



“Caratterizzazione di matrici di fotodiodi a valanga per la rivelazione di singoli fotoni”

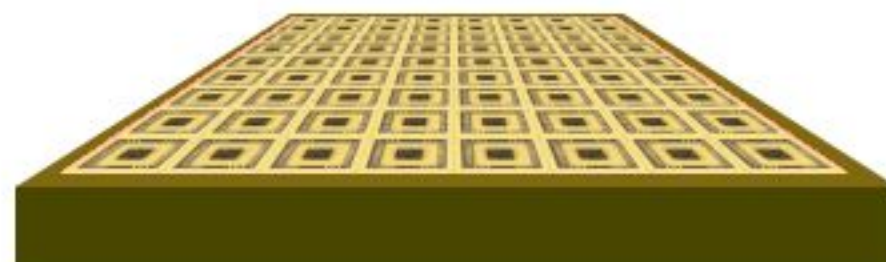
Angelo CAMPISI

Relatore: Prof. Vincenzo VAROLI

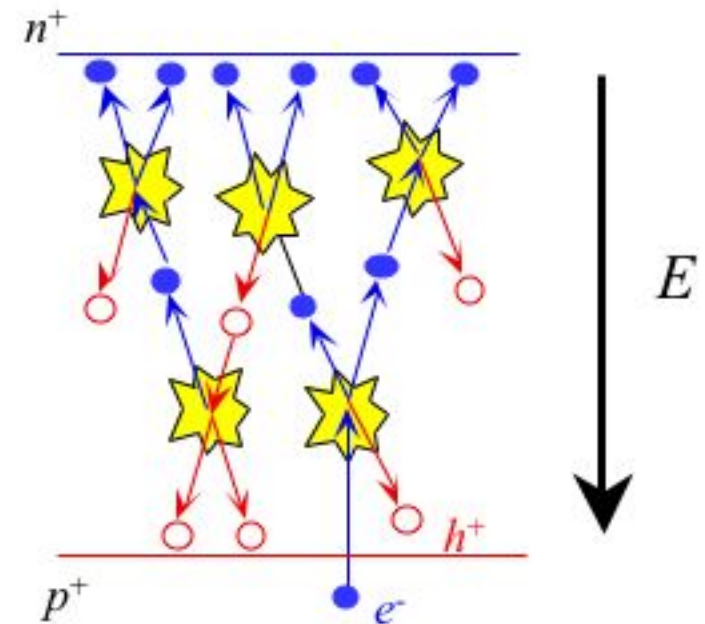
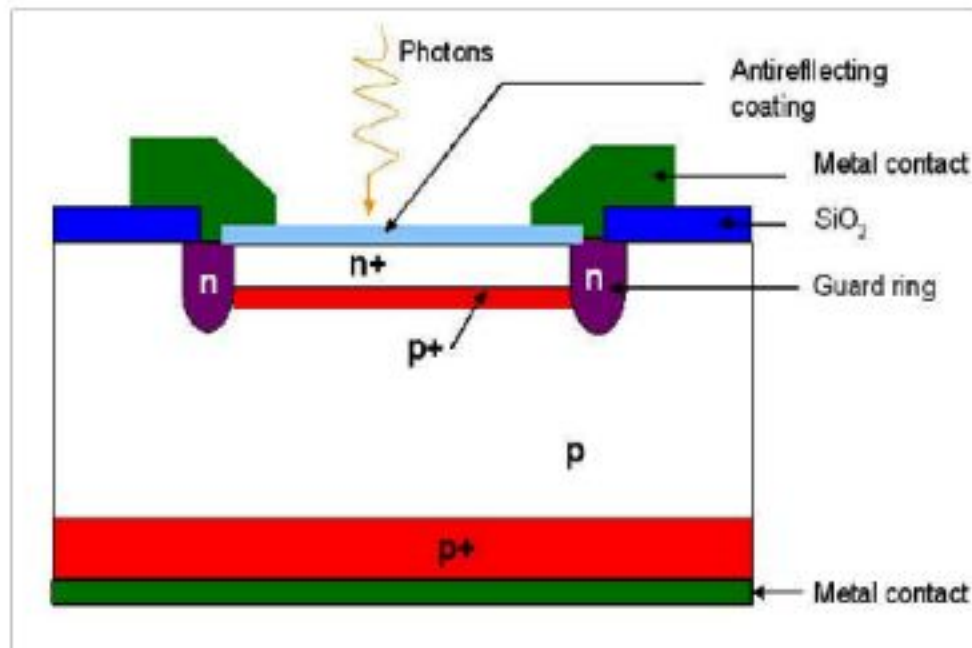
Correlatori: Prof. Alberto FAZZI

Dott. Paolo FINOCCHIARO

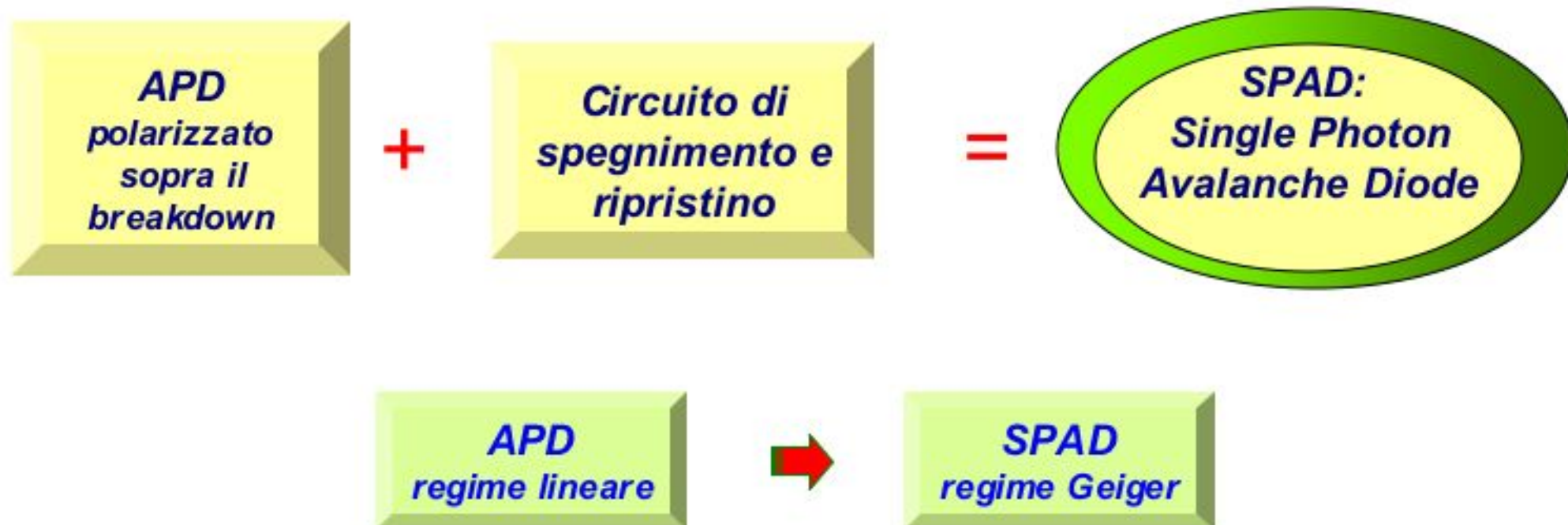
Dott. Luigi COSENTINO



fotorivelatori a stato solido: APD (Avalanche Photo Diode)



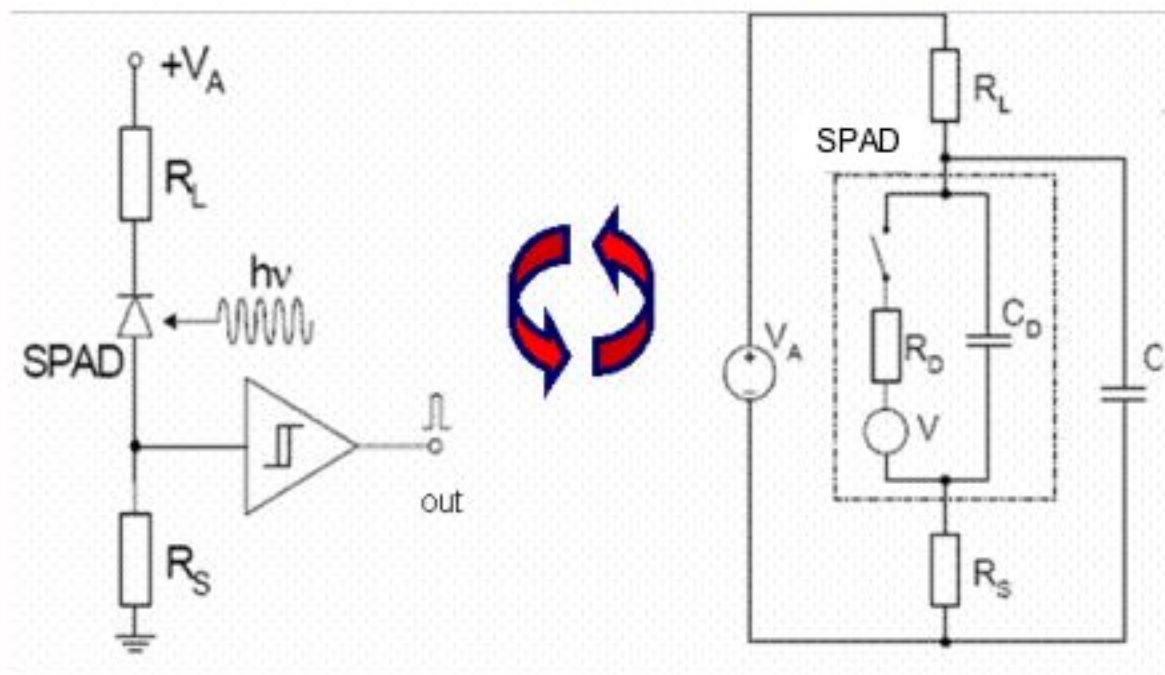
- Polarizzato inversamente ad una *tensione prossima al breakdown*
- Moltiplicazione interna di carica per ionizzazione da impatto...
...è un *amplificatore*
- Guadagno interno limitato (≤ 1000)
- Segnale di corrente proporzionale all'intensità dell'impulso ottico



- Tensione di polarizzazione *superiore al breakdown* $V_a = V_b + V_{ex}$
- Comportamento *on-off* su segnale
- Tempi veloci di produzione della valanga per l'elevato campo elettrico nella giunzione
- Guadagno elevato (tipicamente $\sim 10^6$ - 10^7), indipendente dalla luce incidente

PQC (Passive Quenching Circuit)

(quenching _spegnimento della valanga)



R_L resistore di polarizzazione

$R_L > R_D$ resistenza interna del diodo

R_S carico di uscita

C_D capacità interna del diodo

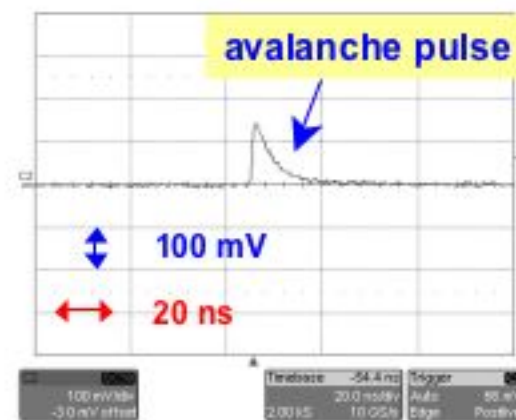
C capacità parassita vista verso massa

tempo di quenching $\tau_q \cong (C_D + C) \cdot R_D$

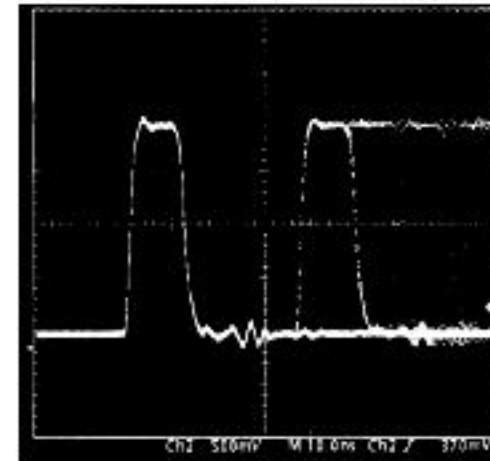
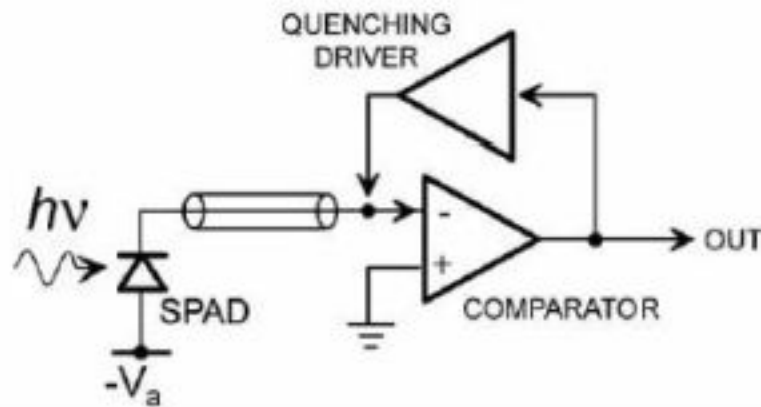
tempo di ripristino $\tau_r \cong (C_D + C) \cdot R_L$

Rate di conteggio < 100 kcps

Impulso di valanga



AQC (Active Quenching Circuit)



Output Pulses

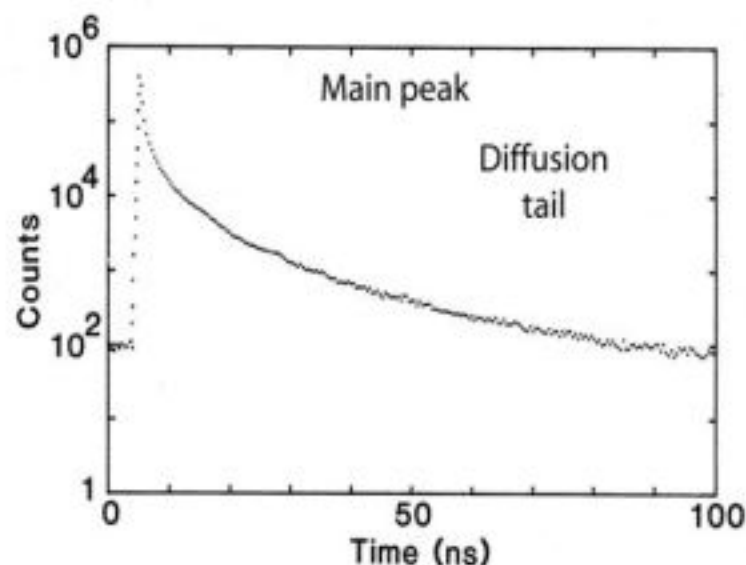
- circuito retroazionato a componenti attivi
- tempo di spegnimento veloce
- tempo morto definito e gestibile
- rate di conteggio > **Mcps**



- prestazioni migliori rispetto al PQC
- applicazione laboriosa con una matrice di fotodiodi SPAD

SPAD: caratteristiche

Tipica distribuzione temporale di eventi rivelati



Prestazioni:

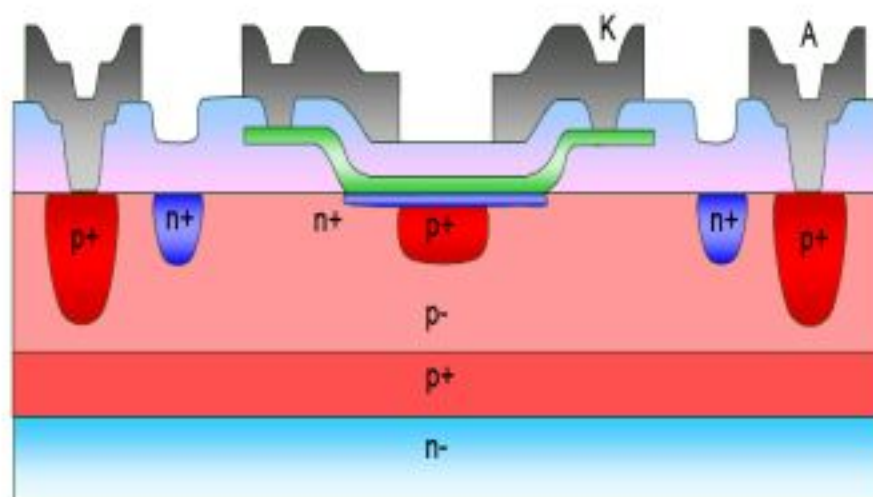
- Elevata efficienza di rivelazione (~50% nel visibile)
- Il tempo di salita della valanga marca il tempo di arrivo di un fotone
- Distribuzione temporale con due componenti:
 - ✓ Main peak (veloce): coppie e-h prodotte nella zona ad elevata caduta di campo
 - ✓ Diffusion tail (lenta): coppie e-h prodotte nelle zone quasi neutre

Dark count (dipendenza temperatura e V_{ex})

- generazione termica
- generazione assistita da campo elettrico

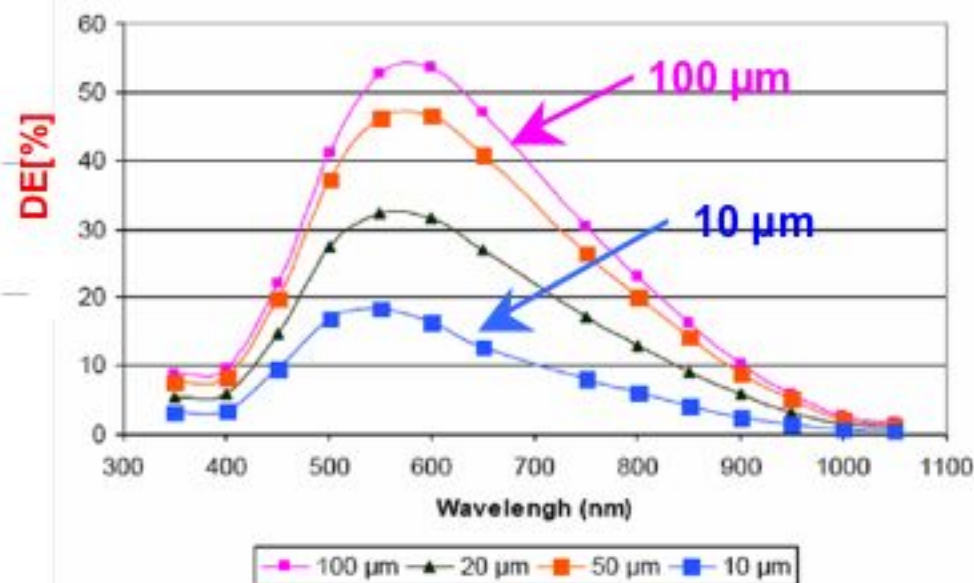
Afterpulsing

SPAD-STM



- Dispositivo in silicio
- giunzione di valanga n^+p^+ separata dal substrato tramite la giunzione n^-p^+ in basso
- diametro attivo da 10 a 100 μm
- può essere implementato in array e matrici

- ✓ Basse tensioni di polarizzazione ($\approx 30\text{-}40\text{ Volt}$)
- ✓ Elevata efficienza di rivelazione nel visibile e nel vicino IR
- ✓ Dark count rate a temperatura ambiente dell'ordine di 10^3



• E. Sclacca et al. Silicon Planar Technology for Single Photon Optical Detectors; IEEE Transactions on Electron Devices(2001)

Sistema di misura

Elettronica di front-end:

- NIM: Nuclear Instrumentation Module
- CAMAC: Computer Automated Measurement and Control

Sorgenti luminose:

- Laser
- Scintillatori

SPAD $\Phi = 50 \mu\text{m}$



stabilizzazione in temperatura

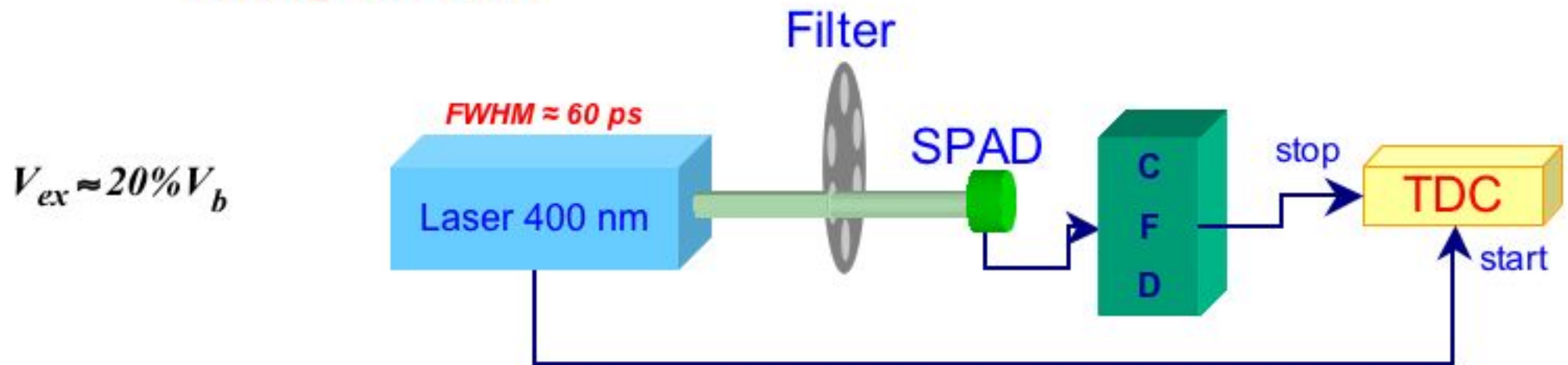
Parametri dello SPAD sotto controllo:

- guadagno
- dark count
- timing

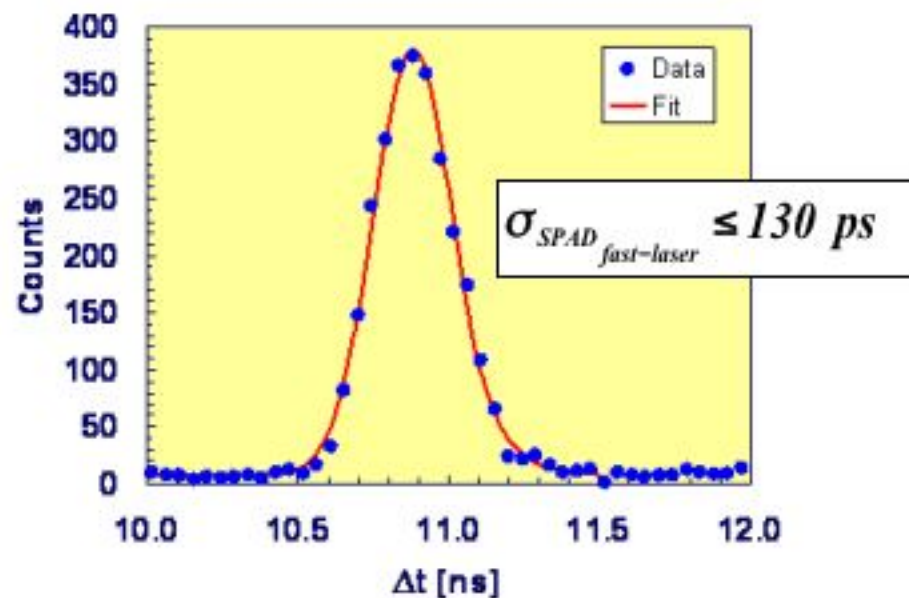
circuitto di quenching passivo:

- adatto ai rate intermedi ($< 1 \text{ KHz}$)
- semplice utilizzo con matrici
- $R_L = 100 \text{ K}\Omega$
- $R_S = 50 \Omega$

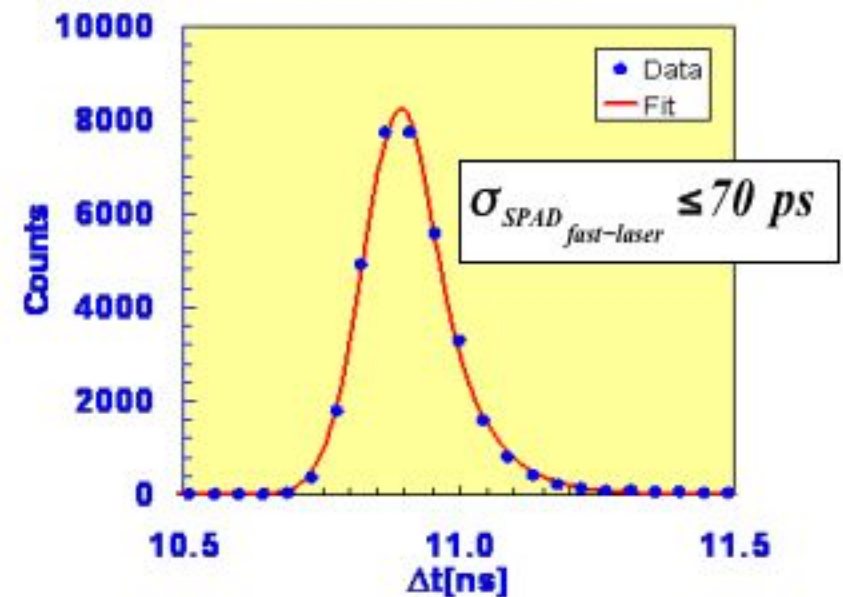
timing di SPAD



pochi fotoni



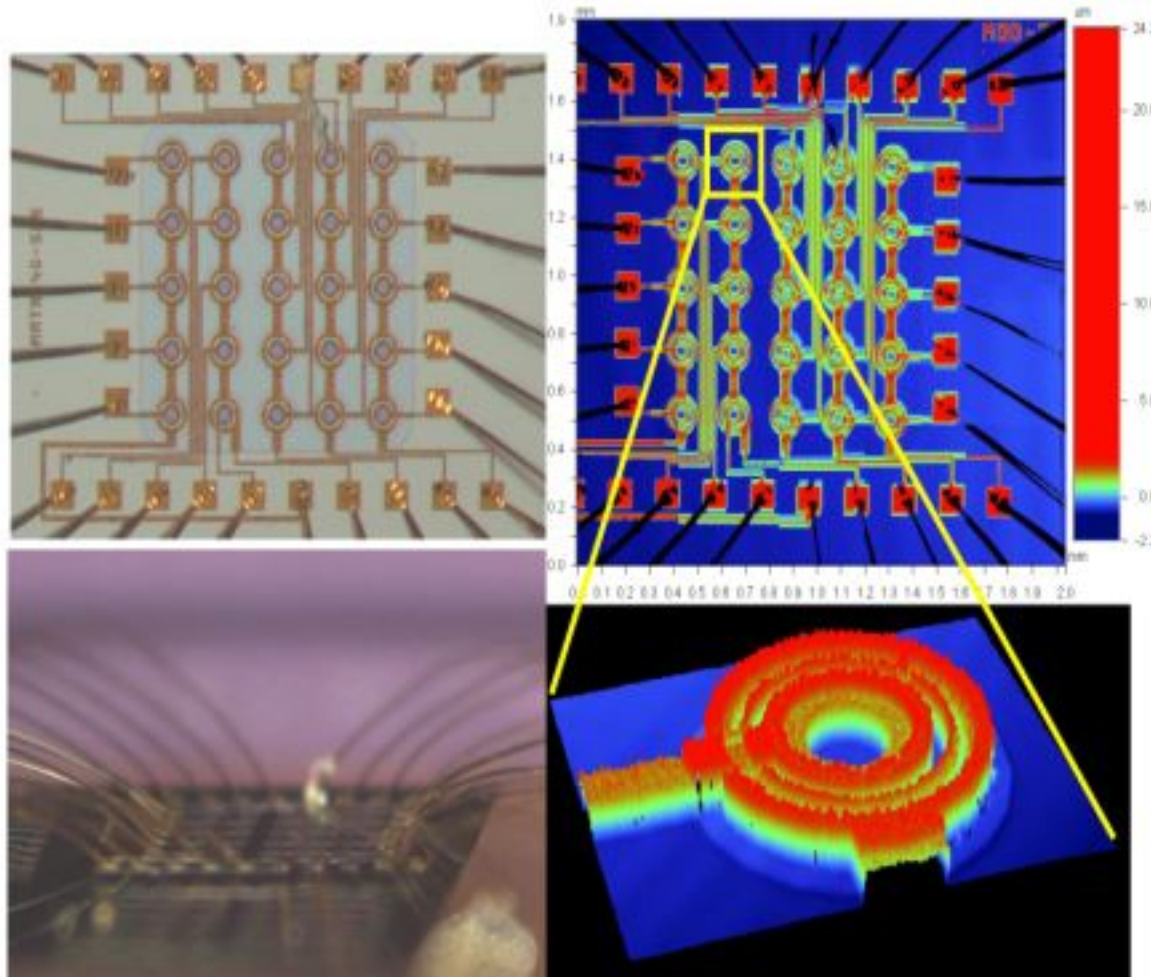
molti fotoni



P. Finocchiaro et al. Test of scintillator readout with single photon avalanche photodiode, in stampa su IEEE TONS (2005)

S.Tudisco et al. SINPHOS proceeding of SPIE (2005)

Matrice di SPAD

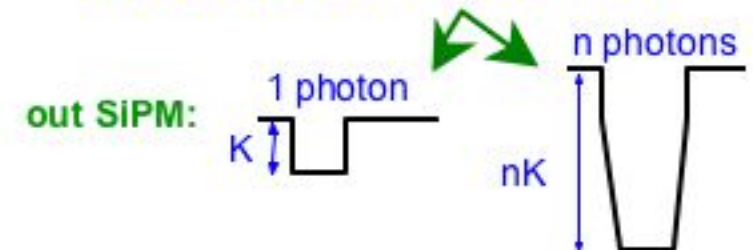


struttura:

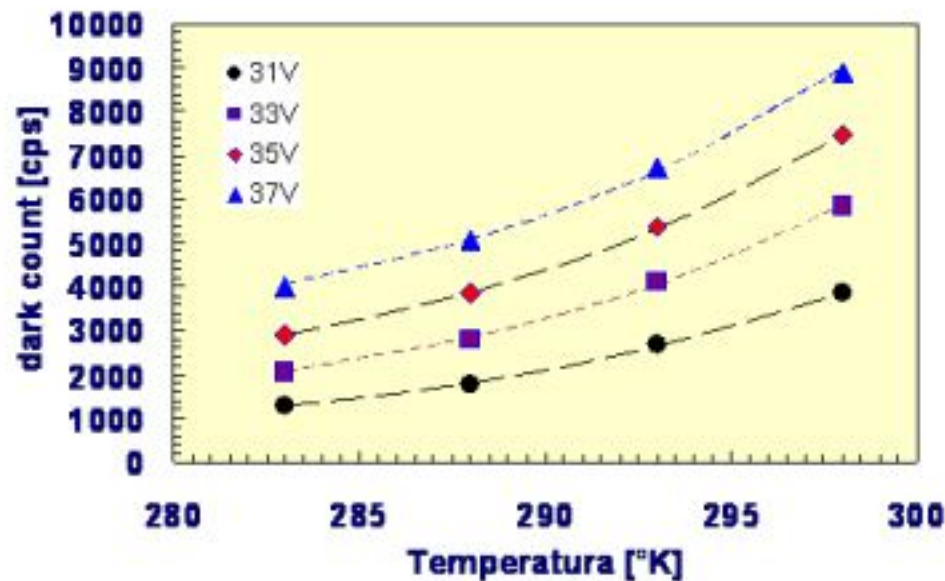
- ✓ matrice 5x5 $\Phi=50\text{ }\mu\text{m}$
- ✓ passo $200\text{ }\mu\text{m}$
- ✓ 5 array lineari ad anodo comune

configurazioni utilizzate:

- ✓ 5 SPAD con uscite individuali
- ✓ SiPM (SiliconPhoto Multiplier): da 5 a 25 uscite in comune



singolo pixel



Scelta ottimale della tensione e della temperatura per avere dark count ridotto e buona efficienza di rivelazione



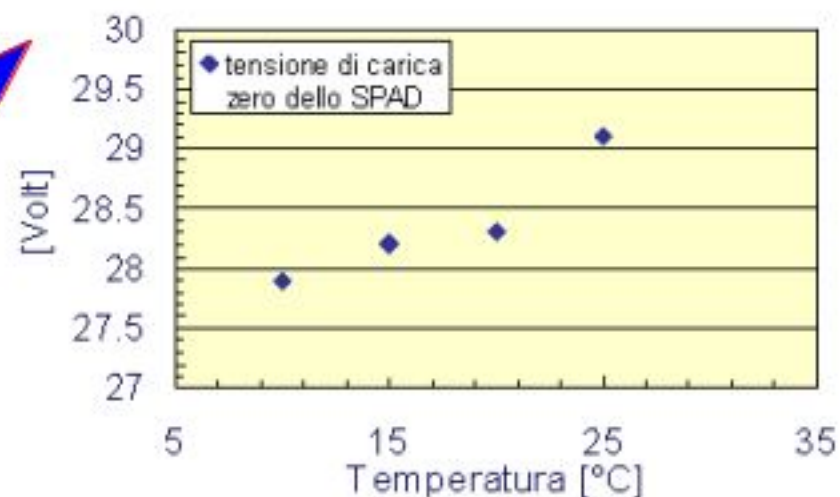
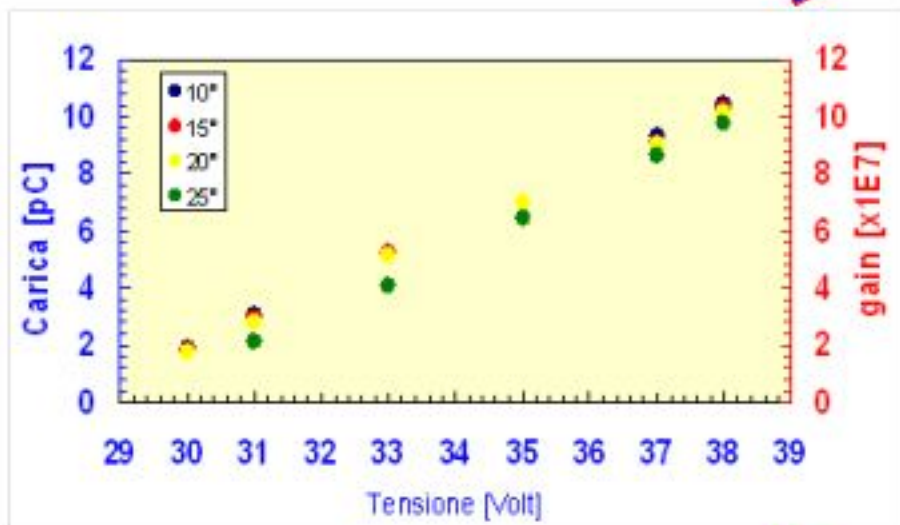
carica media e guadagno lineare con la tensione applicata:

$$Q = (C_D + C) \cdot V_{ex} \Rightarrow C_D + C \approx 1 \text{ pF}$$

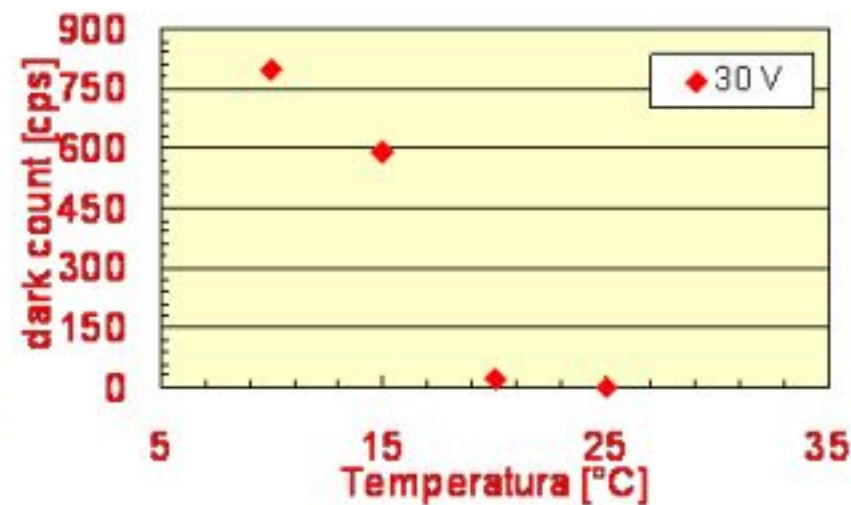
tensione di carica zero $\approx 28.5 \text{ V}$

singolo pixel

$$\frac{dV_b}{dT} > 0$$

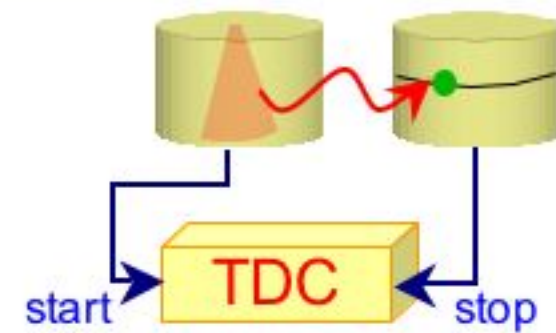


si riduce la V_{ex} e il numero
di eventi che superano
la soglia di discriminazione



cross talk

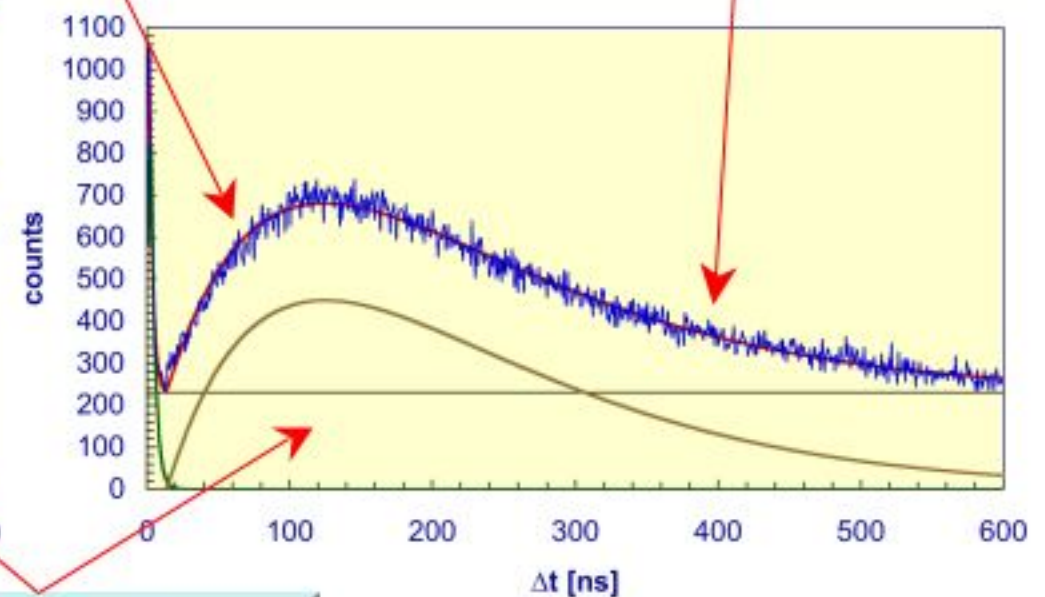
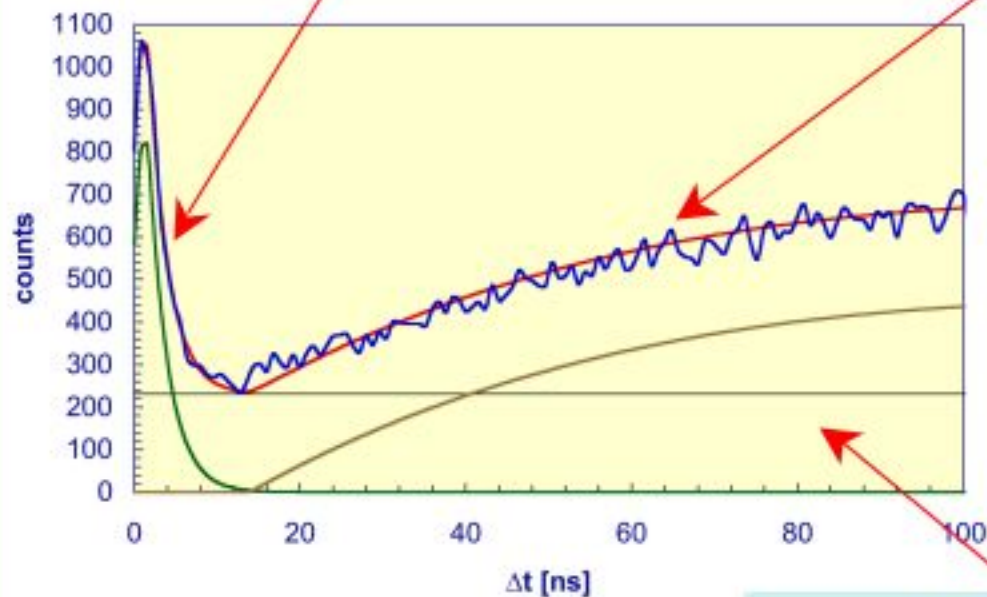
cross-talk & after-pulsing misurati utilizzando
il dark count ad una $V_a = 34$ V



cross talk dopo 1.9 ns

ricarica esponenziale
 $\tau \approx 30$ ns

cross talk ritardato per
effetto di afterpulsing
 $\tau \approx 300$ ns

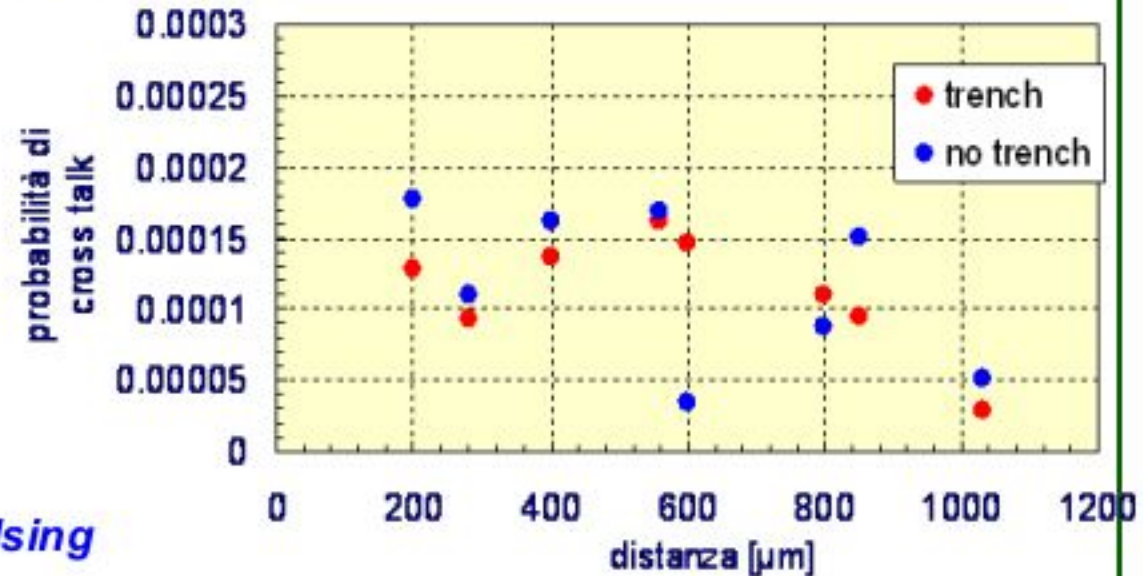
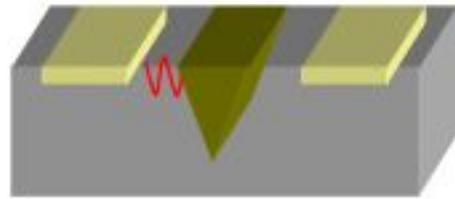


dark count

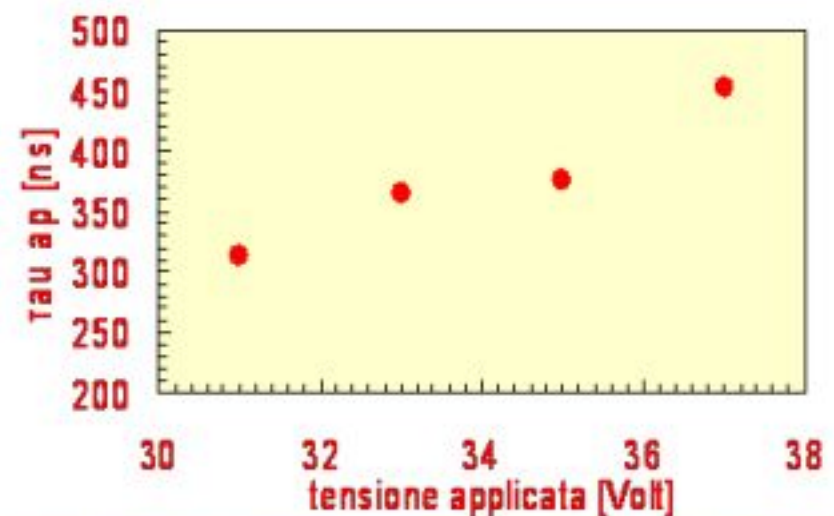
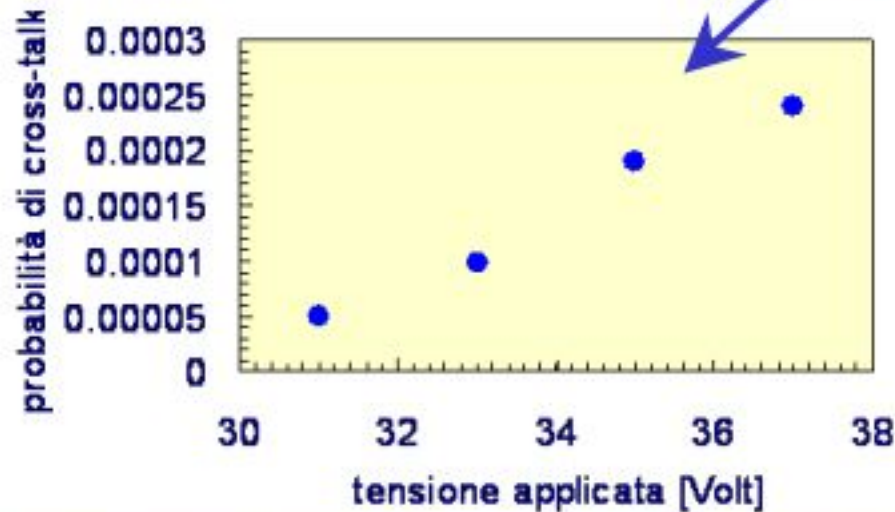
cross talk

misure effettuate su matrici con e senza trench

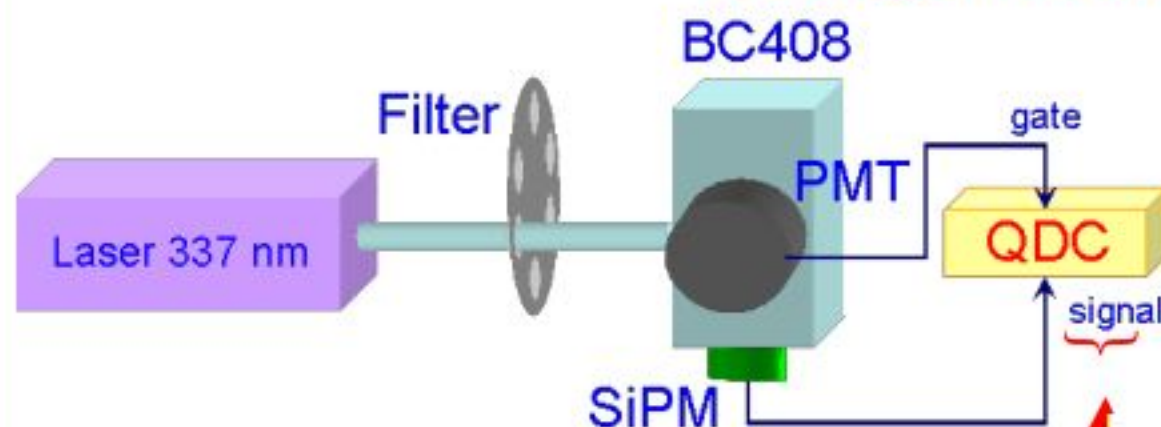
trench: *isolamento ottico*
tra due pixel



dependenza del cross talk e dell'afterpulsing
dalla tensione applicata



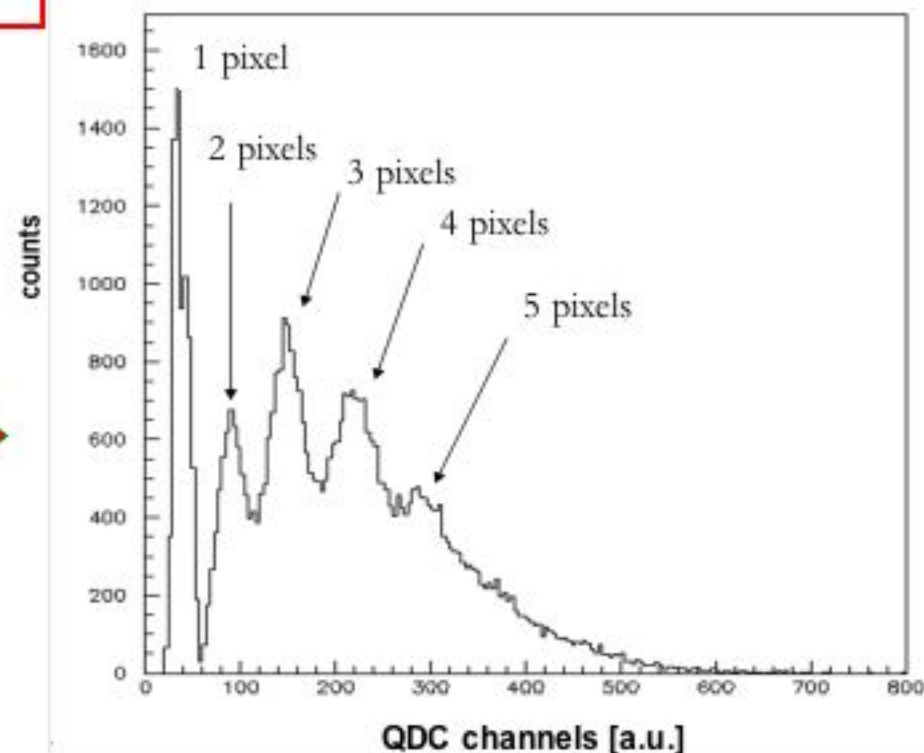
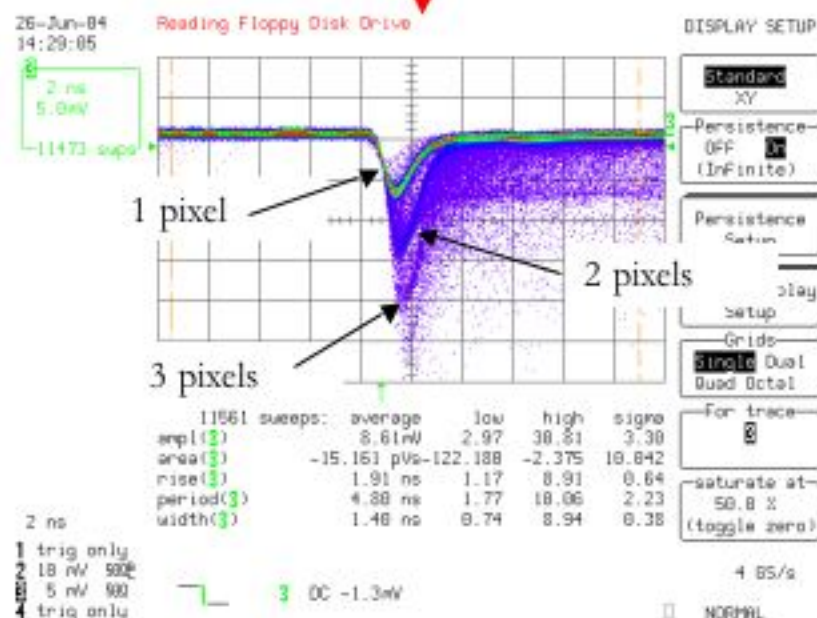
Configurazione SiPM



luce a 425nm: scintillatore plastico

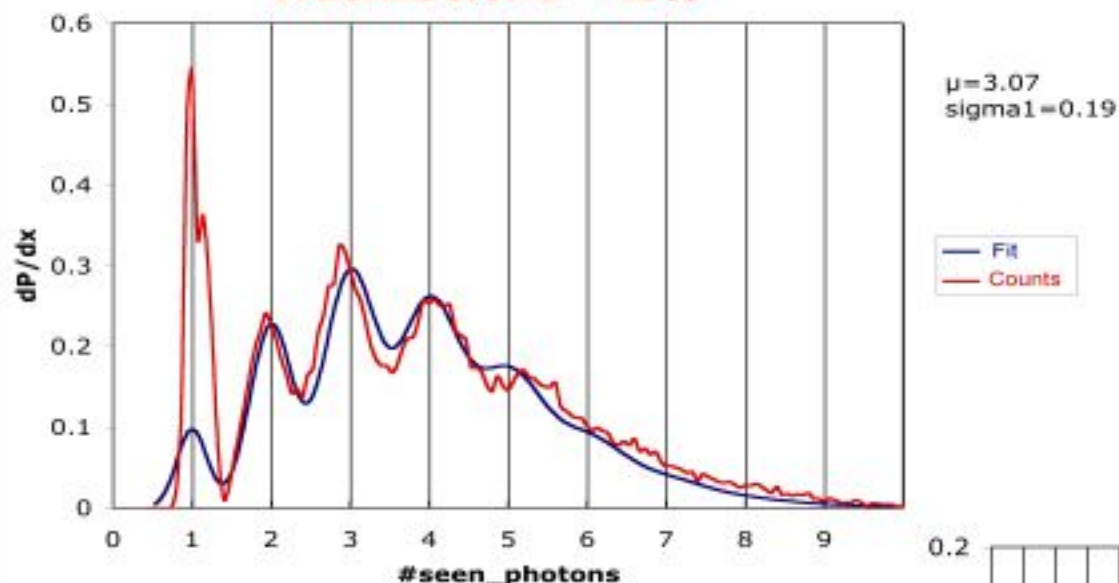
$$V_A = 31 \text{ Volt}$$

$$\frac{N_{ph}^{PMT}}{N_{ph}^{SiPM}} \approx 1600$$



Configurazione SiPM

Trasmissione ~ 10%

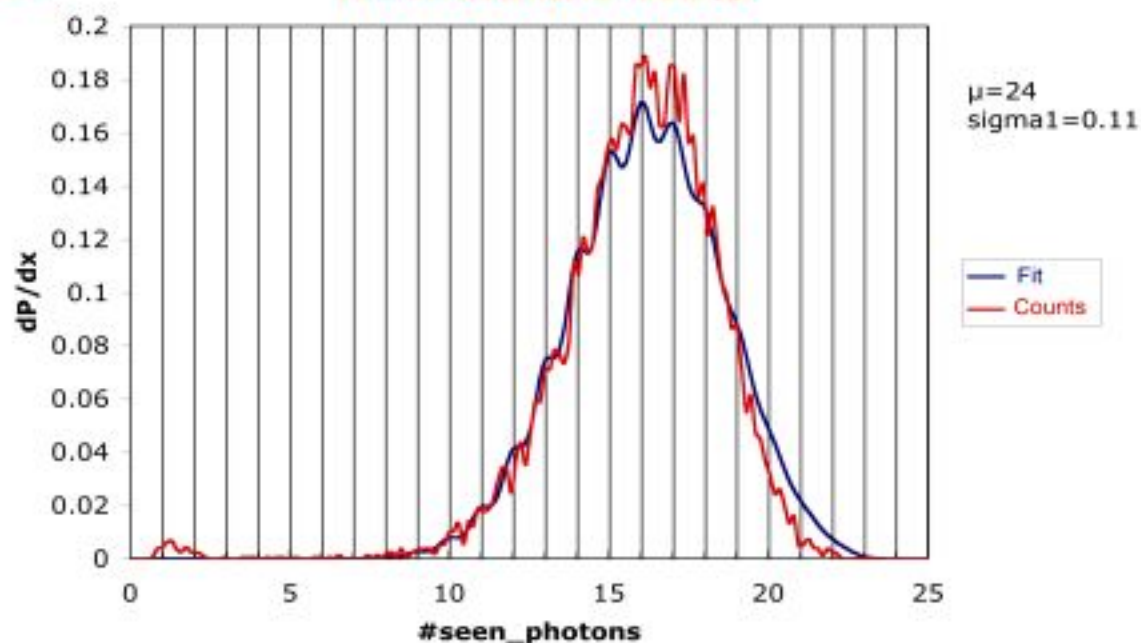


Il fit considera:

- *distribuzione di Poisson*
- *probabilità di hit multiplo*
- *risoluzione finita per i vari pixel*
- *efficienza di rivelazione pari ad 1*

*la distribuzione di Poisson satura
verso una gaussiana con l'incremento
del numero di fotoni*

Trasmissione 100%



Conclusioni

SPAD e matrici

Sono stati caratterizzati i sensori SPAD e le relative matrici tramite scintillatori e laser:

- ✓ **timing ≤ 70 ps**
- ✓ **guadagno 10^7**
- ✓ **dark count rate $\sim 10^3$**
- ✓ **probabilità di cross-talk 10^{-4}**
- ✓ **afterpulsing 300 ns**

La matrice 5x5 in configurazione SiPM fornisce dei risultati incoraggianti

sviluppi futuri

- **nuovi prototipi di matrici con PQC integrato**
- **accoppiamento di SPAD e matrici con microcomponenti ottici realizzati in tecnica DLP (Deep Lithography with Particles)**

pubblicazioni

- P. Finocchiaro, A. Campisi, D. Corso, L. Cosentino, G. Fallica, S. Lombardo, M. Mazzillo, F. Musumeci, A. Piazza, G. Privitera, S. Privitera, E. Rimini, D. Sanfilippo, E. Sciacca, A. Scordino, S. Tudisco - **Test of scintillator readout with single photon avalanche photodiodes** – presentato al NSS, Roma october 2004 – in stampa su IEEE Transaction on Nuclear Science
- P. Finocchiaro, A. Campisi, L. Cosentino, A. Pappalardo, F. Musumeci, S. Privitera, A. Scordino, S. Tudisco, G. Fallica, D. Sanfilippo, M. Mazzillo, A. Piazza, J. Van Erps, M. Vervaeke, B. Volckaerts, P. Vynck, A. Hermanne, H. Thienpont, S. Lombardo, E. Sciacca - **A new generation of low-voltage single photon micro-sensors with timing capability** – presentato al NDP, Beaune june 2005 – sottoposto a NIMA