

Politecnico di Milano

---

# **Evolution and Prospect of Single-Photon Avalanche Diodes and Quenching Circuits**

---

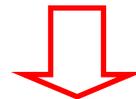
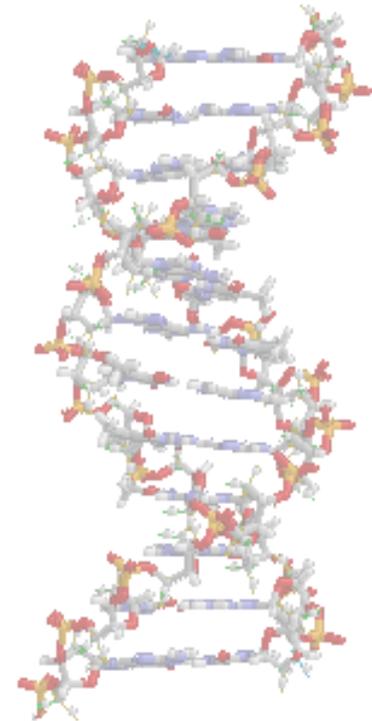
**- Ivan Rech -**

1st Workshop su “Photon Detection”

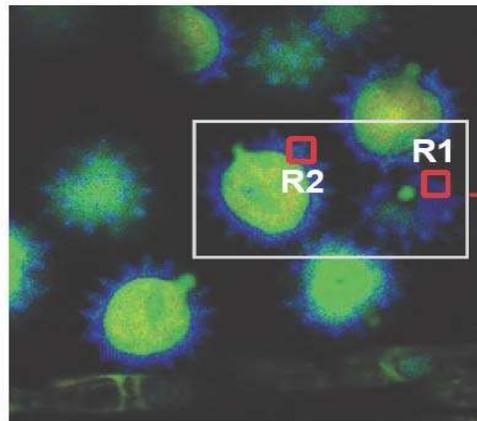
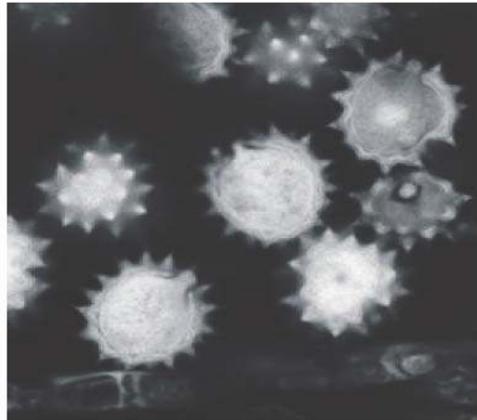
13-14 giugno 2007



- **Forte sviluppo di tecniche basate sulla **Fluorescenza****
  - Genomica / Proteomica
  - Bioingegneria
  - Diagnosi Mediche
- **L'Analisi di Singole Molecole è interessante**
  - Stati conformazionali / Dinamiche conformazionali
  - Attività delle Singole Molecole
  - Evita il mascheramento dovuto alla *Media di Insieme*



**Sono necessari opportuni rivelatori**



Courtesy of Picoquant

- **Alta Sensibilità (singolo fotone)**
  - Alta efficienza quantica  $> 40\%$
  - Basso Rumore  $< 100$  c/s
- **Alta Risoluzione Temporale**  $< 50$ ps
  - Fluorescenze con costanti di tempo ridotte
- **Diametri Elevati**  $> 50\ \mu\text{m}$ 
  - Alta efficienza di raccolta
  - Ottica semplificata
  - Fiber Pigtailling



# SPAD

## Principio di Funzionamento

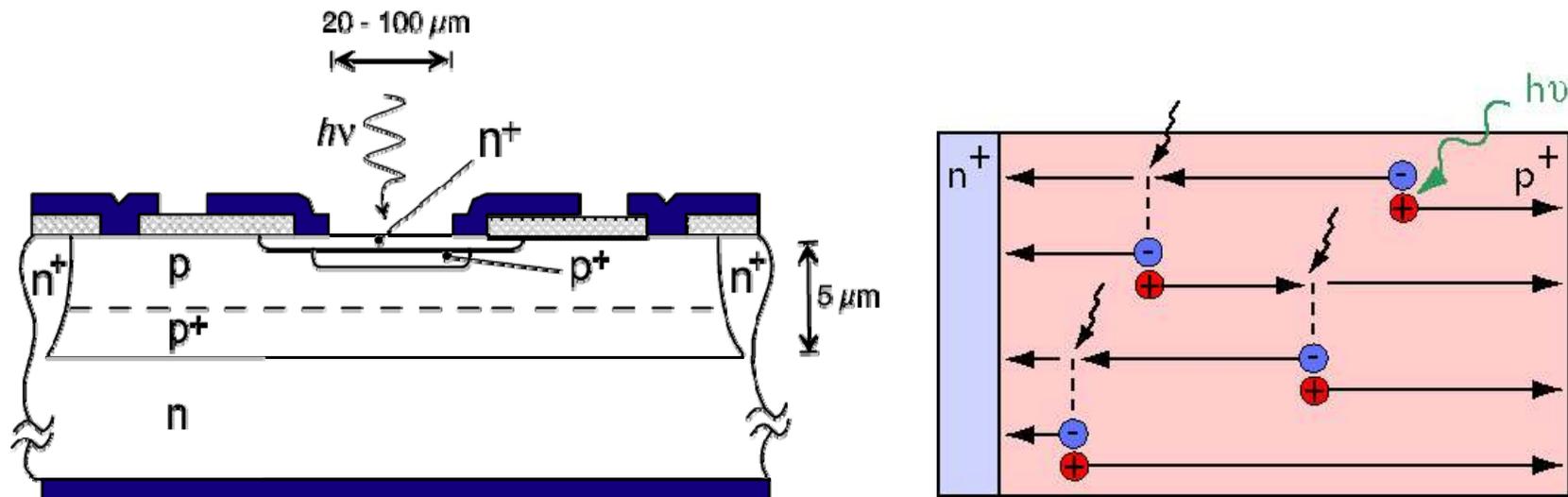
# SPAD: Principio di Funzionamento



## E' un giunzione pn:

- Polarizzazione inversa sopra al breakdown
- Non scorre corrente (Stato metastabile)
- Assorbimento di un fotone  $\rightarrow$  Generazione di una coppia  $e^- - h^+$
- La ionizzazione per impatto innesca la valanga (autosostenuta)
- Segnale di corrente/tensione macroscopico

**NB:** Necessario circuito di spegnimento e ripolarizzazione:



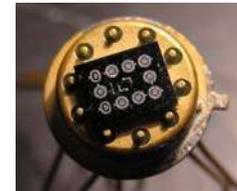


# SPAD

## Prestazioni



- **Slik** (Perkin-Elmer)
  - Basso rumore ( $<100\text{c/s}$  *raffreddato*)
  - Diametri elevati ( $180\mu\text{m}$ )
  - Timing insufficiente ( **$>350\text{ps}$** )
  
- **$\mu\text{P10}$**  (ST-Microelectronics Castelletto, 1990)
  - Rumore elevato ( $<1000\text{c/s}$  @5V)
  - Ottimo timing ( $30\text{ps}$ )
  - Diametro ridotto ( **$8\mu\text{m}$** )



**Nessun rivelatore soddisfa tutti i requisiti**

- Trade off: **AREA** – **RUMORE** – **TIMING**



## Nuova generazione di dispositivi

### Run 1 - 4 - 6 (CNR-IMM Bologna, 2003-2006)

- Diametri elevati (20, 50, 100, 200 $\mu$ m)
- Basso rumore (<10c/s, 50 $\mu$ m)
- Alta efficienza quantica (55% @5V overvoltage)
- Timing ottimo (30ps – 35ps)

### Rumore:

- Basso
- Scala linearmente con l'area

### Risoluzione temporale:

- FWHM=35ps
- Indipendente dall'area



## Rumore

- Processi di Gettering
- Studio del rumore negli SPAD
  - Principali contributi
  - Dipendenza dalla temperatura
  - Dipendenza dal campo elettrico
- Progettazione di dispositivi ottimizzati

## Risoluzione temporale

- Soluzioni circuitali per l'ottimizzazione del timing



# **RUMORE**

## **Dipendenza dalla temperatura**



## Applicazioni

- Il rumore si riduce con la temperatura
- Raffreddamento con Peltier:
  - Semplice
  - Economico
  - Robusto

⇒ Valutazione delle **prestazioni a bassa temperatura**

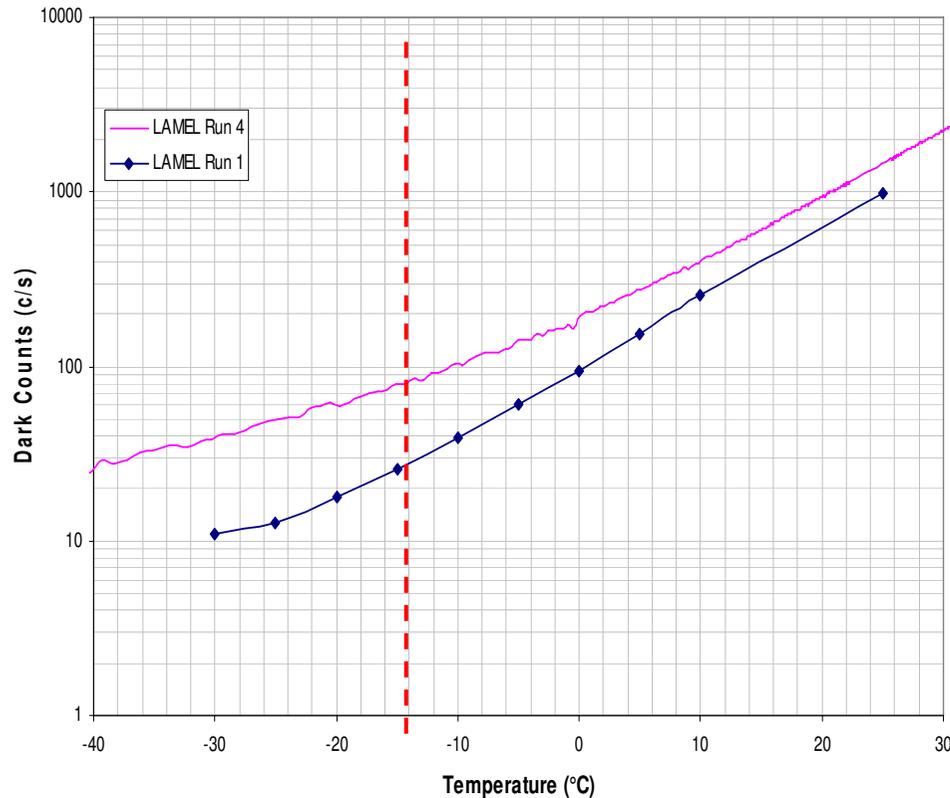
## Fisica del dispositivo

- Vari fenomeni responsabili dei DCR
- Diversa dipendenza dalla temperatura

⇒ Possibilità di identificare i **contributi dominanti**



Dark Counts vs Temperature



## Dispositivi utilizzati:

- Run 1 e Run 4

## Conteggi di buio:

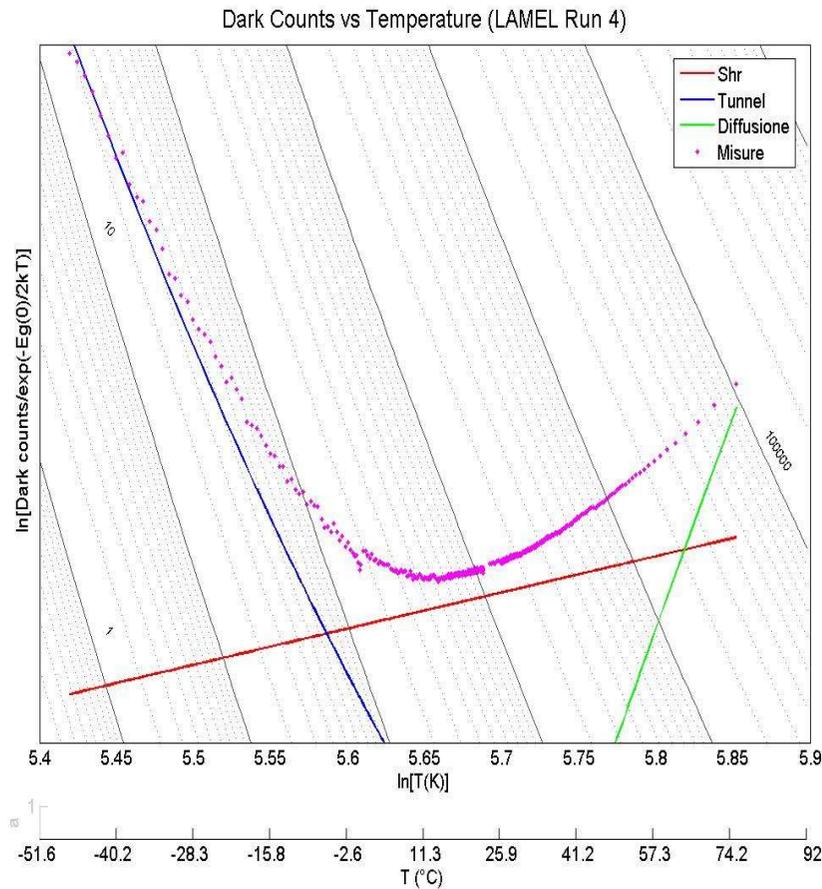
- Simili a temperatura ambiente
- Diversa dipendenza dalla temperatura

## Quali sono le cause?

## Si può ottimizzare?

- Raffreddamento Peltier più efficace

# Principali Contributi al Rumore



## Individuati tre contributi:

- Band to Band Tunnel (BBT)
- SHR
- Diffusione



## Tunneling dominante a bassa T



## Margini di progetto indipendenti da:

- Pulizia del processo
- Efficacia del gettering

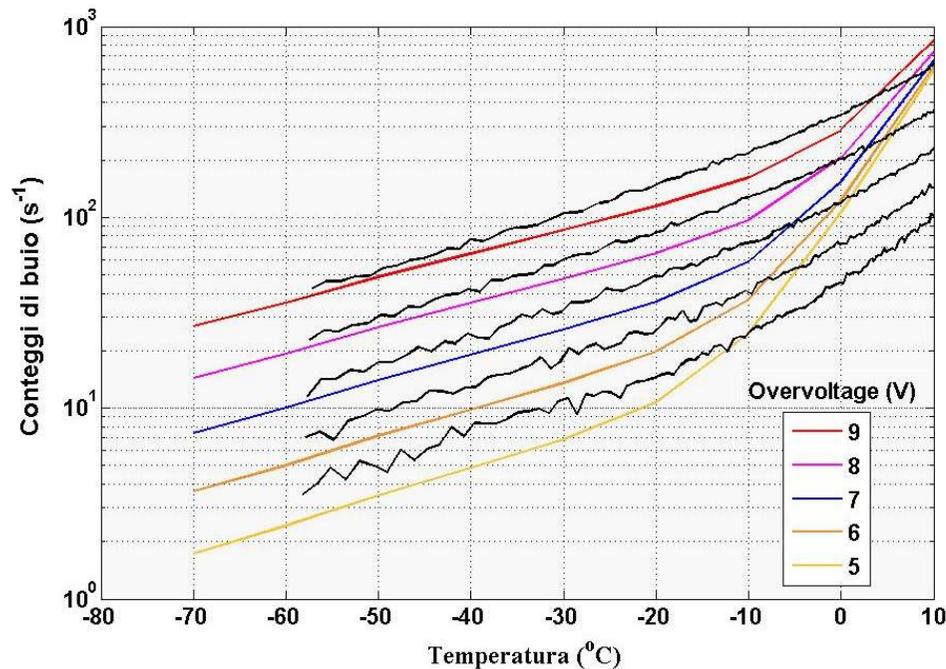
# Simulazione Effetto Tunnel



## Modello: Tunneling Hurkx

$$R_{BBT} = B \cdot |F|^\sigma e^{\frac{-F_0}{F}}$$

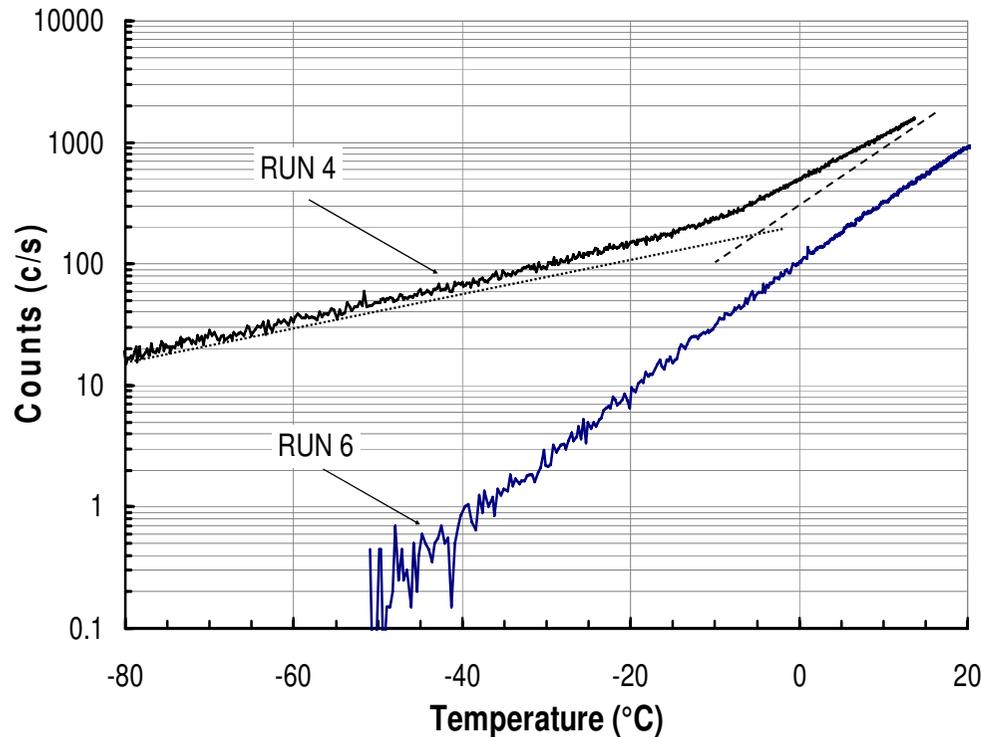
- Modello semi-empirico
- Forte dipendenza dal campo elettrico F
- Implementato in DESSIS, ma con errori



## Risultato delle simulazioni

- Buon fitting con i dati sperimentali
- Deviazioni ad alta temperatura  
→ previste

**NB: Necessario conoscere il profilo di drogaggio**



## DCR vs Temperatura

- Run 4: Tunnel dominante a  $-10^{\circ}\text{C}$
- Run 6: **Non c'è traccia di effetto tunnel**

## Raffreddamento a $-50^{\circ}\text{C}$

- Possibile con Peltier (3 stadi)
- Richiede raffreddamento ad aria
- Comporta **maggiori complicazioni**

## Conviene passare da $-15^{\circ}\text{C}$ a $-50^{\circ}\text{C}$ ?

Il DCR si riduce di un:

- **fattore 4** per il Run 4 → **NO**
- **fattore 100** per il Run 6 → **SI'**

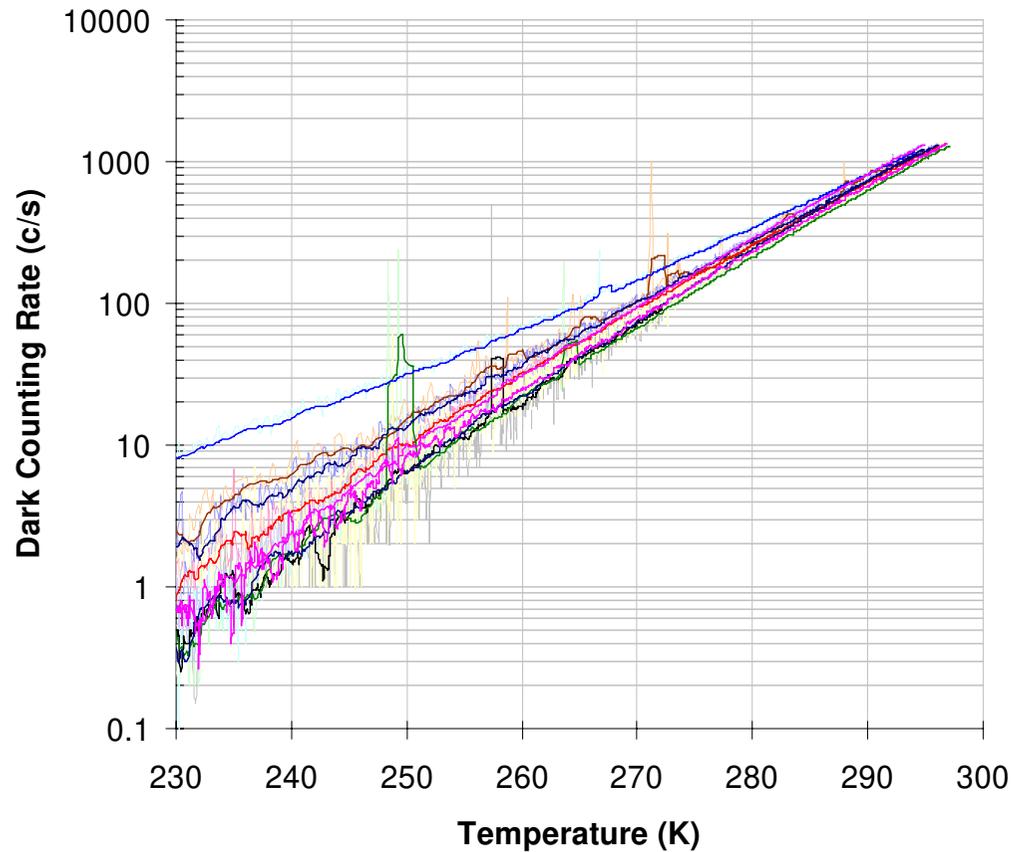
## Tunneling visibile sotto i $-50^{\circ}\text{C}$ ?

DCR troppo basso → Curve troppo rumorose → **Difficile da verificare**



# **RUMORE**

## **Influenza delle impurezze**



Pendenze molto simili

ma **NON IDENTICHE**



Difetti diversi?

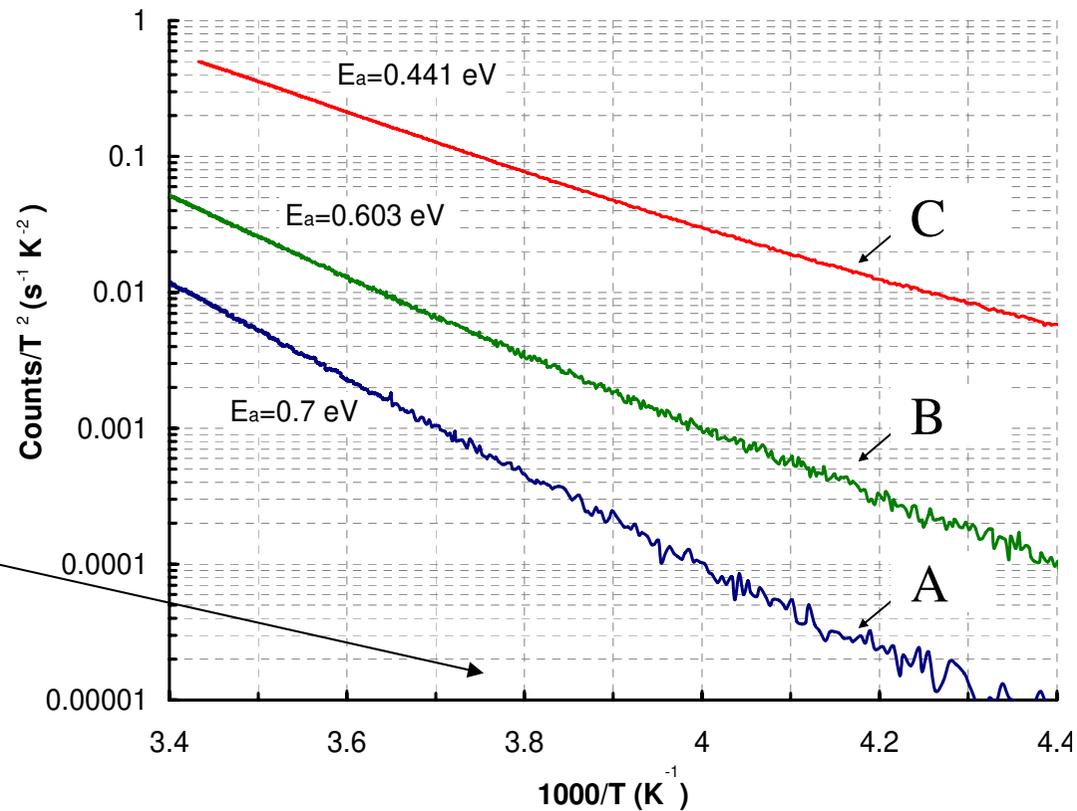
Si possono ottenere  
informazioni sui difetti?

# Diagrammi di Arrhenius



- Logaritmico
- $G_{SRH}/T^2$

- Lineare
- $1000/T$

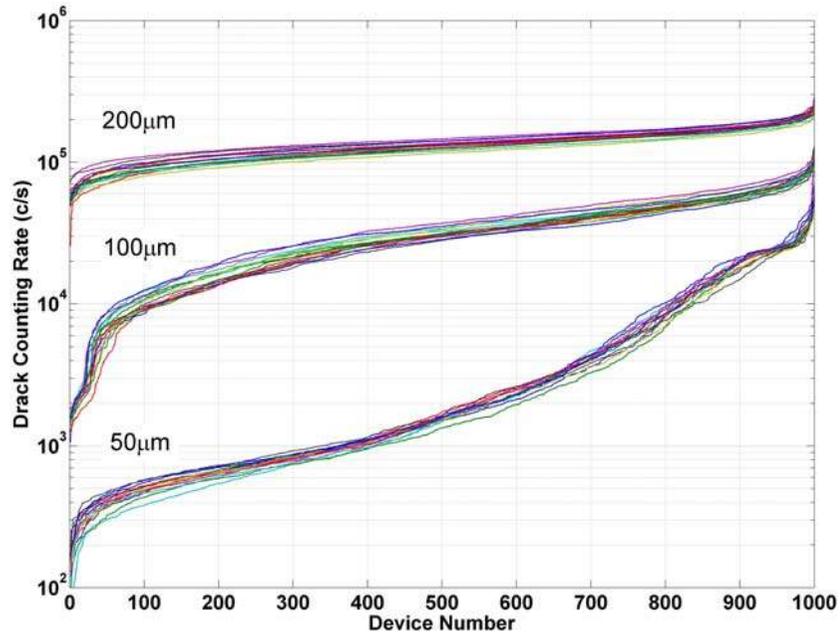


Rette con pendenza:  $-\frac{E_G + 2|E_T - E_i|}{2}$

- Ci sono **diversi tipi di trappole**



In realtà, **non è così semplice!**

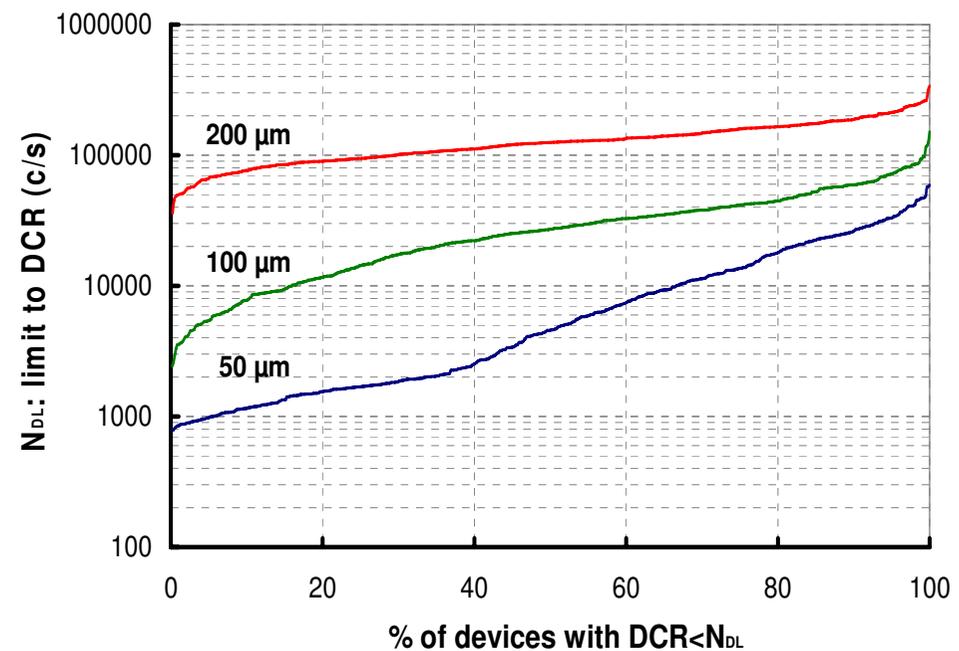


## Confronto simulazioni - misure

- Riprodotti gli andamenti di 50, 100 e 200µm !!

## Difetti “rari”

- Sono responsabili dello yield
- Giustificano lo scaling inverso con l’area

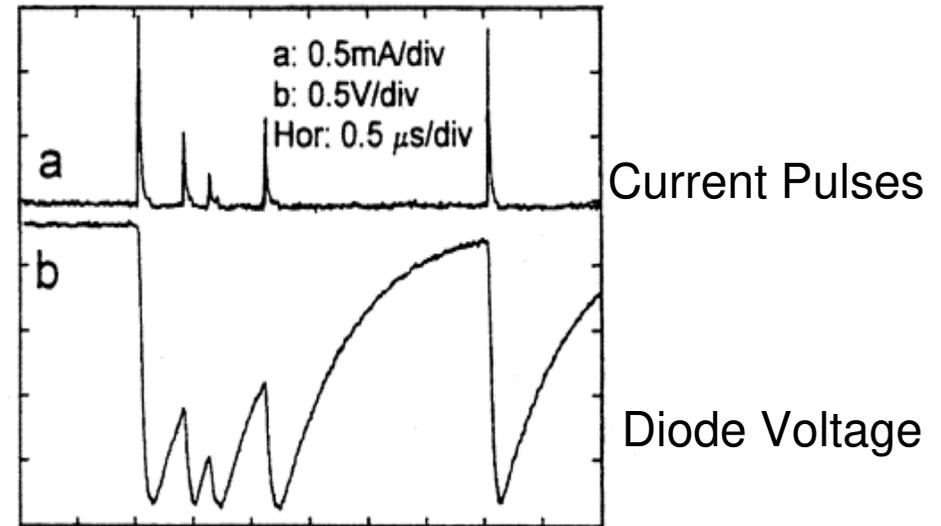
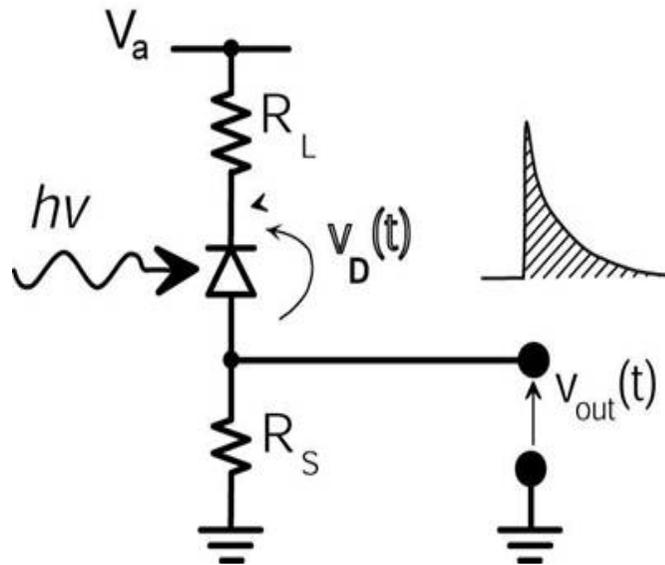




# AQC

## Active Quenching Circuit

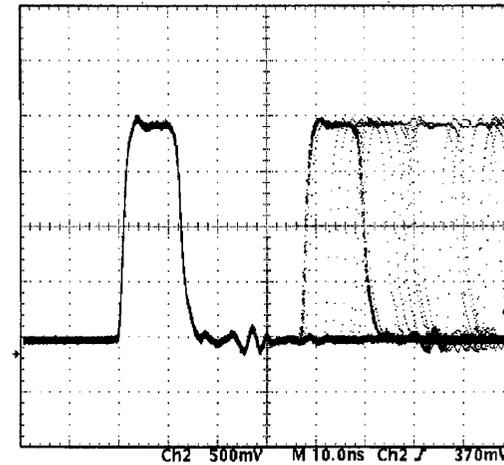
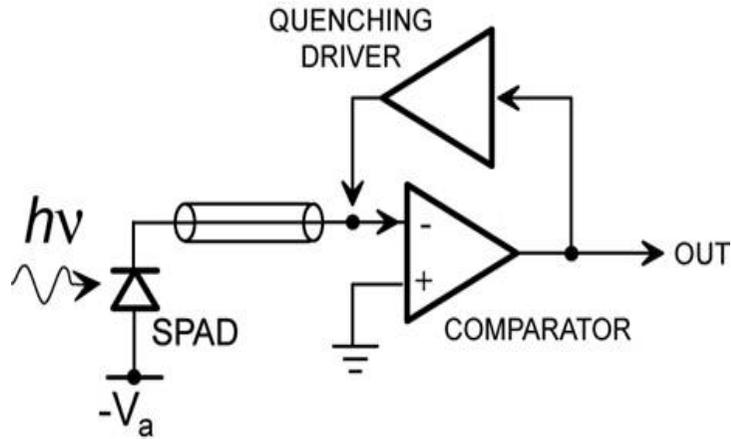
# Il quenching passivo è semplice...



... ma soffre di..

- tempo morto lungo e non definito
- basso max counting rate < 100kc/s

# Active quenching....



Output Pulses

- tempo morto corto e ben definito
- alto counting rate  $> 1 \text{ Mc/s}$
- buon timing
- uscita logica standard

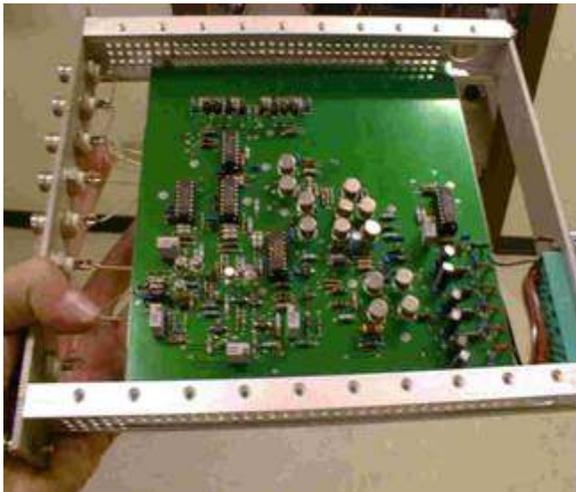
*P. Antognetti, S. Cova, A. Longoni  
IEEE Ispra Nucl. El. Symp. (1975) Euratom Publ. EUR 537e*

# AQC evolution

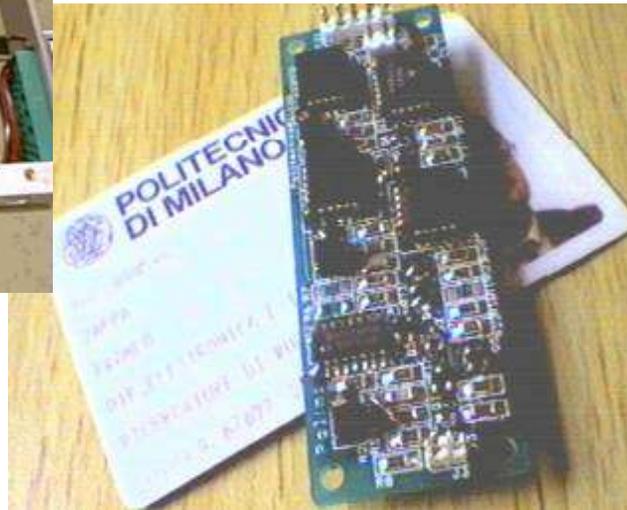
---



Primi moduli  
Anni 80



Moduli compatti  
Anni 90



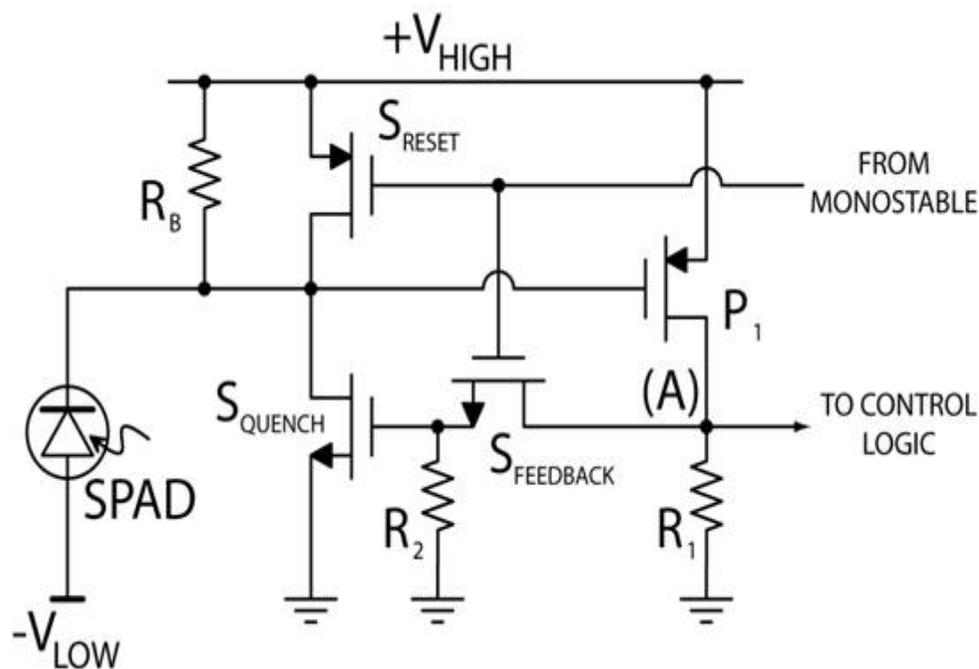
Integrated AQC  
Oggi



# iAQC - Integrated Active Quenching Circuit

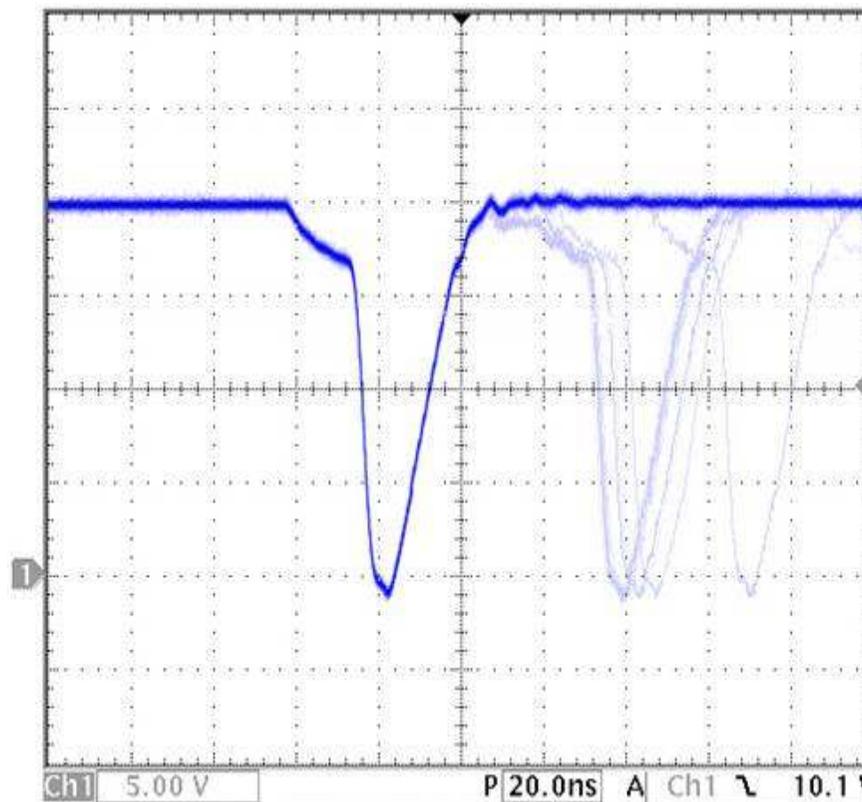
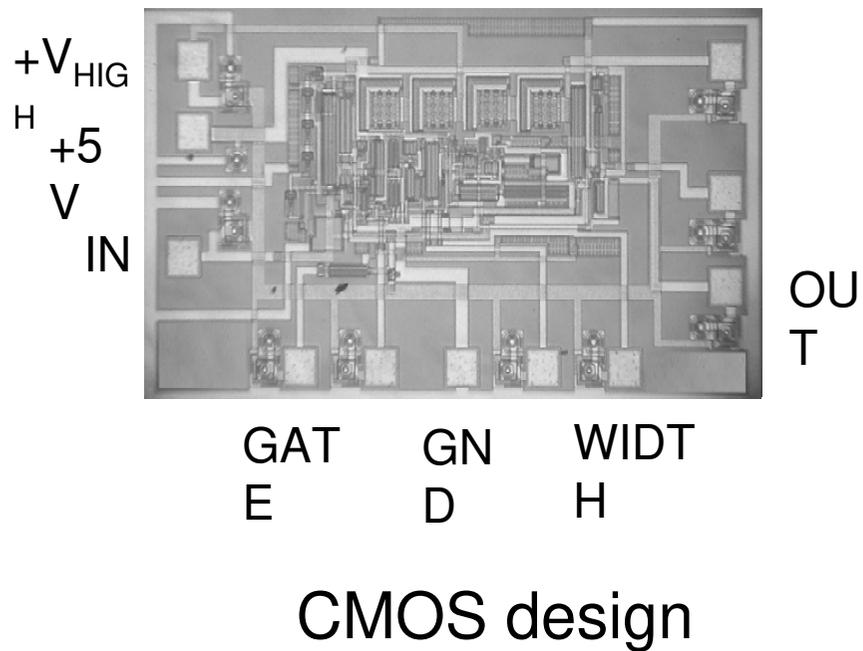


Input sensing  
and quenching  
stage



- *F.Zappa, S.Cova, M.Ghioni, US patent appl. March 5, 2001, (allowance notice Nov. 6, 2002, priority date March 9, 2000)*
- *F. Zappa et al, ESSCIRC 2002*

# iAQC - Integrated Active Quenching Circuit





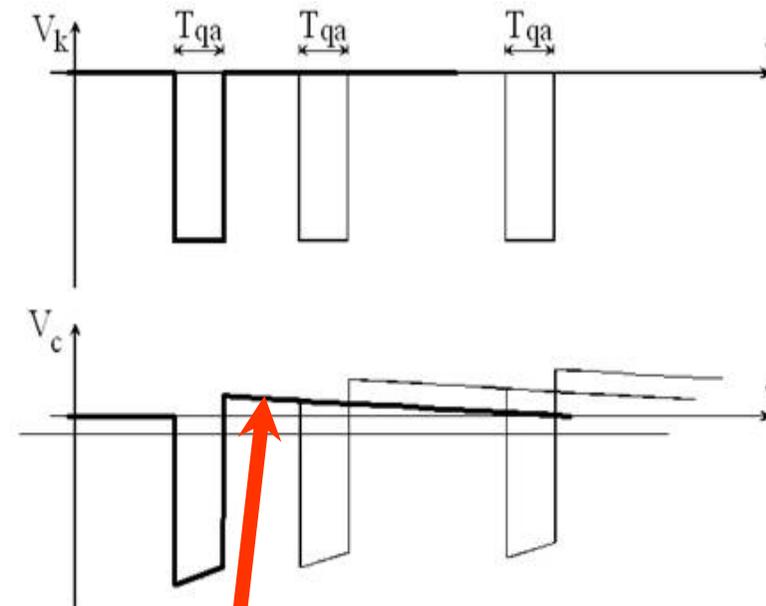
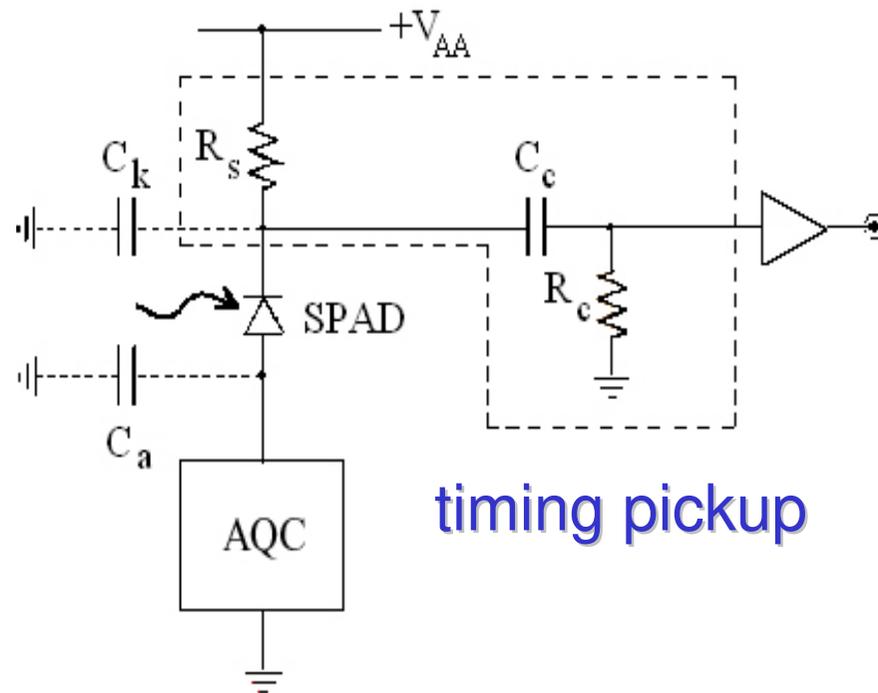
## Vantaggi

- Miniaturizzazione
- bassa dissipazione → moduli portatili
- Robustezza e affidabilità

## Performance superiori

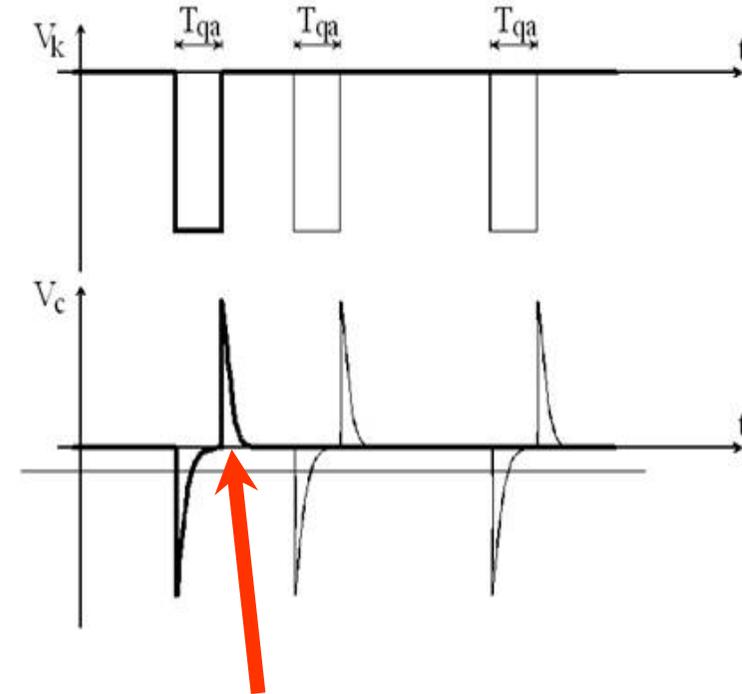
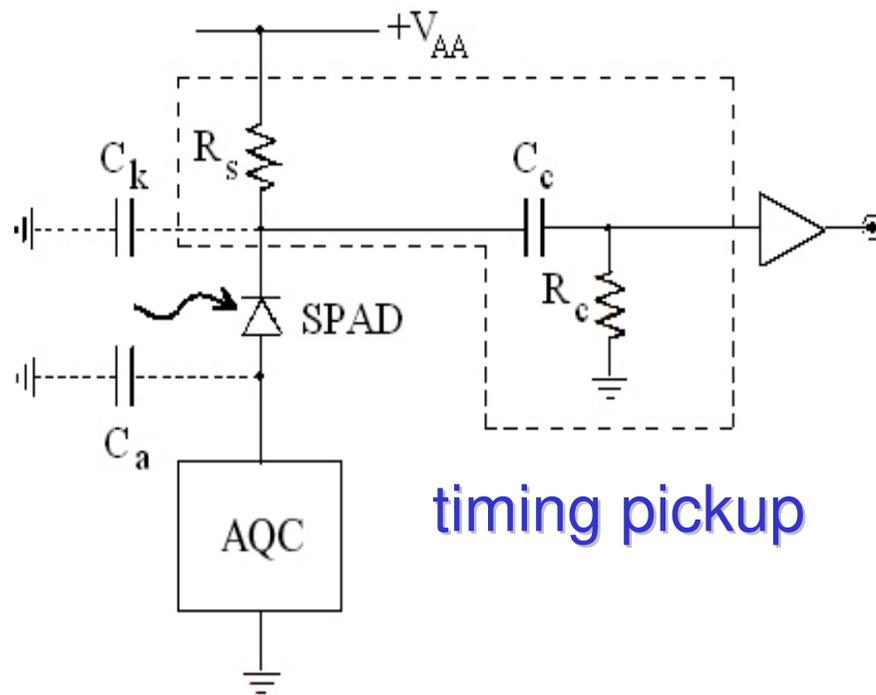
- Ridotta capacità
- Timing migliorato
- Ridotta carica di valanga
- Ridotto Afterpulsing
- Ridotta Fotoemissione → ridotto il crosstalk

# Photon-Timing si puo' migliorare?



...così  
non lavoro in modo adeguato

# Photon-Timing si puo' migliorare?



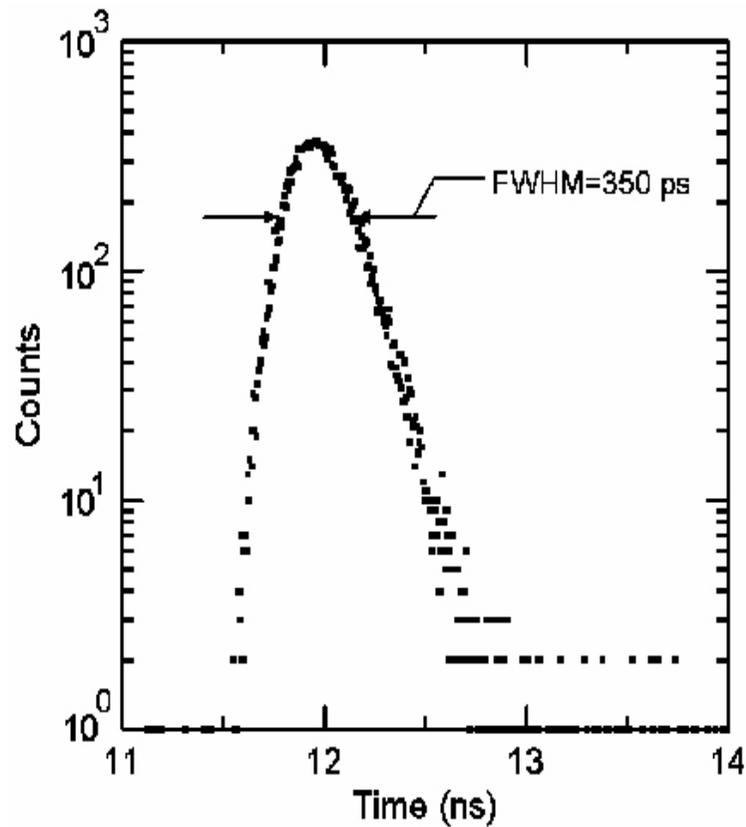
....così funziona!!

*S.Cova, M.Ghioni, F.Zappa, US patent No. 6,384,663 B2,  
date May 7, 2002 (priority date Mar 9, 2000)*

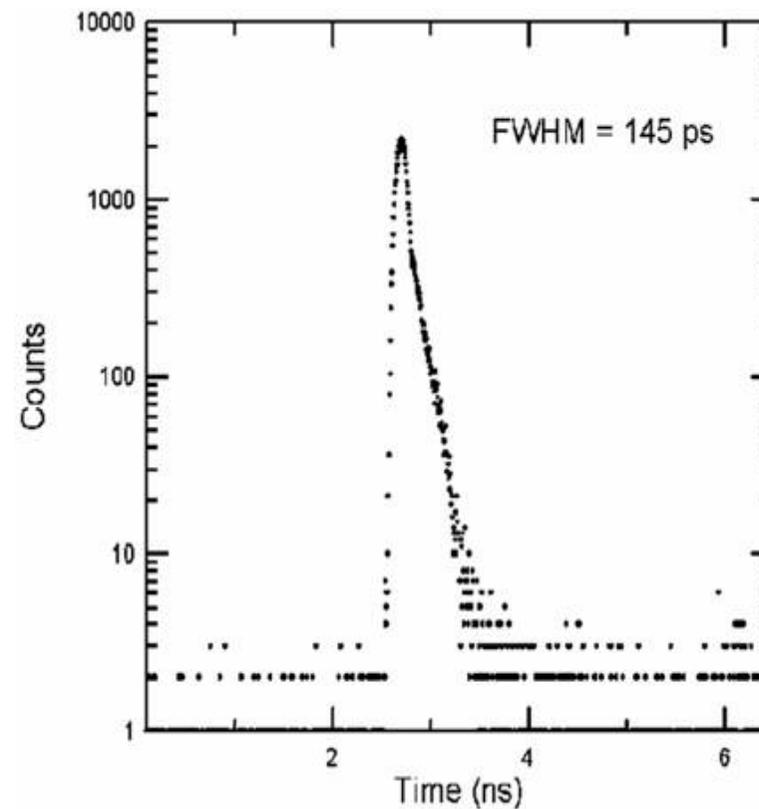
# Photon-Timing con PerkinElmer SLIK™ diode



con il solo AQC originale...



...con la scheda aggiuntiva



- Aumento della resa del processo
- Sviluppo di array e matrici
- Integrazione di mos nel processo SPAD

