

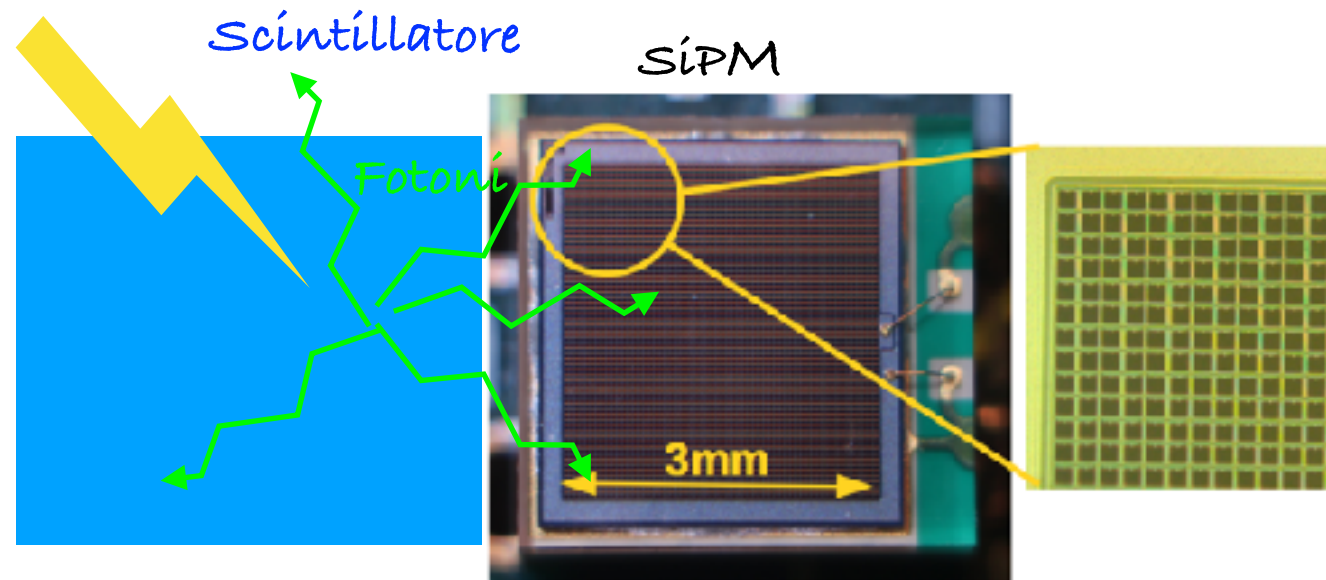
Rivelatori di luce

SiPM

Parte 1

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**

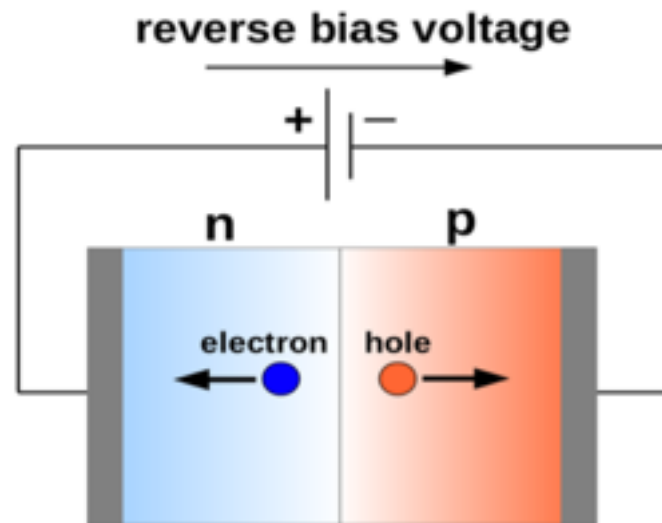


VANTAGGI:

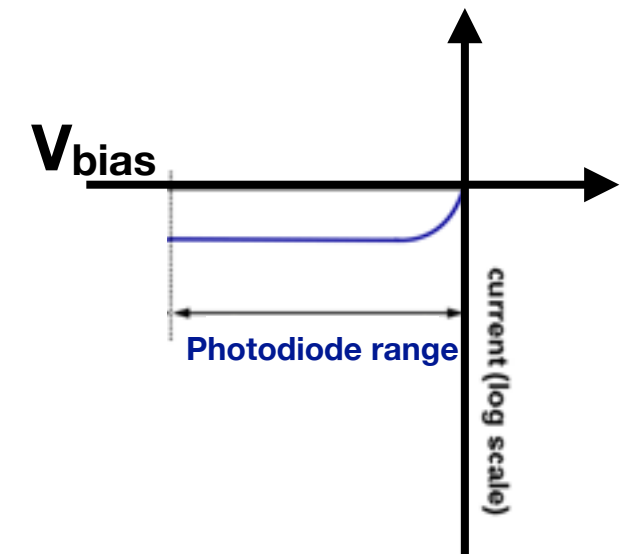
- più **compatti** (qch. mm² vs. tubo a vuoto ~10 cm)
- più robusti
- **insensibili ai campi magnetici**
- operano a **basse tensioni di lavoro** (30 V vs. 1-2 kV) pur avendo **guadagni ~10⁶**
- maggiore **efficienza quantica** (50% vs. 25%)
- rivelare bassi segnali di luce (arrivano fino al **singolo 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 fotodiode a SPAD (1)

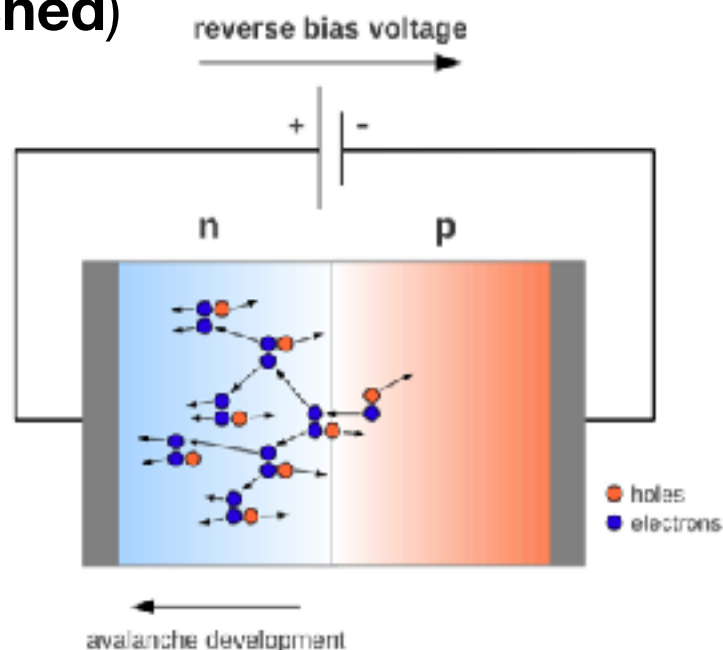
- **Giunzione PN in Si polarizzata inversamente** -> quando fotone ottico incide nella regione di svuotamento crea coppia e^-h^+ che sotto l'azione di \underline{E} crea corrente I



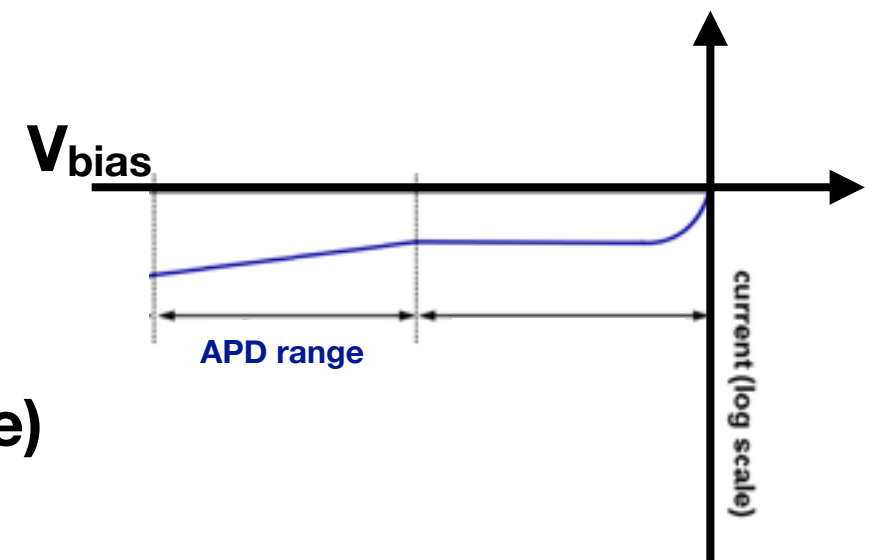
≡ **Fotodiode**



- **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**)



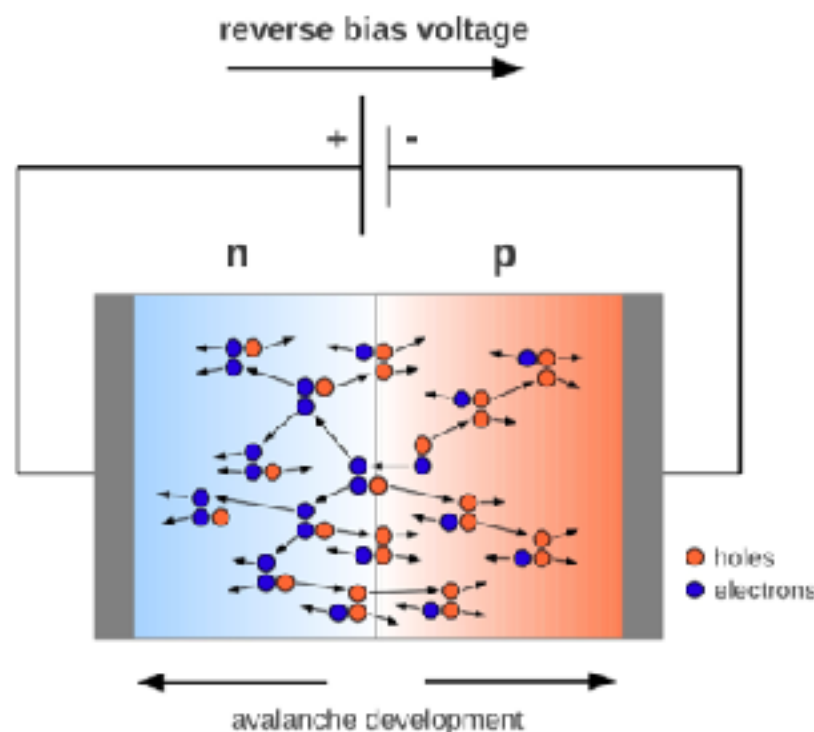
≡ **APD**
(Avalanche Photo Diode)



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 ($\sim 10^6$)

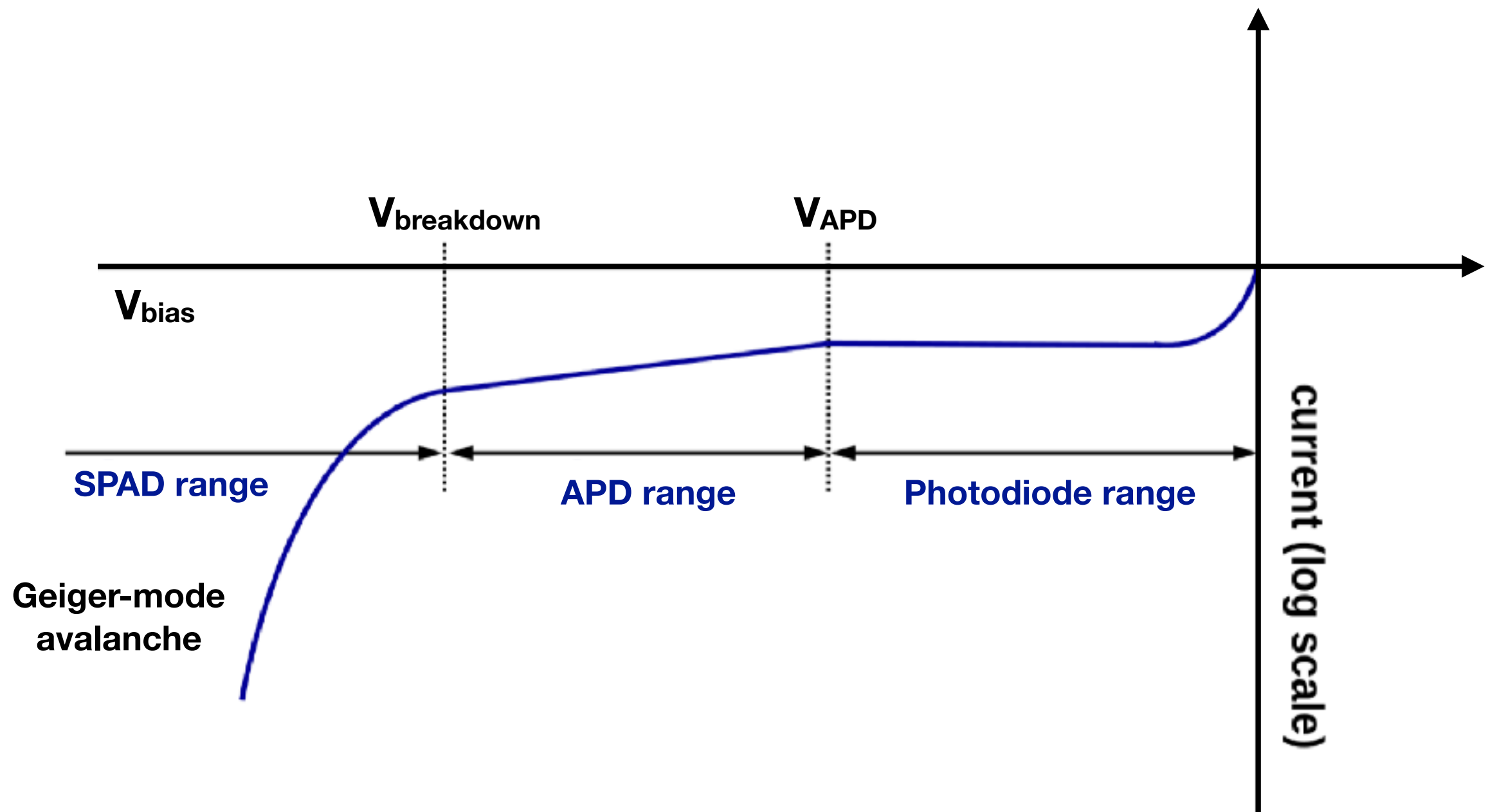
È un regime **non proporzionale** e servono resistenze esterne per smorzare la valanga



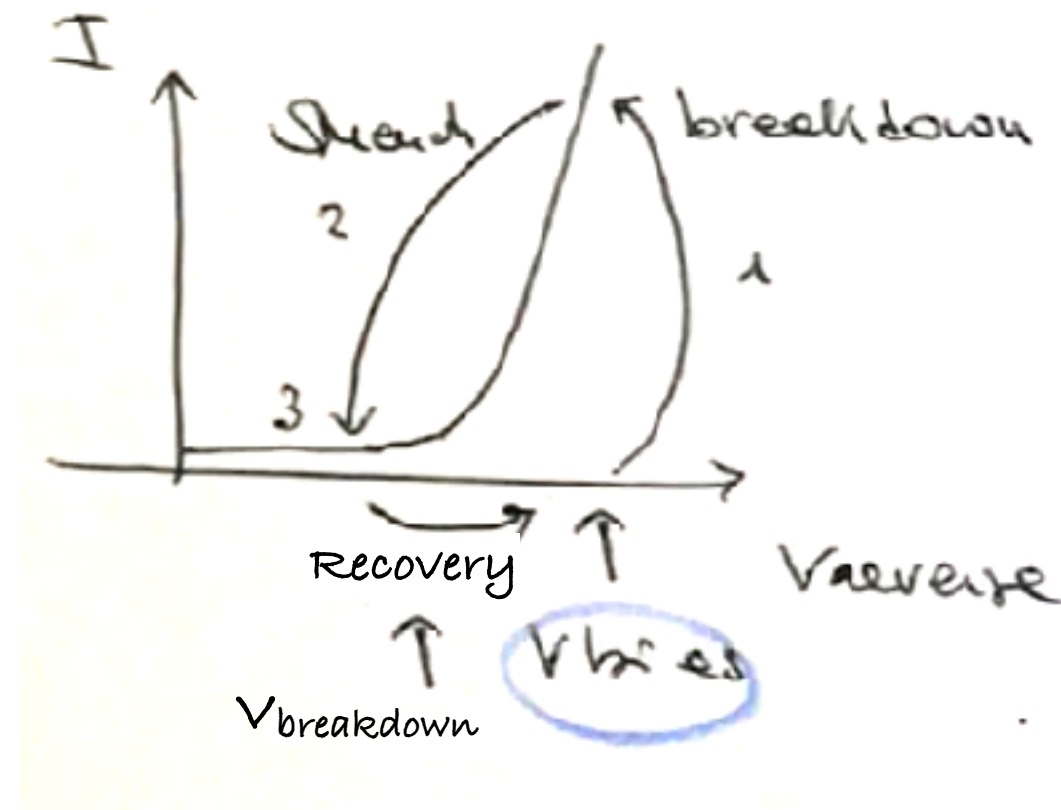
Single Photon Avalanche Diodes (SPAD)

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

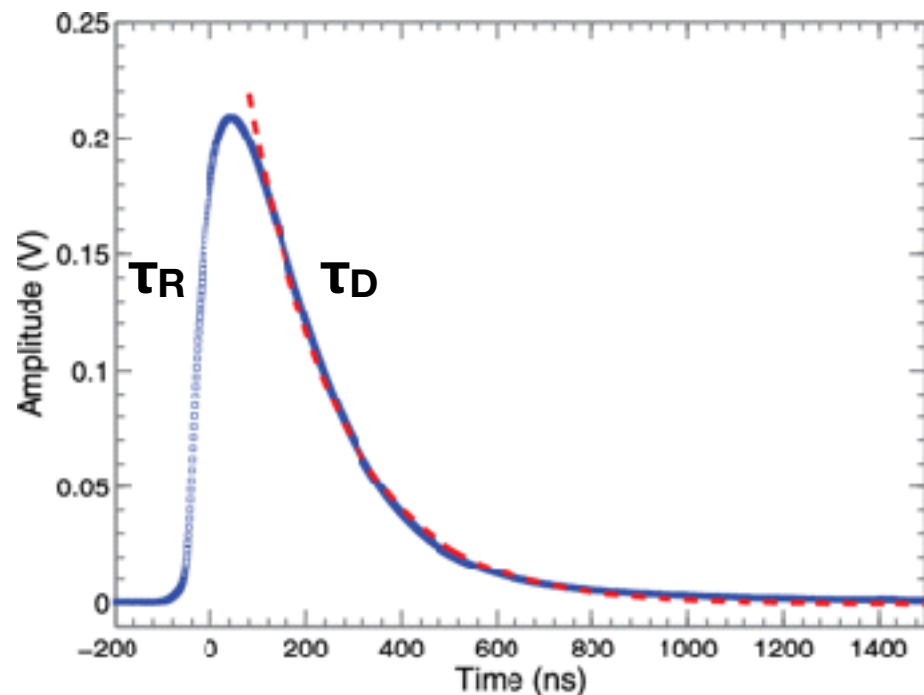
- Si attivano solo le celle su cui un fotone deposita energia
- La probabilità che più fotoni attivino una μ cella è bassa grazie alle piccole dimensioni (μ m)
- Ogni cella ha cascata separata

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

- $N_{\mu\text{celle}} \approx N_\gamma$
- 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 (perchè $V < V_{bias}$)
 => l'impulso sarà più basso a parità di energia infatti I_{out} , è proporzionale alla Q_{tot} , data da:

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

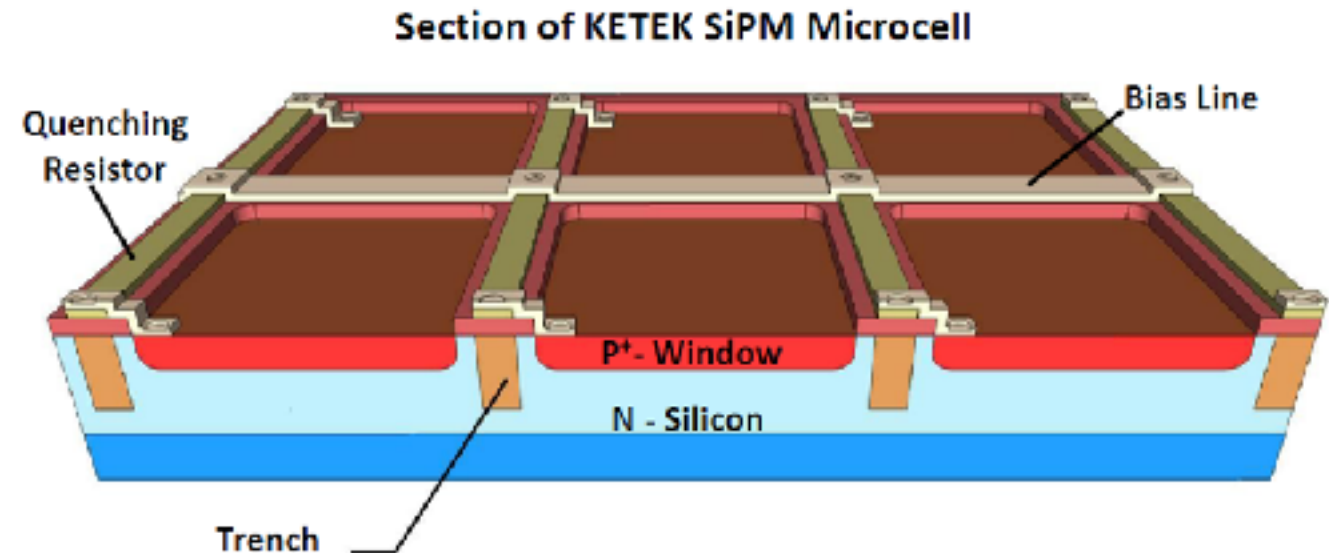
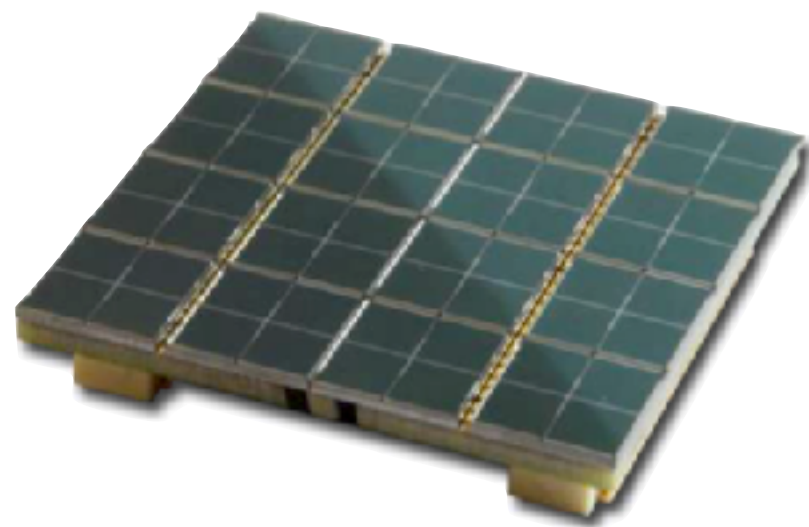
Q per ogni μ cella

$q = e$

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

N_{fired} = numero μ celle che danno segnale

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