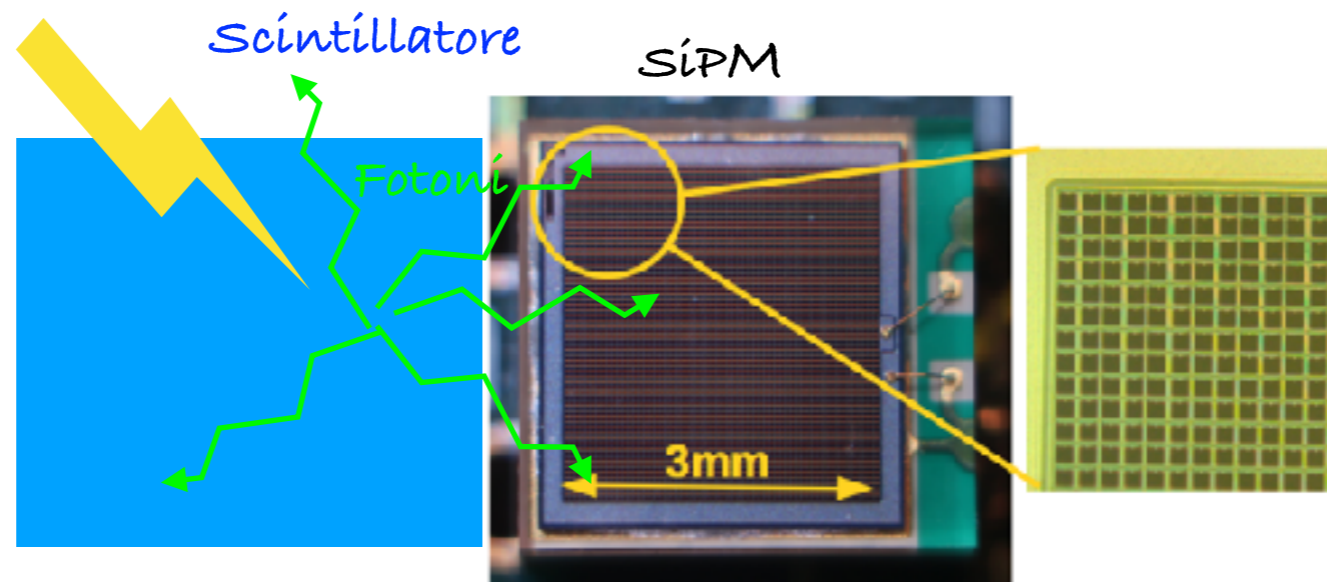


Rivelatori di luce

SiPM

SiPM in breve

È un **fotomoltiplicatore al Si**, basato su una **giunzione PN**, costituito da un **array di microcelle SPAD** che operano in modalità **Geiger**

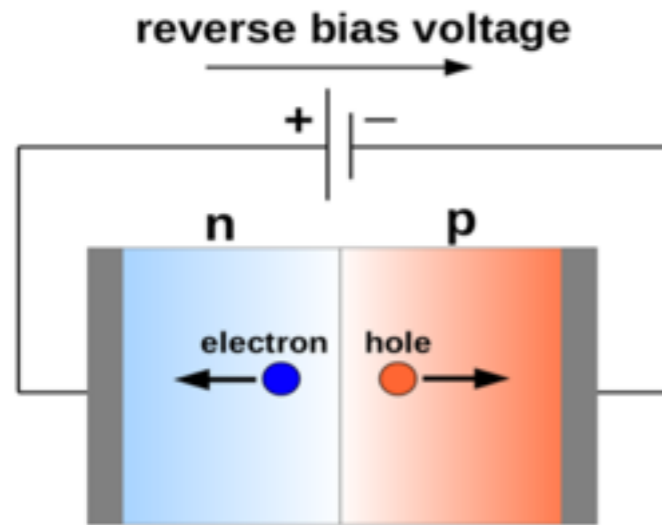


VANTAGGI:

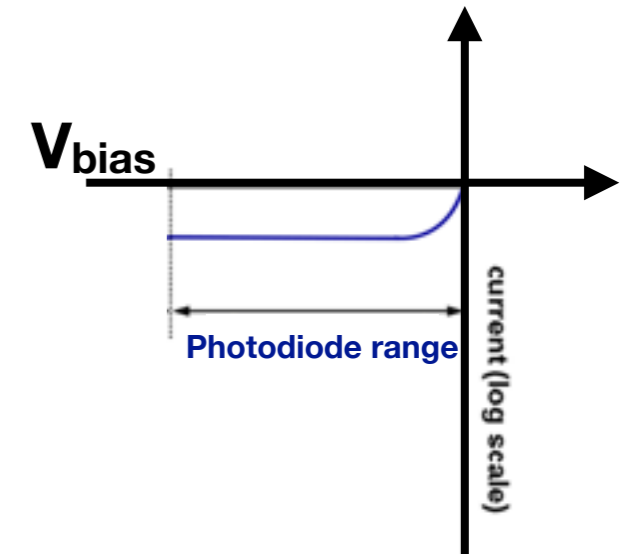
- più **compatti** (qch. mm^2 vs. tubo a vuoto ~ 10 cm)
- più robusti
- **insensibili ai campi magnetici**
- operano a **basse tensioni di lavoro** (30 V vs. 1-2 kV) pur avendo **guadagni $\sim 10^6$**
- maggiore **efficienza quantica** (50% vs. 25%)
- rivelare bassi segnali di luce (arrivano fino al **singolo fotone**)
- **rumore** al livello di singolo fotone
- può discriminare il **numero esatto di fotoni** incidenti come livelli discreti
- permette di ottenere uno **spettro ben risolto** (PMT ha gain variabile e più rumore)
- ottime proprietà **temporali** (usati in CMS, PET)

Da fotodiodo a SPAD (1)

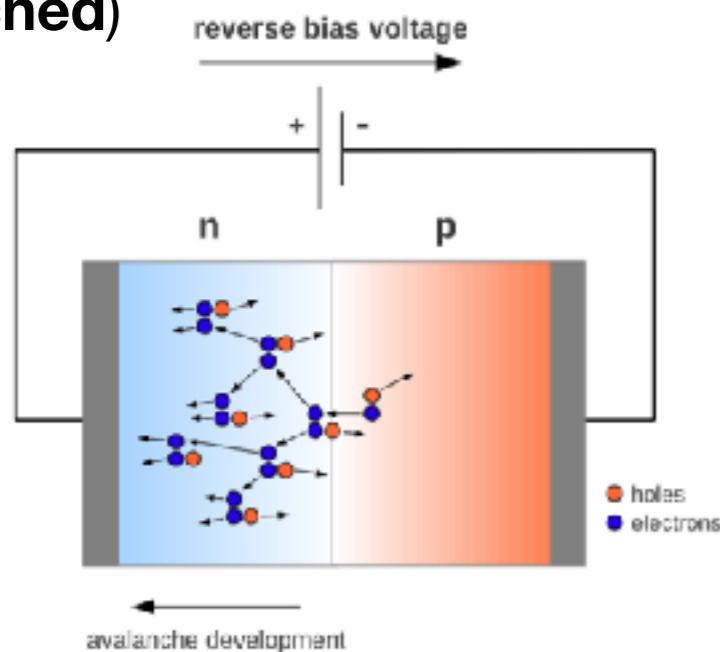
- **Giunzione PN in Si polarizzata inversamente** -> quando fotone ottico incide nella regione di svuotamento crea coppia e^-h^+ che sotto l'azione di \underline{E} crea corrente I



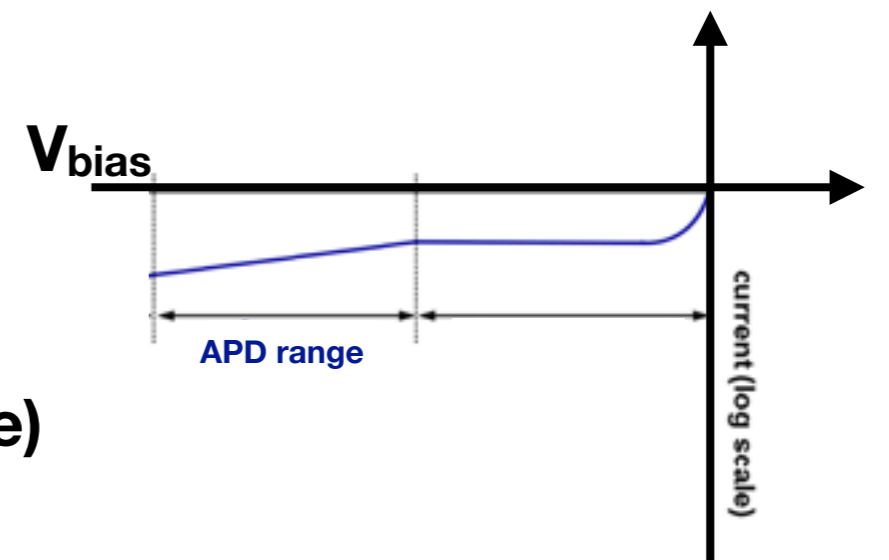
≡ **Fotodiodo**



- **Se aumento V entro in un regime in cui gli elettroni accelerati producono altre coppie.** È un regime **proporzionale ($I \propto V$)**, il guadagno è limitato (~ 100), e la valanga si auto-smorza (**self-quenched**)



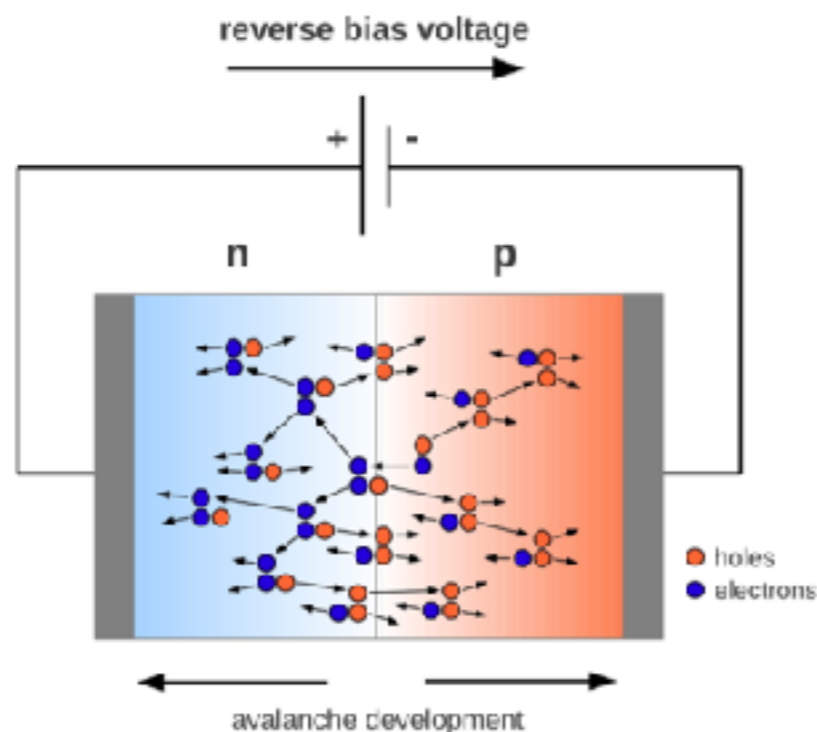
≡ **APD**
(Avalanche Photo Diode)



Da fotodiodo a SPAD (2)

Con $V_{\text{bias}} > V_{\text{break-down}}$ ($> 5 \times 10^5$ V) sia e^- che h^+ molto accelerati creano e^-h^+ secondari
-> il fotone iniziale da origine a I macroscopica e il Si diventa conduttivo (fa breakdown)
 \equiv nasce una **SCARICA GEIGER** con un altissimo numero di portatori ($\sim 10^6$)

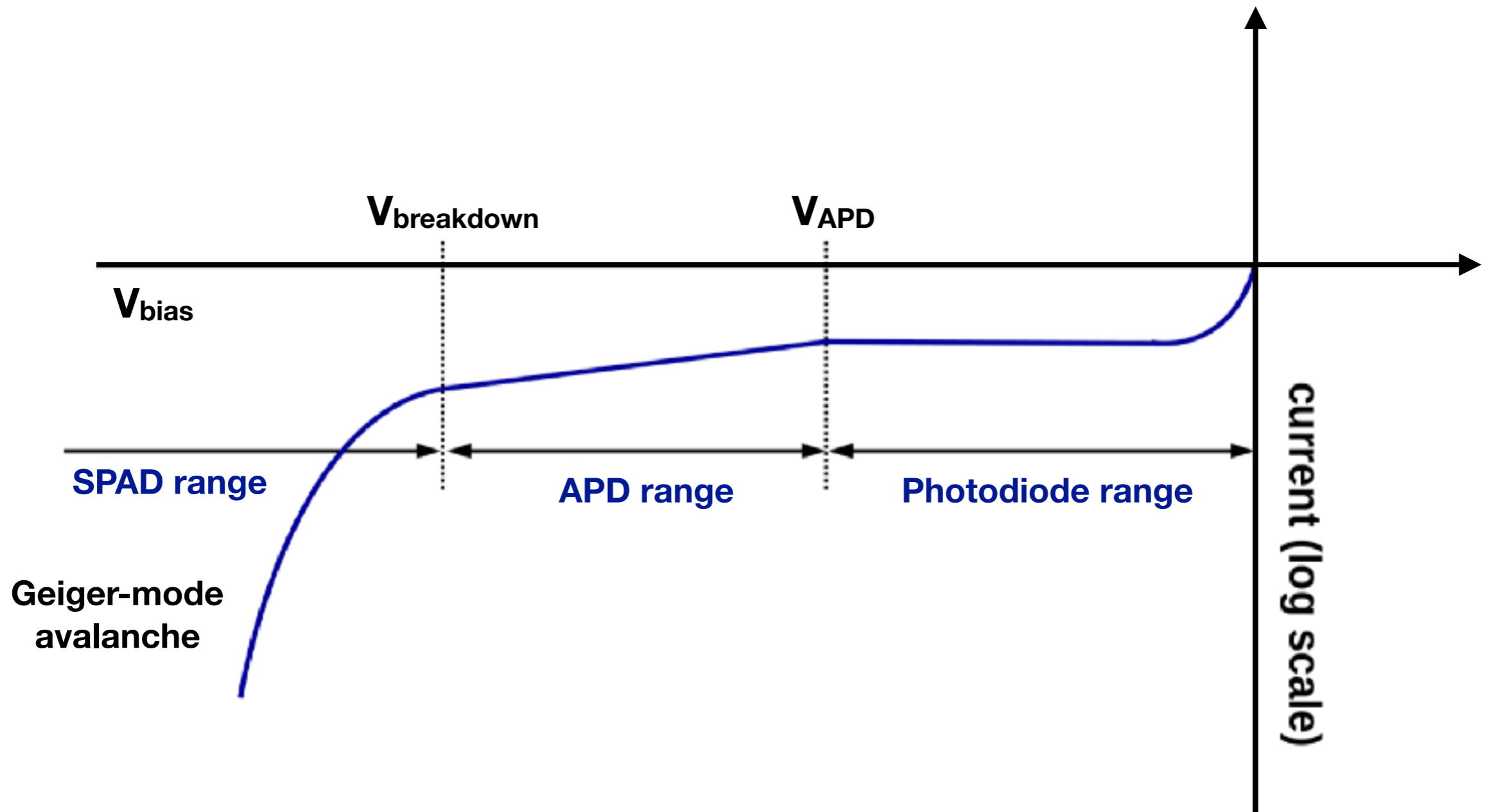
È un regime **non proporzionale** e servono resistenze esterne per smorzare la valanga



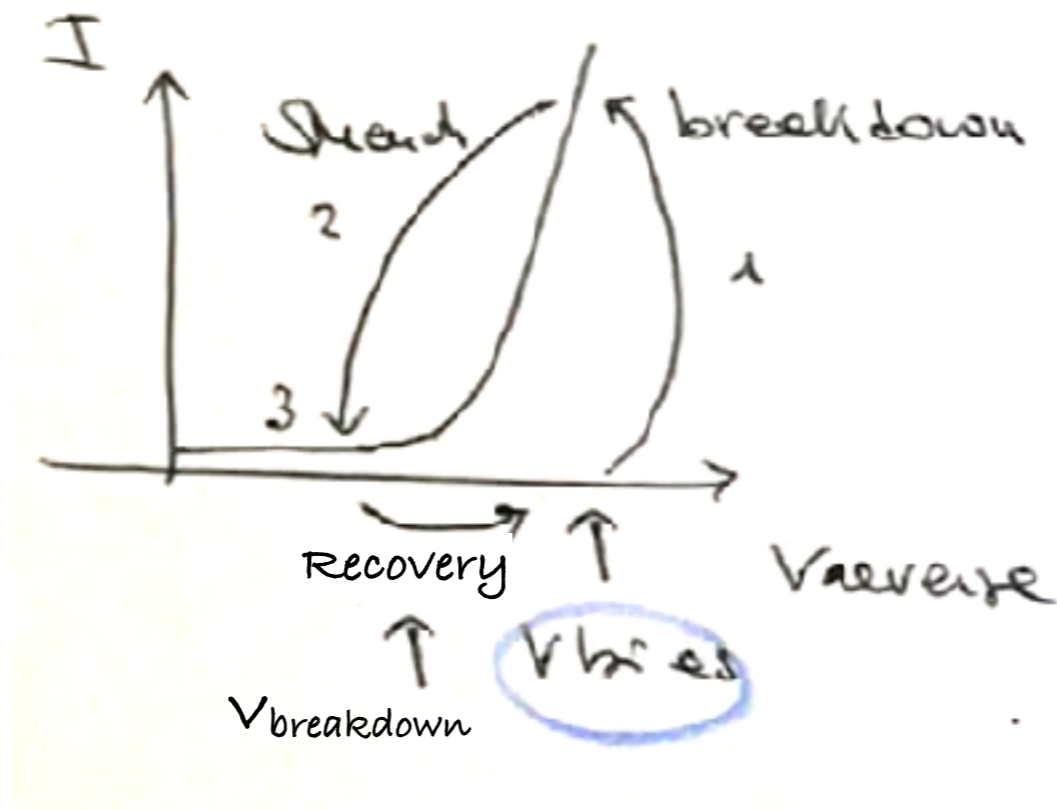
Single Photon Avalanche Diodes (SPAD)

Riesce a rivelare il singolo fotone grazie all'alto guadagno

Da fotodiodo a SPAD (3)



Ciclo di lavoro nello SPAD



0. Polarizzo il SiPM con $V_{bias} > V_{breakdown}$
1. Quando la radiazione incide genera **coppia e-h e parte la scarica Geiger** (breakdown)
2. La caduta di potenziale su R_Q (resistenze di quenching esterne) **smorza la I**
3. Quando $V < V_{breakdown}$ **la cascata si ferma**
4. Entro il tempo $t_{recovery}$ (τ_{rec}) il sistema ritorna a V_{bias}

Da SPAD a SiPM

Il **segnale** è il medesimo indipendentemente dal numero di fotoni incidenti
-> **perdo l'informazione sul numero di fotoni** incidenti e quindi **sull'energia** depositata nello scintillatore. **Soluzione:**

Il SiPM è costituito da un array denso di piccoli SPAD (μ celle): 100-1000 /mm²

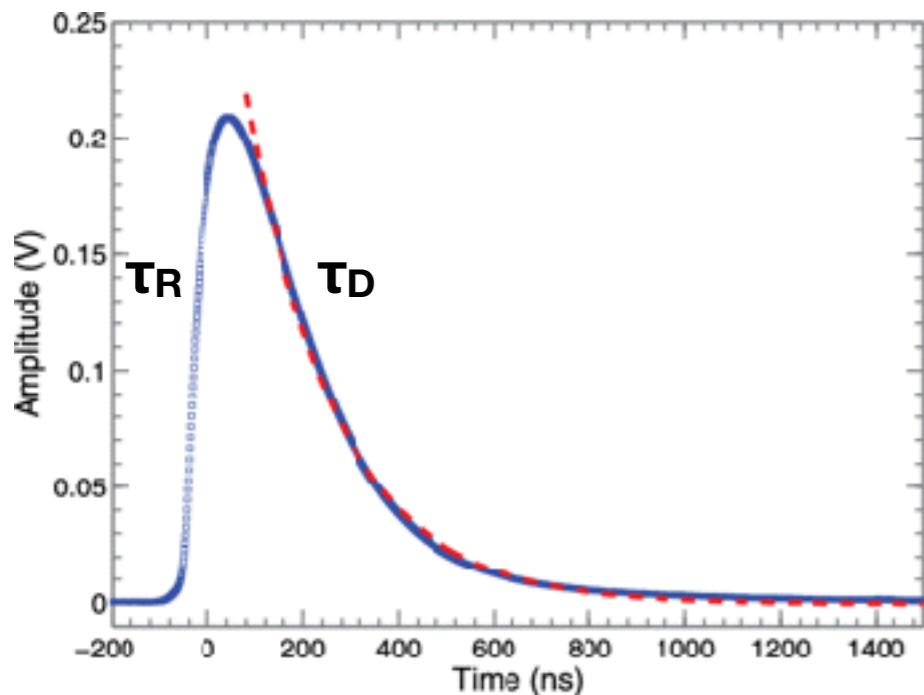
- Si attivano solo le celle su cui un fotone deposita energia
- La probabilità che più fotoni attivino una μ cella è bassa grazie alle piccole dimensioni (μ m)
- Ogni cella ha cascata separata

$$\sum_{i=\mu\text{celle}} I_i = N_{\text{celle}} I_{\text{cella}}$$

- $N_{\mu\text{celle}} \approx N_\gamma$
- È **segnale** quasi-analogico di output, che mantiene l'informazione sull'ampiezza del flusso di fotoni N_γ

Accoppiando SiPM a scintillatore: ho informazione su N_γ prodotti nello scintillatore al passaggio della particella con $N_\gamma \div E_{\text{particella}}$

Forma dell'impulso



- **Il Rise Time (τ_R):** è dato dal t di formazione della valanga e dal t di transito (che è diverso per segnali che partono da punti diversi dell'area attiva)
- **Il Decay Time (τ_D):** è dato dal tempo di recovery della μ cella

$$\tau_{rec} = C_D \cdot (R_Q + R_S \cdot N)$$

C_D = capacità della μ cella

R_Q = R di quenching della μ cella

R_S = ogni resistenza in serie col sensore

N = numero di μ celle

Durante il τ_{rec} la cella può registrare impulsi ma il guadagno sarà minore (perché $V < V_{bias}$)
 => l'impulso sarà più basso a parità di energia infatti I_{out} , è proporzionale alla Q_{tot} , data da:

$$Q_{tot} = N_{fired} \cdot G \cdot q$$

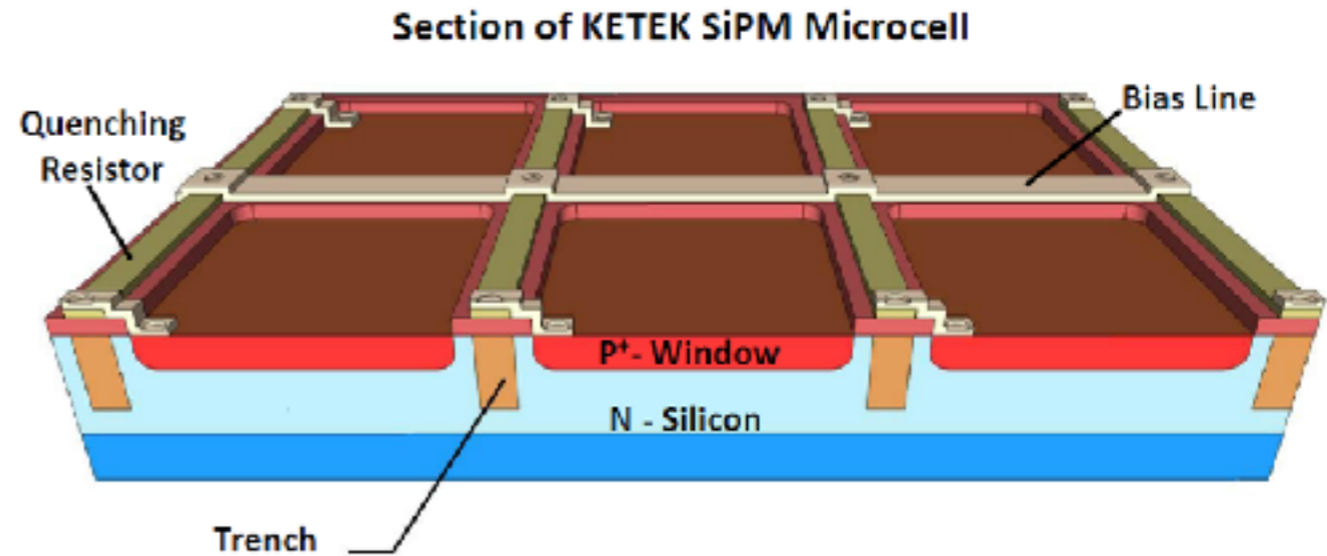
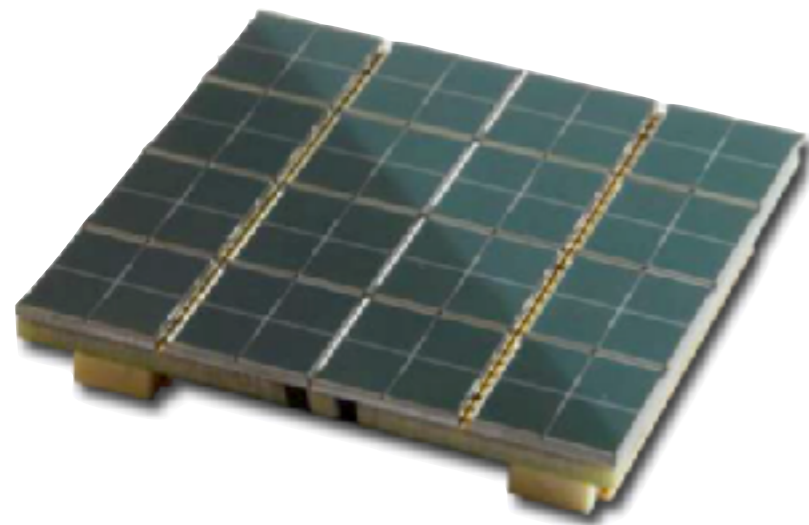
$q = e$

G = guadagno della singola μ cella (fz. di V)

N_{fired} = numero μ celle che danno segnale

Q per ogni μ cella

Fill factor



Attorno ad ogni μ cella c'è dello **spazio morto** (separazione tra le celle, R_Q , lettura segnale, polarizzazione...), che è circa il medesimo per ogni μ cella.

fill-factor \equiv % della superficie del SiPM che è sensibile alla luce

=> **Compromesso**: maggiore dimensione cella dà:

- 😊 alti F, PDE e Gain
- 😞 alti C_D , τ_{rec} e minor range dinamico

Parametri per valutare le prestazioni di un SiPM

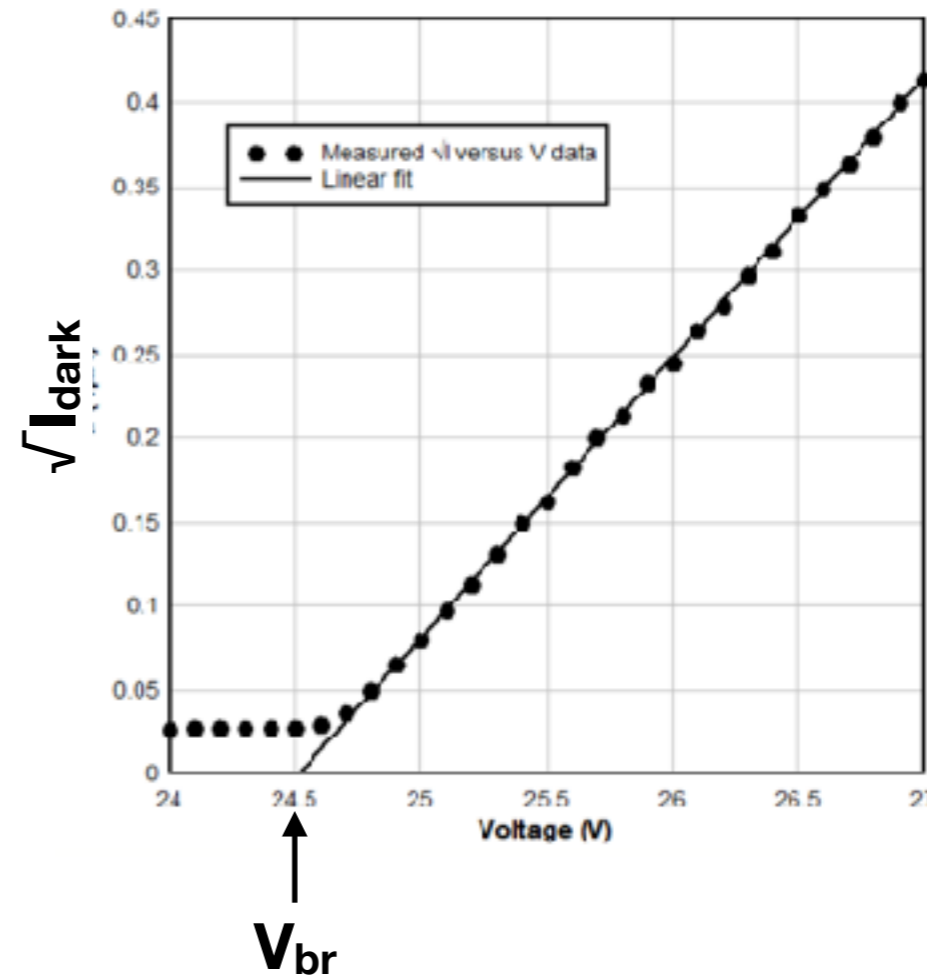
I parametri principali per caratterizzare un SiPM sono:

- $V_{\text{breakdown}}$ e OverVoltage
- Guadagno
- Photon Detection Efficiency
- Dark count rate
- Cross talk ottico
- After pulsing
- Dipendenza dalla temperatura

$V_{\text{breakdown}}$ e OverVoltage

$V_{\text{breakdown}}$ è la V_{bias} a cui \underline{E} nella regione di svuotamento causa una scarica Geiger

Per misurarlo: I_{dark} al variare di V_{bias}



V_{bias} ottimale: ~10-25% maggiore di V_{BR}

*Specifica
solitamente data
dal produttore*

$$V_{\text{bias}} = V_{\text{br}} + \Delta V \rightarrow \text{overvoltage}$$

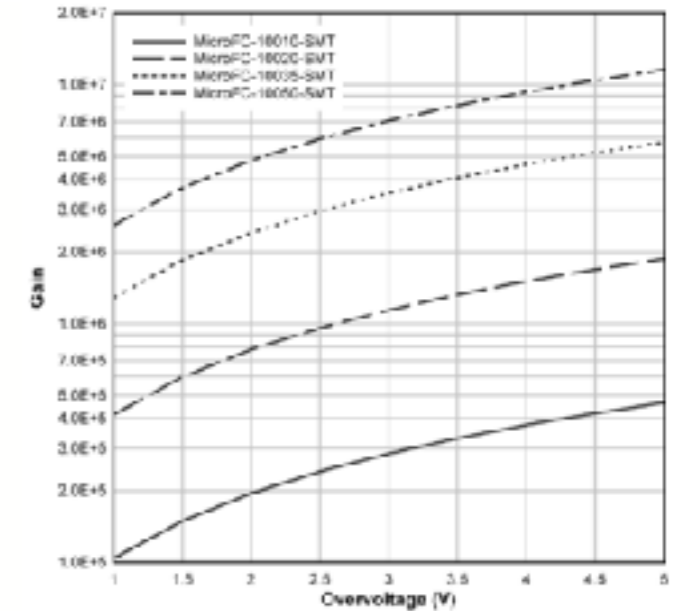
GUADAGNO

Il guadagno è la quantità di carica creata per ogni fotone rivelato

Guadagno per la singola cella:

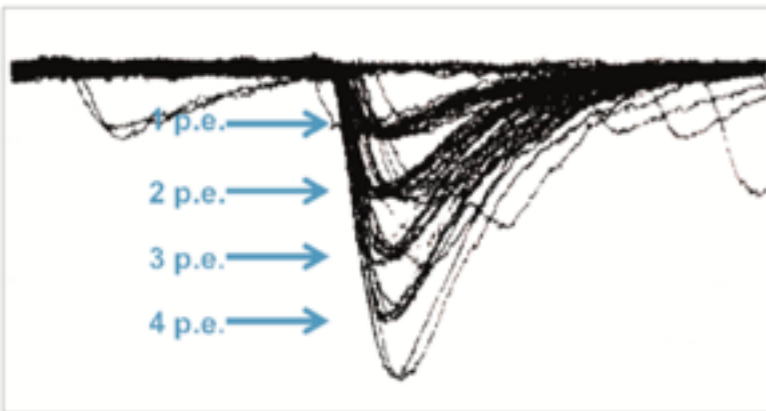
C = capacità cella

$$G = \frac{C \cdot \Delta V}{e} Q_{\mu\text{cella}}$$



Dipende da ΔV e dalle dimensioni della cella

Per misurarlo:
se arrivano più fotoni si illuminano più celle

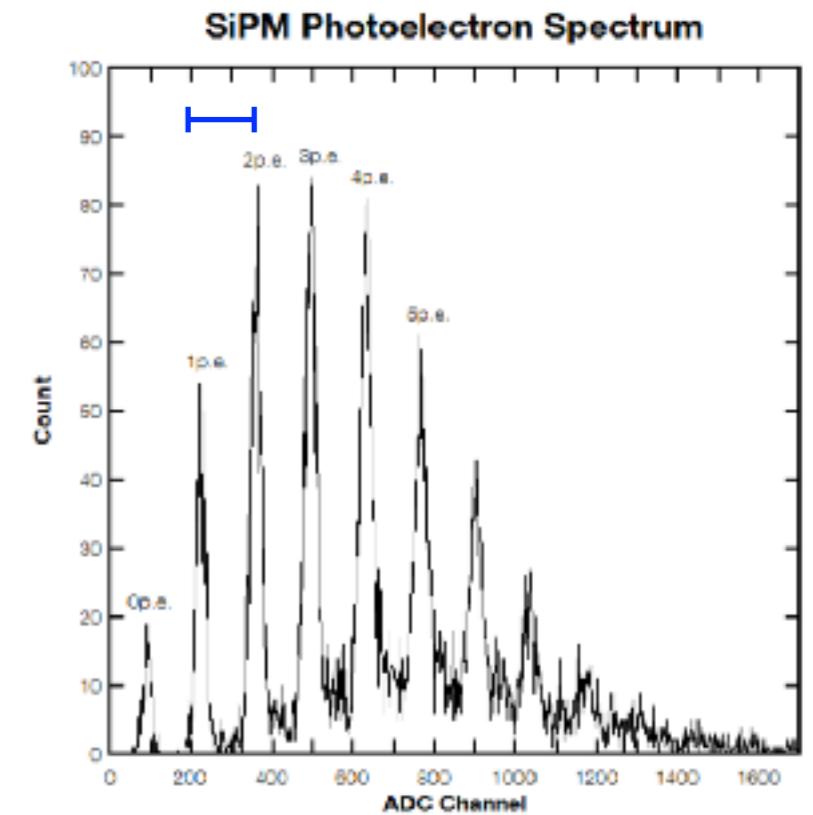


Dalla distanza dei picchi nello spettro ottenuto dal segnale integrato su tutte le celle
=> $Q_{\mu\text{cella}}$ (in ADCchannels)

$$G = \frac{\Delta_{ADC\text{channels}} (in Q)^*}{e}$$

$$(*) \text{ ADCfactor} = \frac{ADC_{channels}}{\text{Coulomb}} \cdot \frac{V_{cc}}{R_w} \cdot \frac{1}{2^{NS}} \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{G_{PSU}}$$

$V_{cc} = 2V$, Digital dynamic range
 $R_w = 500 \text{ M}\Omega$ (over input impedance)
 $NS = 12$ bit digital resolution
 $\Delta t = 4 \text{ ns}$, Digital sampling period
 $G_{PSU} = 20$ for 25C, 20 for 100C, PSU gain



Photon Detection Efficiency

È la probabilità che un fotone incida su una cella e generi una valanga (e quindi un segnale)

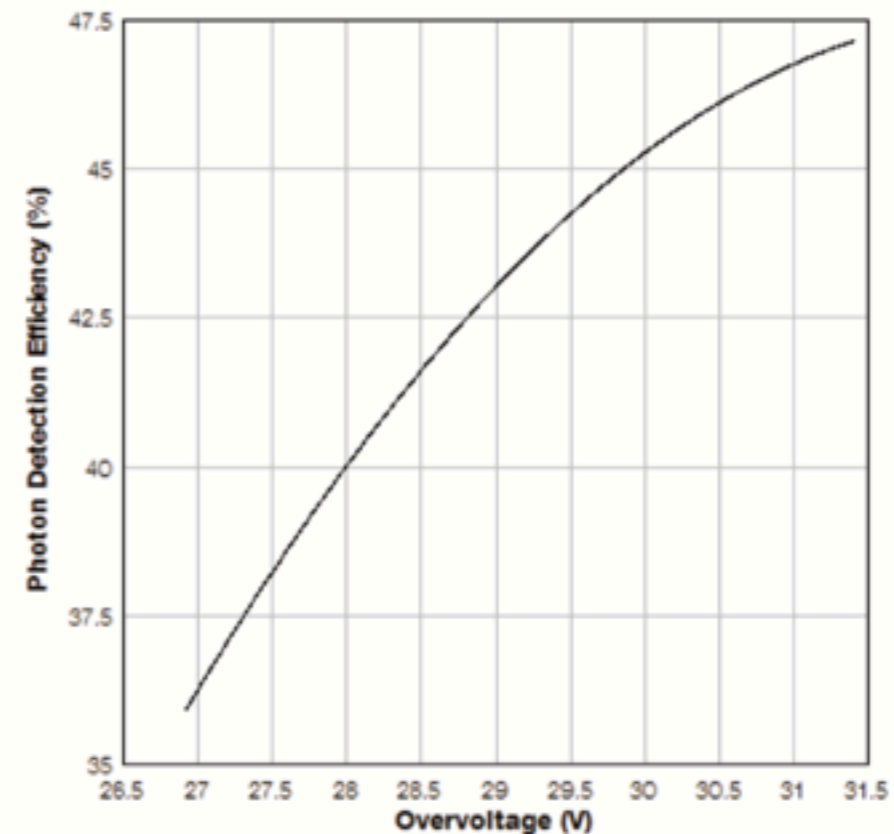
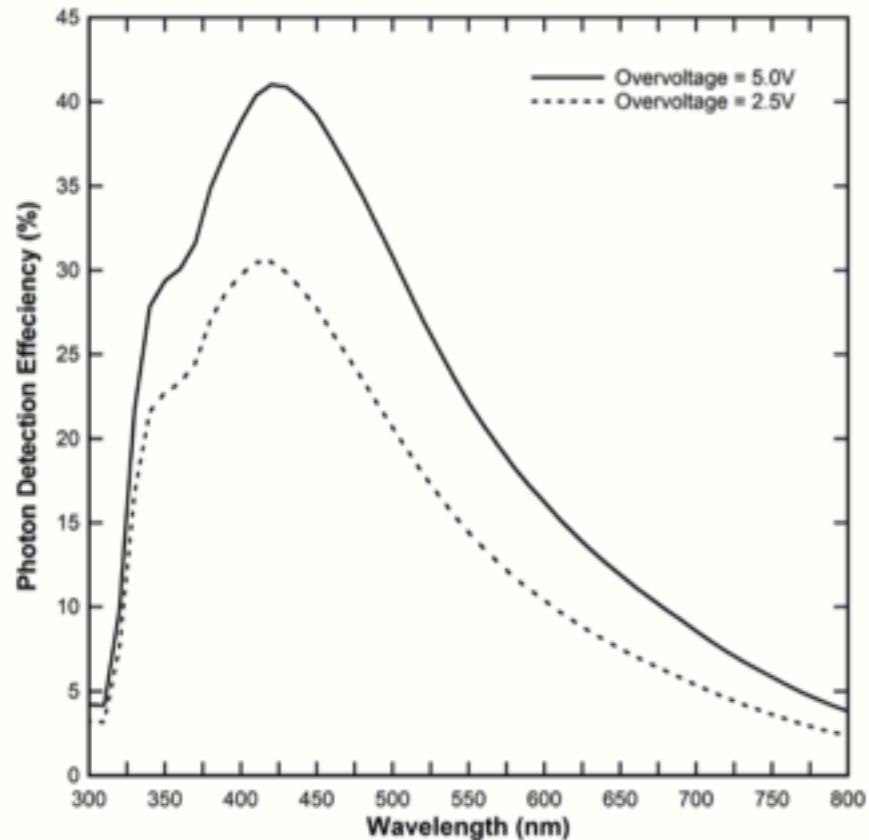
$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \xi(V) \cdot F$$

η = Efficienza Quantica del Si (fotone \rightarrow p_e)

ξ = probabilità di inizio valanga ($p_e \rightarrow$ valanga)

F = Fill Factor

Dipende dalla λ incidente e dal V_{bias}



Dark Count Rate

Rate di eventi registrati in assenza di sorgente luminosa

- Maggiore sorgente di **rumore**
- Dovuta principalmente a elettroni generati termicamente nel volume attivo
- Cresce con V_{bias} , T , area μcella

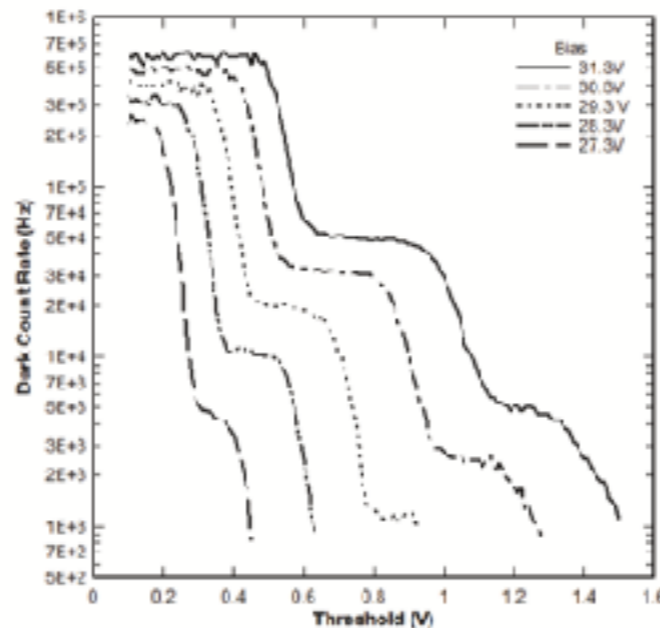
Sono **impulsi ~ di singolo fotone** (poco probabile che avvengano in contemporanea in più celle)

=> **se** in contemporanea **arriva un impulso** luminoso questo noise contribuirà all'impulso finale provocando una **distorsione dell'ampiezza**

Per misurarlo:

metto soglia a 1/2 fotone
e misuro il rate sopra essa

Staircase plot

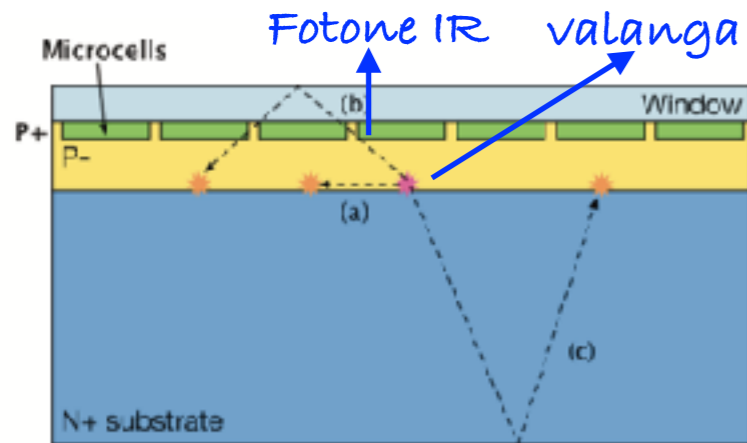


Per ridurlo:

soglia sopra il livello del
singolo fotone (ok per misure
non di singolo fotone)

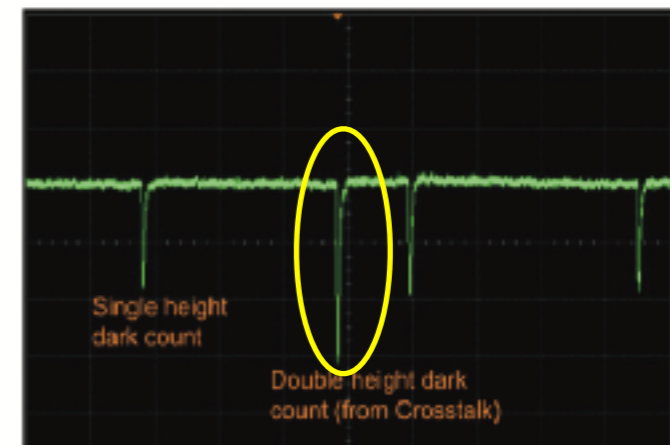
Crosstalk ottico

Probabilità che la valanga in un μ cella causi una valanga in un'altra μ cella



- Sorgente addizionale di **rumore**
- Gli e- accelerati durante una valanga possono produrre fotoni secondari (IR), propagando nel Si, possono colpire altre celle iniziandovi un'altra valanga
- Cresce con ΔV , F

Il CT avviene simultaneamente al segnale originario, e quindi **segnali di singolo fotone vengono rivelati come segnali di più fotoni** (a seconda di quante celle vengono affette dal CT)



Per misurarlo:
dallo staircase plot

$$\frac{DC_{rate} | 2 \text{ fotoni}}{DC_{rate} | 1 \text{ fotone}}$$

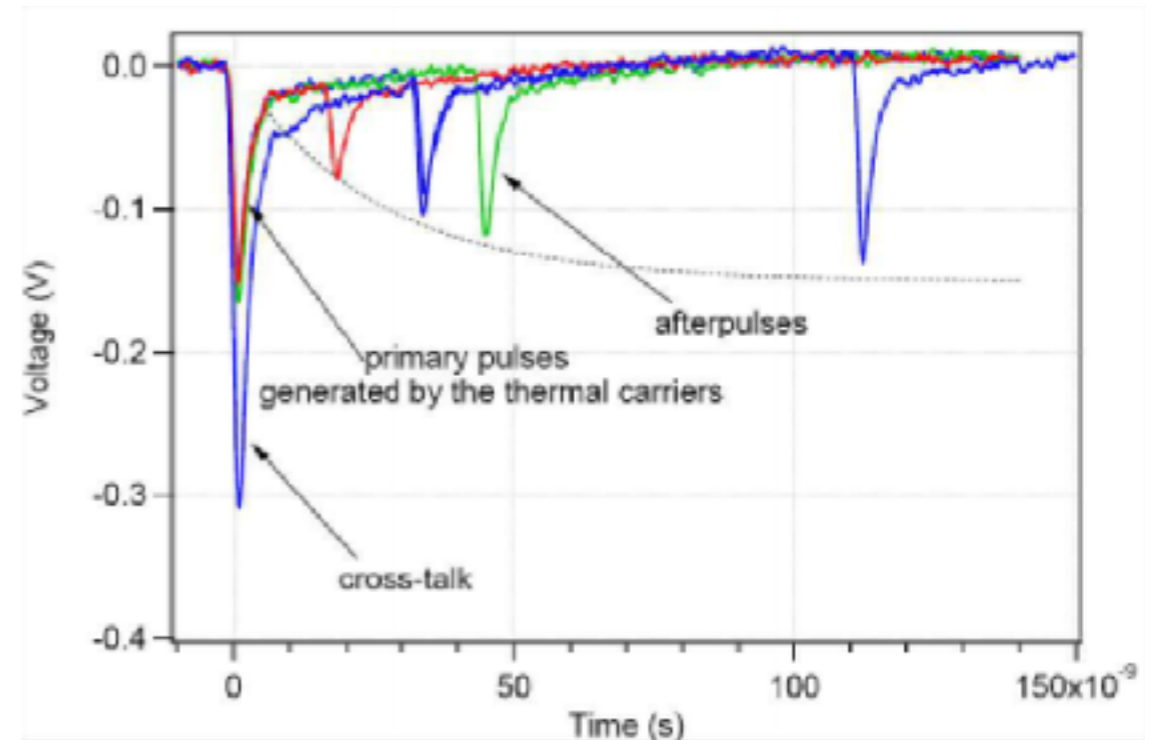
Per ridurlo:

compromesso tra PDE (migliora con ΔV)
e CT (peggiora con ΔV)

Afterpulsing

Impulso dovuto a valanga secondaria nella stessa cella causata da e^- intrappolato che si libera dopo Δt (fino a ns)

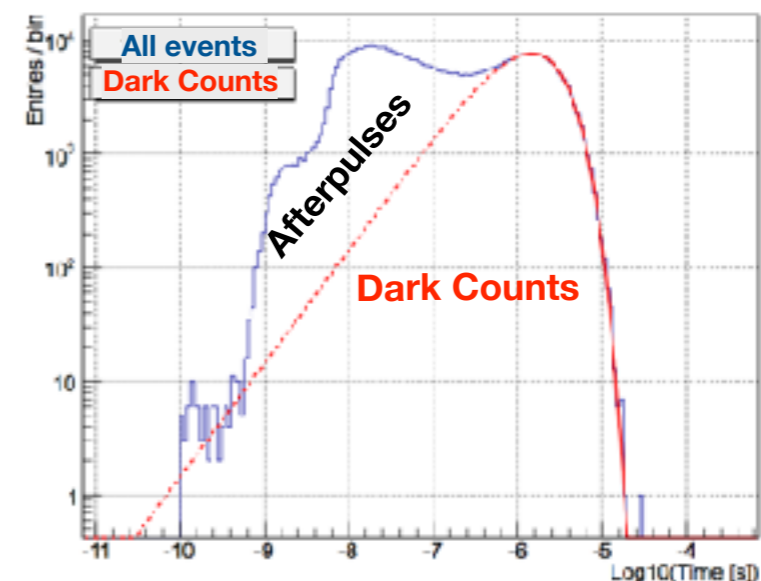
- Afterpulses che avvengono entro un $\Delta t < t_{\text{recovery}}$ **hanno poco impatto** perchè l'ampiezza è piccola
- Afterpulses che avvengono con un $\Delta t > t_{\text{recovery}}$ **hanno impatto alto se il rate della misura è alto**
- La probabilità di afterpulsing **cresce con ΔV** (per la maggior probabilità di inizio valanga)



Per misurare la probabilità di AP:

misuro la distribuzione statistica di eventi consecutivi di dark count con soglia a 0.5 dell'ampiezza di singolo fotone:

$$\text{Area}_{\text{Afterpulses}} / \text{Area}_{\text{Totale}}$$



Range dinamico e linearità

Ampiezza massima misurabile dal SiPM, oltre la quale l'output non è più affidabile

- Flussi di fotoni incidenti troppo alti possono **saturare** il SiPM (tutte le celle accese)
- La **linearità** tra I_{out} e la potenza incidente si ha **fino a ~70%** del range dinamico
- Il RD dipende da $N_{\mu\text{celle}}$, ΔV , λ

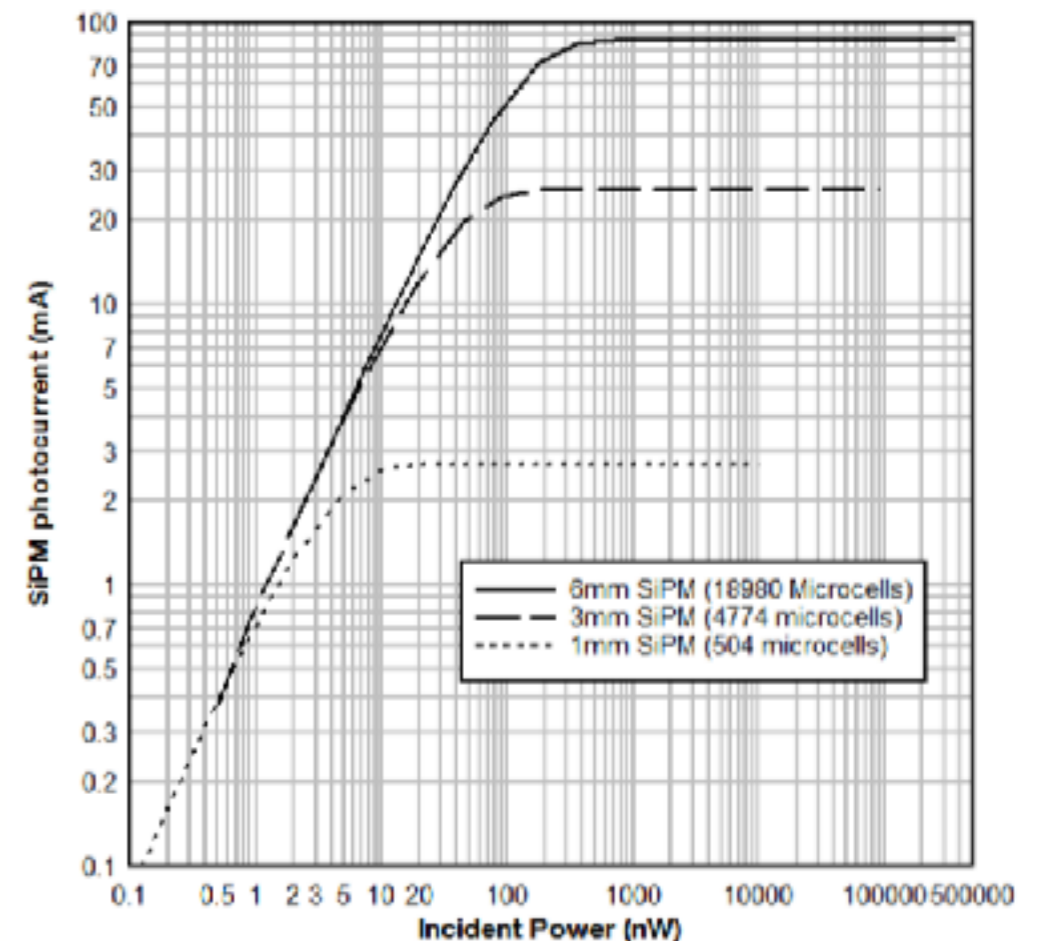
Numero μcelle accese ($\div I_{out}$)

$$N_{fired}(N_{celle}, V, \lambda) = N_{celle} \left(1 - \exp\left(-\frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{fot}}{N_{celle}}\right) \right)$$

Per potenze basse: $N_{fired} = PDE \times N_{fot}$

Per potenze alte: $N_{fired} = N_{celle}$

Linear Range due to Number of Microcells



Dipendenza dalla temperatura

Variazioni di temperatura inducono variazioni nel V_{br} e nel DC rate

- V_{br} cambia **linearmente** con T (piccolo effetto: $\sim 20 \text{ mV}/^\circ\text{C}$)
 - Se piccoli ΔT non servono compensazioni
 - Se grandi ΔT va implementata una stabilizzazione del V_{bias} o della T
- Il **DC rate aumenta con T** (e viceversa: per $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ il DC rate diminuisce del 50%)

