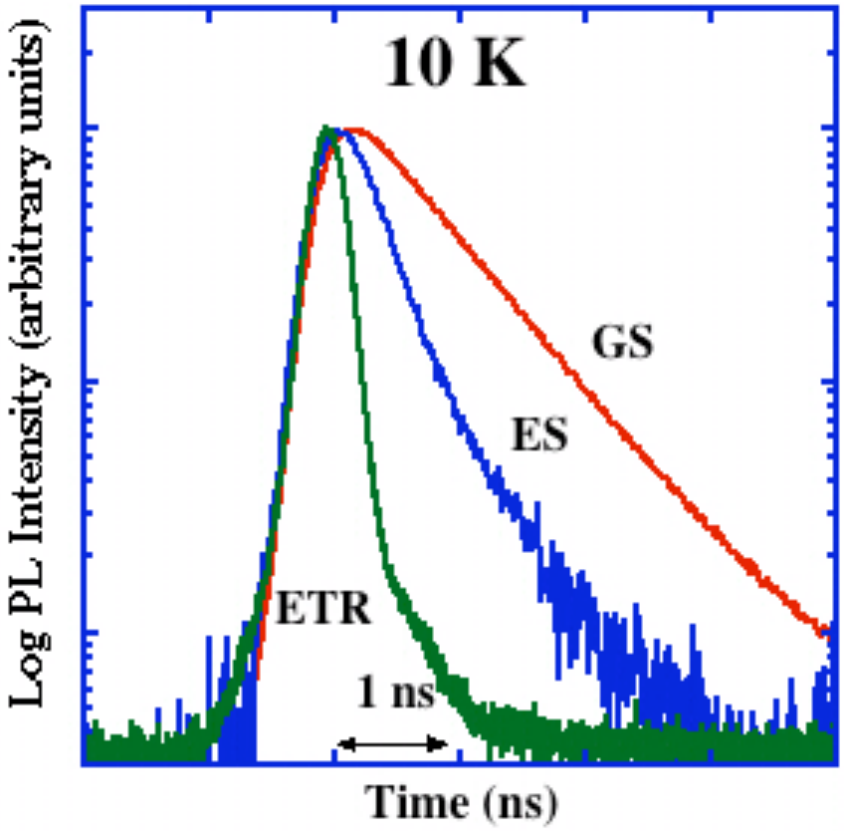
Hp: Gli impulsi del rivelatore hanno stesso profilo temporale ma ampiezza diversa

Specs: walk≤ 25 ps

MCP vs PM



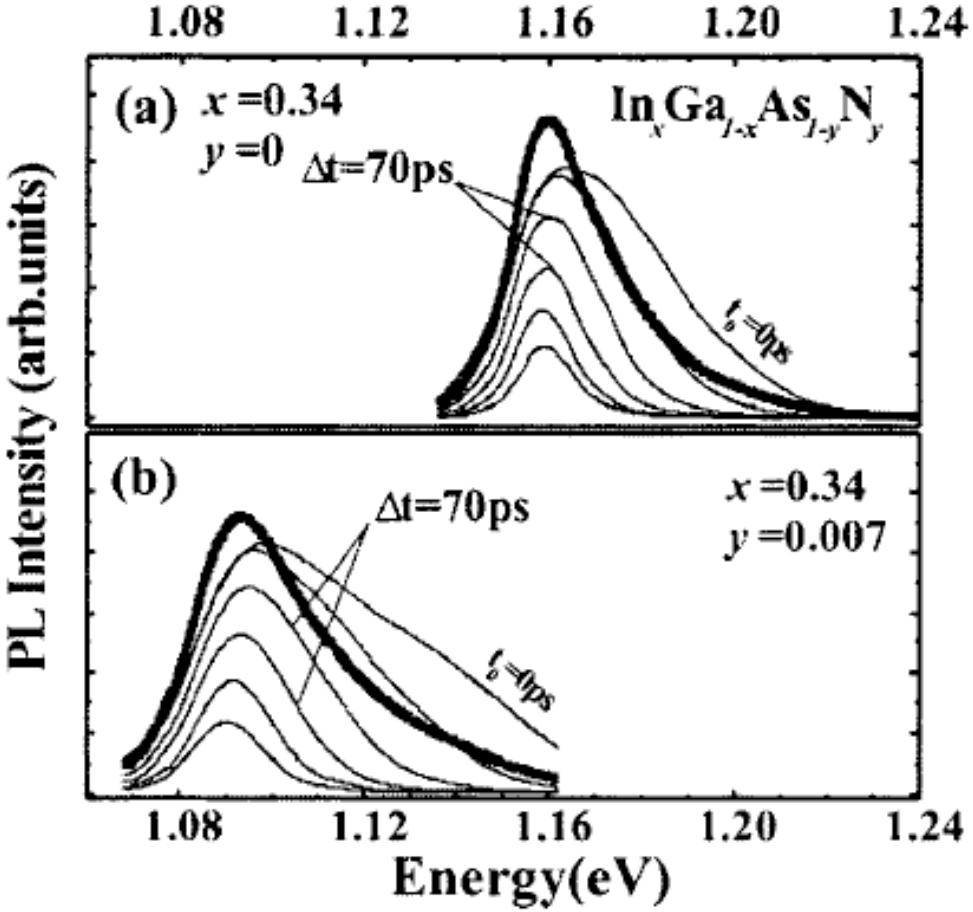
Risultati sperimentali con PM



Caratteristiche TCSPC

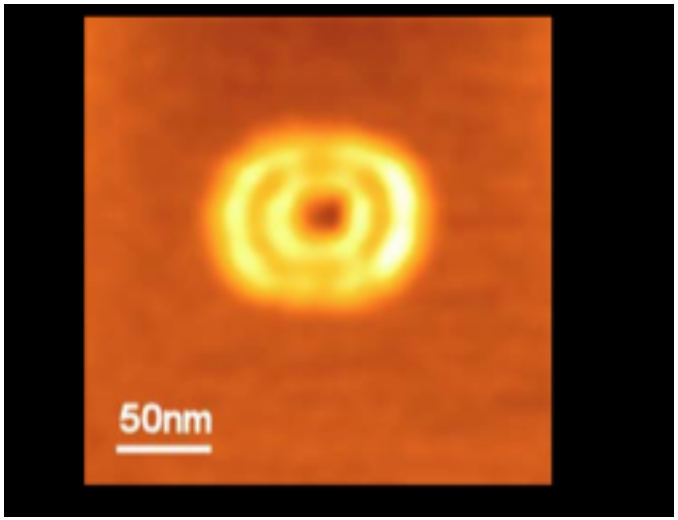
- Alta frequenza ripetizione, bassa efficienza rivelazione: i decadimenti veloci sono i piu' facili da misurare
- Grande range dinamico (3-4 ordini)
- Conta il jitter
- Misura "senza fondo"
- Alta frequenza di ripetizione, bassa efficienza: i decadimenti lenti sono difficili da misurare
- Rivelatori veloci (per piccoli valori di TTS)
- Acquisizione sequenziale (spettri)

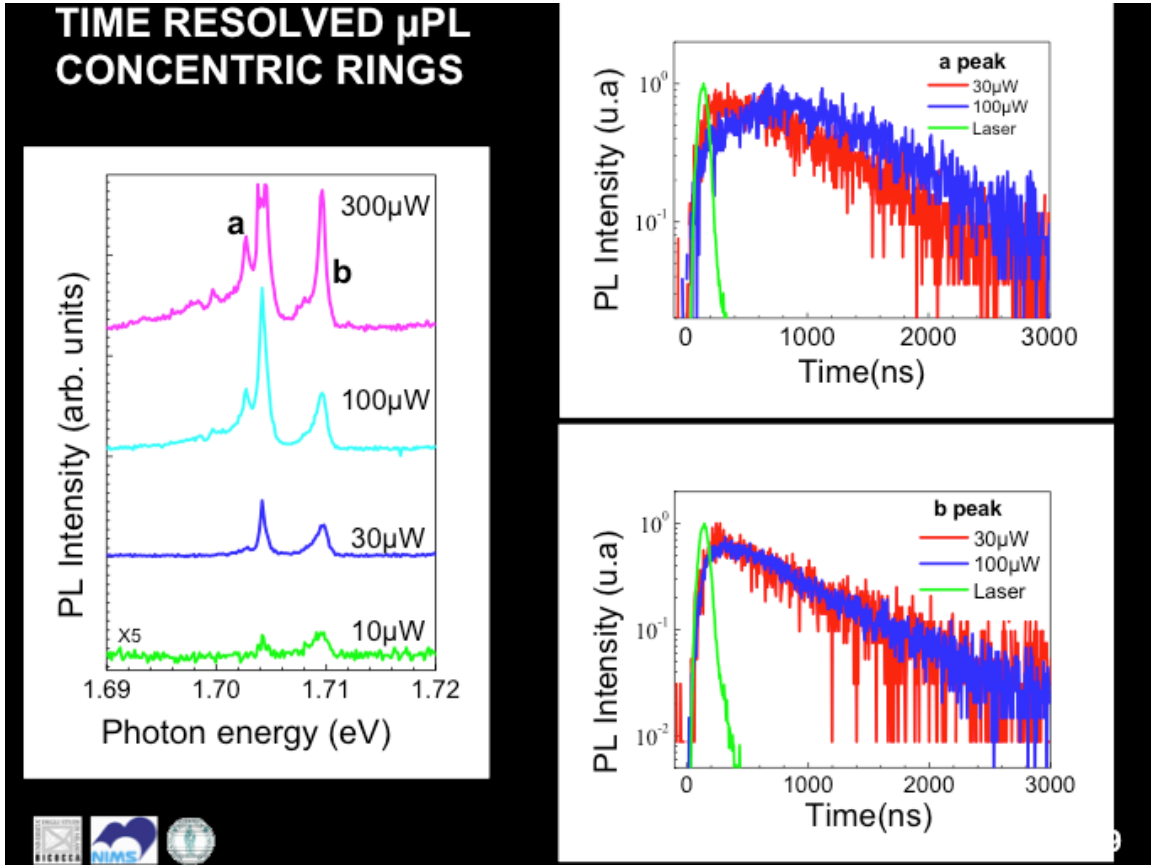
Spettri risolti temporalmente



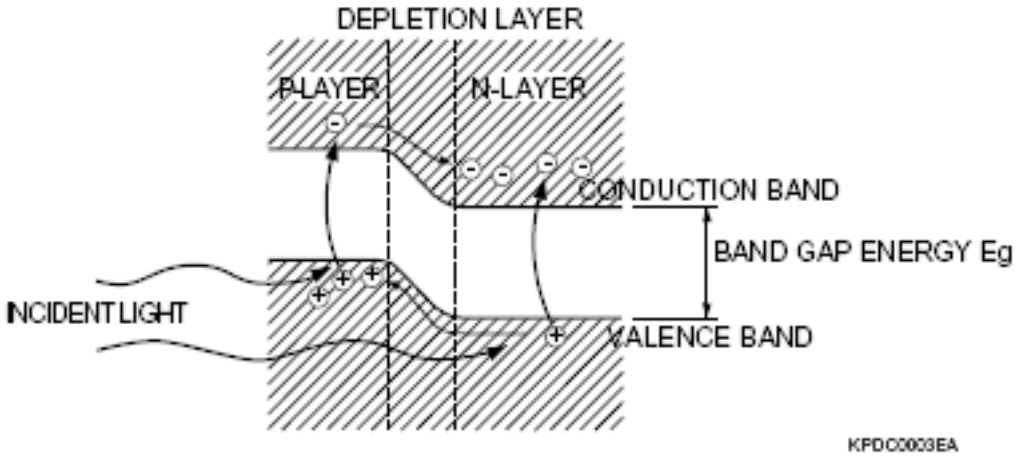
Ad es. con analizzatore singolo canale: discriminatore doppia soglia

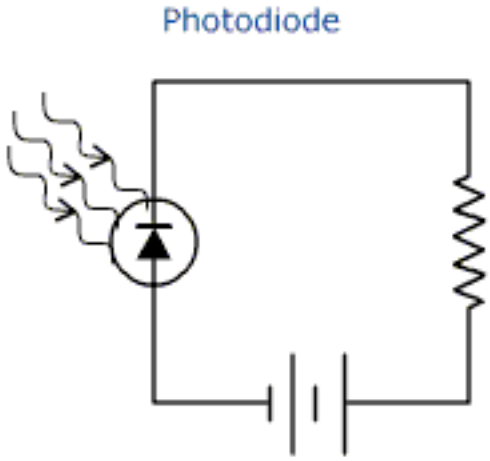
Il range dinamico consente di studiare singoli nanoemettitori





Fotodiodi e fotodiodi a valanga

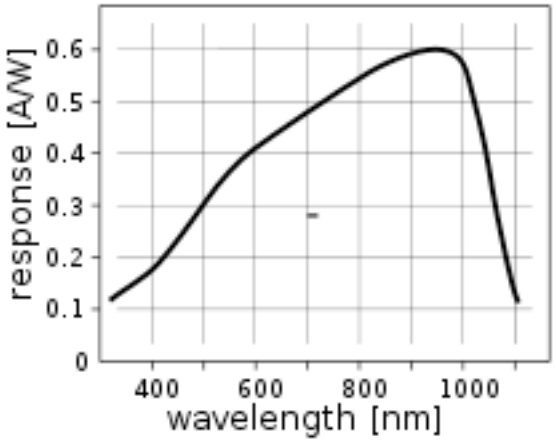




- Si 300-1100nm
- Ge 800-1700nm
- InGaAs 800-1800nm
- GaP 150-500 nm

Caratteristiche principali fotodiodo

- Responsivity (A/W)



- Corrente di buio

- Noise equivalent power (NEP): minima potenza ottica rivelabile confrontata con la corrente di rumore I_N

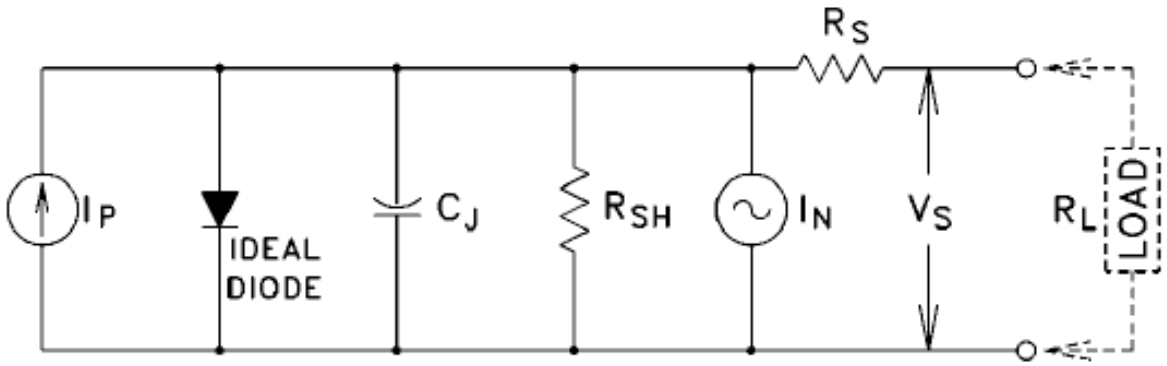
$NEP = I_N / S_R \quad (A/\sqrt{Hz})$

S_R=peak radiant sensitivity

$$10^{-15}\frac{W}{\sqrt{Hz}} < NEP < 10^{-12}\frac{W}{\sqrt{Hz}}$$

Dipende dall'area del PD

Circuito equivalente di un PD



where:

I_P = photocurrent generator (A)

C_J = junction capacitance (F)

I_N = noise current generator (A, rms)

R_{SH} = shunt resistance (Ω)

R_S = series resistance (Ω)

V_S = signal voltage (V)

R_L = load resistance (Ω)

NON C'È AMPLIFICAZIONE :

NO GAIN!!

Sorgenti di rumore in un PD

$$I_N = \sqrt{I_J^2 + I_S^2 + I_F^2}$$

B=banda del rumore

$$I_J = \sqrt{\frac{4K_B TB}{R_{SH}}}$$

I_J=Rumore Johnson o termico
R_{SH}=resistenza di shunt della giunzione

$$I_S = \sqrt{2qI_{DC}B}$$

I_S= shot noise (fluttuazioni random numero elettroni)
I_{DC}=corrente che fluisce nel diodo

$$I_F = \sqrt{\frac{KI_{DC}B}{f}}$$

I_F= flicker noise o rumore 1/f
K= parametro " costruttivo"

I_S e I_J non dipendono dalla frequenza: spettro bianco di rumore

I_J domina per R_{SH} piccole
I_S domina per correnti piccole

Confronto PM-PD

PM

Noise 1 cps

$G=10^6$

I_D=1.6e-13 A

In tutto il range in cui il catodo risponde

PD

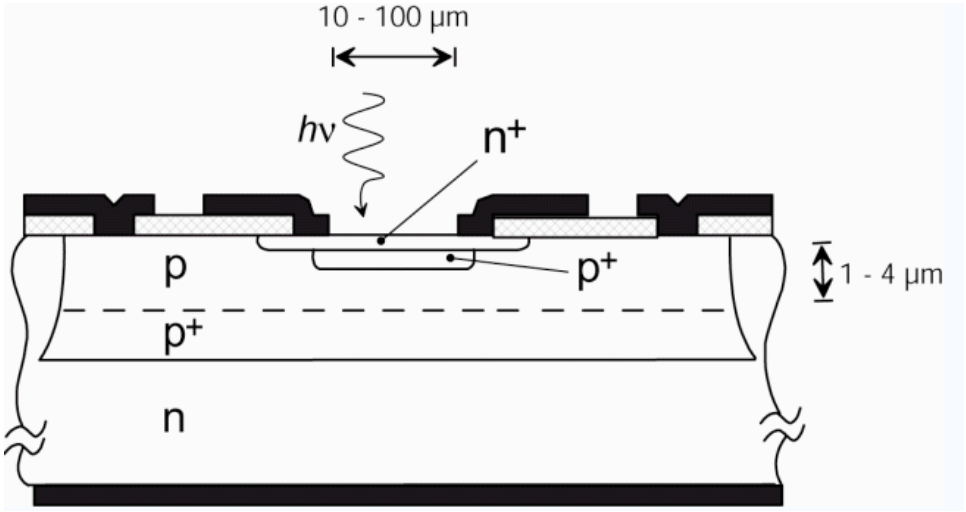
$NEP=10^{-15}$ W/Hz$^{1/2}$

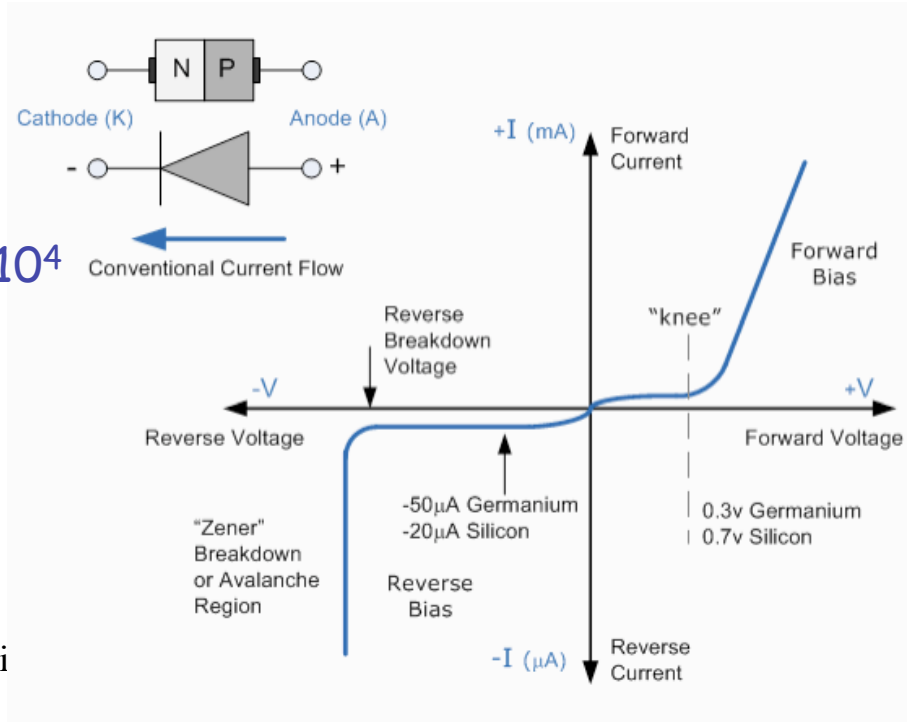
$NEP= I_D/S_R$

In un sec l'energia equivalente e' pari a 10^{-15}J che corrisponde a 4000 fotoni nel vis.

Manca il guadagno: no single photon counting

Per avere guadagno: Avalanche PD

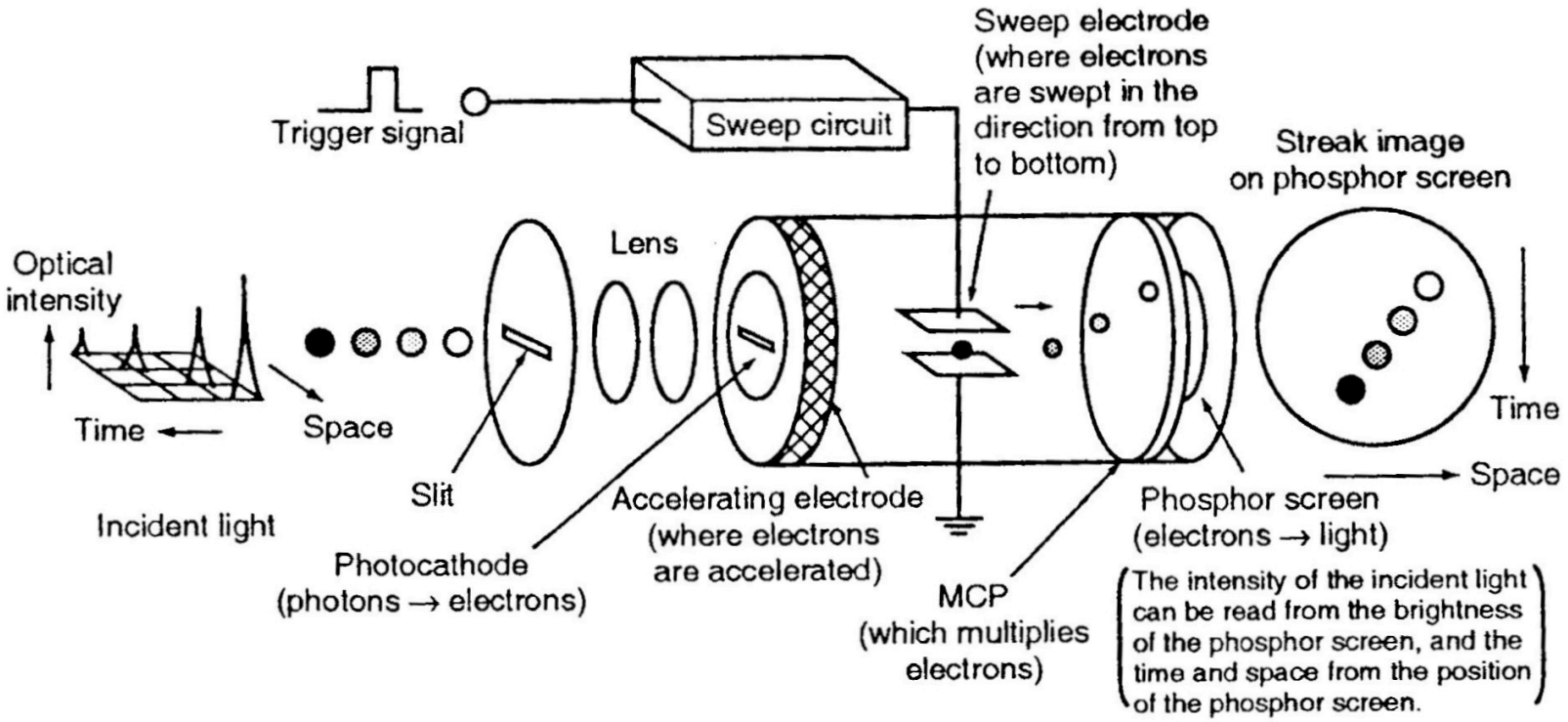




Tipico fattore moltiplicazione $\approx 10^3$-10^4

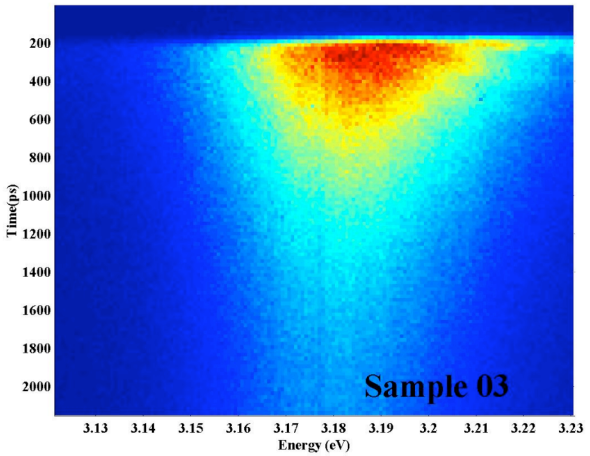
Problemi: Area piccola (≈ 100 µm diametro) per risposta temporale 40-50 ps. Limite nel rumore e capacità.

La streak camera



TR con uno Streak Tube

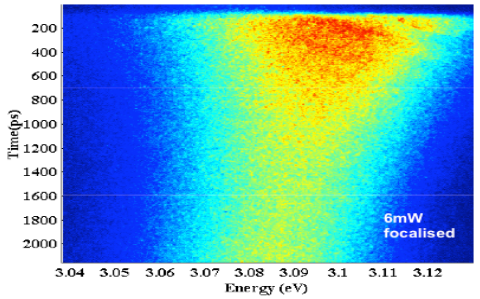
- risoluzione 2 ps
- Dimansione finita sorgente (apertura fenditura
- Jitter dovuto ad acquisizione sincrona

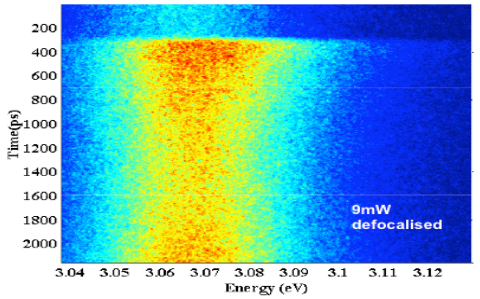
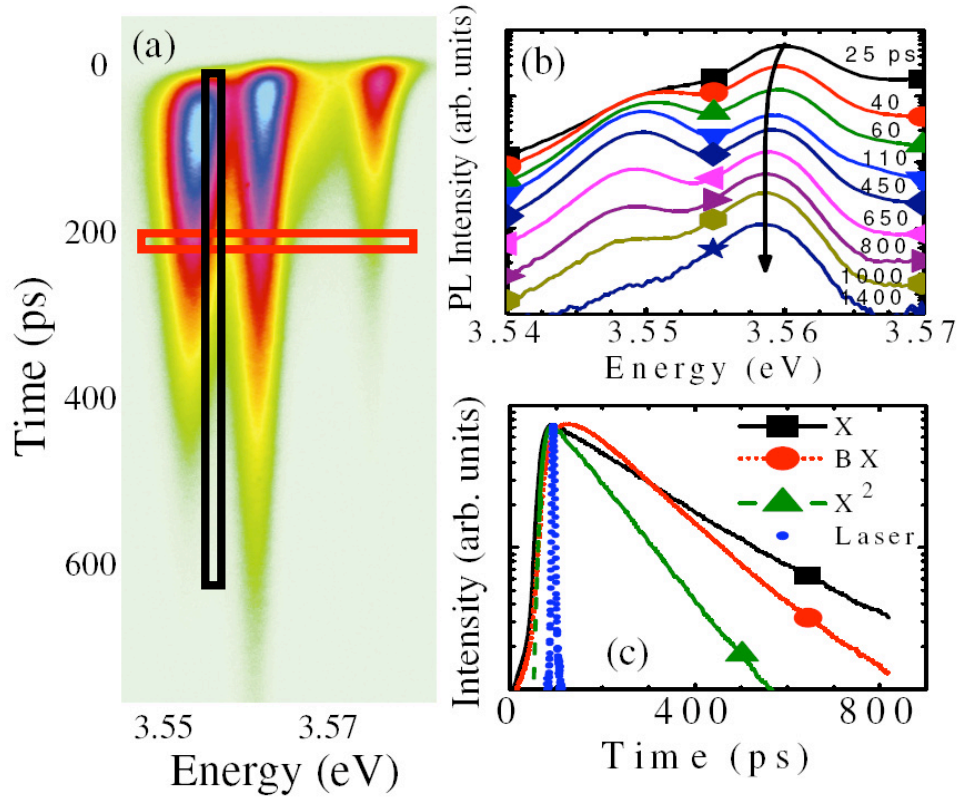


- Range dinamico ridotto (2-3 ordini)
- Rumore del fotocatodo
- Finestra temporale limitata (≈ 1 ns)

- Acquisizione immagine 2D: Spettro TR + decadimento

Correzioni dovute a disomogeneita' : shading e curvature





Esempi di spettroscopia TR con una streak camera