

SiPM

Il SiPM è un fotomoltiplicatore al silicio basato su una giunzione P-N e costituito da un array di microcelle SPAD che operano in modalità Geiger.

Abbiamo già discusso i fotomoltiplicatori quindi ci interessiamo solo alle caratteristiche di questa tipologia. Questi apparecchi risultano avere diversi vantaggi: sono più compatti ($\Delta \sim \mu\text{m}^2$), più robusti, inoltre risultano insensibili ai campi magnetici, operano a basse tensioni ($V \sim 30\text{V}$), hanno un guadagno di 10^6 e hanno un'ottima $\epsilon_q \sim 50\%$.

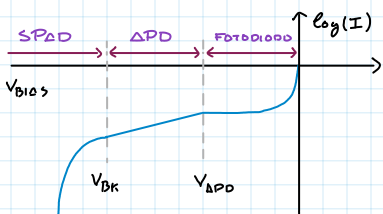
Inoltre riesce a rivelare il singolo fotone (opera anche a basse luminosità), riesce a contare il numero di fotoni prodotti, il livello di rumore è basso e infine il SiPM è ottimo per le misure di tempo.

SPAD (Single Photon Avalanche Diode)

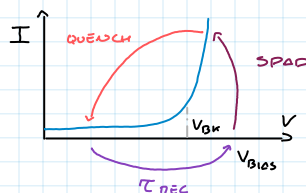
Capiamo ora come funziona il SiPM, la prima parte coincide con il fotodiodo: la giunzione P-N si polarizza creando una coppia e^- , h^+ nella regione di svuotamento \Rightarrow si crea corrente.

Aumentando la V tale da accelerare gli e^- e h^+ per formare altre coppie, in questo regime $I \propto V$ con un guadagno unitario (~ 100) \Rightarrow in questo regime la valanga si autosmorza (regime di APD).

Se aumento ancora V fino oltre a V_{Br} (tensione massima, dopo di là avviene una scarica) si ha creazione di coppie e^- - h^+ molto accelerate che danno vita ad una corrente macroscopica tale che il Si diventa conduttivo, da qui si verifica una **Scarica Geiger**, con un guadagno alto ($\sim 10^6$). In questo caso I non dipende da $V \Rightarrow$ regime di SPAD (basta un solo ξ a far partire la valanga) \Rightarrow non si verifica autosmorzamento.



Tuttavia non si può lasciare che il diodo sia in continuo in regime di SPAD. Entrando in gioco le resistenze di quenching che smorzano I e dopo un tempo detto di **recovery** $\Rightarrow V \Rightarrow V_{Bias}$



Tuttavia essendo necessario Δy per attivare il regime di SPAD ho una perdita di informazione rispetto al N_y incidenti, per ovviare si è resa la dimensione delle microcelle, fotodiodi, di circa μm^2 da far in modo da rivelare un solo ξ a cella. Il nostro SiPM ha circa $(100-1000)(\mu\text{m})^2$ microcelle.

Quindi a seconda di quante celle vengono attivate anche un segnale di corrente più o meno intenso: $I = \sum_i I_i$

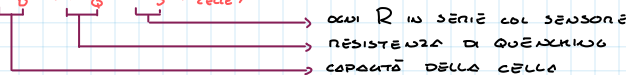
$N_{\text{celle}} I_{\text{cella}} \Rightarrow$ in questo modo ho un segnale che mantiene l'informazione sul N_y

Quello che ci si chiede ora è come può essere fatto l'impulso, cosa vediamo:



In questo caso è possibile dividerlo in 2: la prima parte corrisponde alla formazione della valanga e del transito \Rightarrow entrambi i tempi sono compresi in **rise time** (τ_r) la seconda parte è composta dal **delay time** (τ_d) che consiste al tempo di recovery

che si può caratterizzare come $\tau_{rec} = C_0 \cdot (R_q + R_j \cdot N_{\text{celle}})$

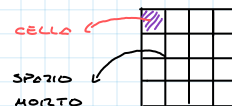


Piccola nota, durante il τ_{rec} può essere che la cella registri impulsi, ma il guadagno sarà minore in quanto $V < V_{Bias}$ dunque l'impulso sarà più basso a parità di E . Si ha infatti che $I_{out} \propto Q_{out}$:

$$Q_{\text{tot}} = N_{\text{fired}} G q \Rightarrow N_{\text{fired}} = \text{celle attive}$$

$$G = \text{guadagno di singola cella } (G = G(V))$$

$$q = e$$



FILL FACTOR = spazio del SiPM sensibile alla luce \Rightarrow non tutto il SiPM ha spazio utile alla rivelazione

PER AUMENTARLO SI AUMENTA LA DENSITÀ DI CELLE:

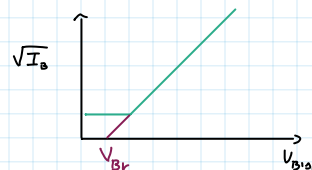
PRO: - alti F, PDE, Guadagno **CONS:** - alti C_D e τ_{rec} e basso range dinamico.

Caratterizzazione del SiPM

Per l'ottimo risultato dello strumento è necessario caratterizzare vari parametri del SiPM che sono:

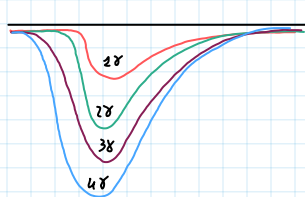
1) **V_{Br} è Overvoltage:** per calcolare il V_{Br} si fa variare la V_{Bias} e si studia l'andamento di I_{out} . L'overvoltage invece è dato dal costruttore, $\Delta V \approx (10\% - 25\%) V_{Br}$

per la V_{Bias} ottimale $\Rightarrow V_{Bias} = V_{Br} + \Delta V$

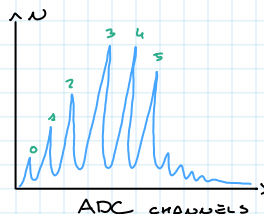


2) **GUADAGNO:** per trovare la carica emessa per fotone da una singola cella utilizziamo la seguente relazione: $G = \frac{C \cdot \Delta V}{e}$ con C = capacità della singola cella \Rightarrow dipende da ΔV (dimensioni cella)

RICORDIAMO CHE $Q_{cella} = C \Delta V$. QUELLO CHE NOI OSSERVIAMO SONO LE SEGUENTI COSE:



È IN PARTICOLARE NOI MISURIAMO IL ΔADC_{ch}



NON MISURANDO QUINDI IN C ABBIAMO BISOGNO DI UN FATTORE DI CONVERSIONE:

$$L' \Delta DC \text{ FACTOR} = \frac{ADC_{ch}}{Coulombs} = \frac{V_{pp}}{R_{in}} \frac{1}{2^{N_{bit}}} \Delta t \cdot \frac{1}{C_{psdu}}$$

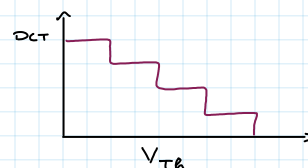
CON V_{pp} = RANGE DINAMICO DIGITALIZZATORE, R_{in} = IMPEDENZA DI INPUT DEL DIGITALIZZATORE, N_{bit} = RISOLUZIONE DEL DIGITALIZZATORE, Δt = PERIODO DI RACCOLTA E C_{psdu} = CAPACITÀ DEL PSDU.

3) PHOTON DETECTION EFFICIENCY: LA PDE È LA PROBABILITÀ CHE UN FOTONE INCIDENTE SUL SiPM FACCI INFIAMMARE

$$LA \text{ VARIANTE: } PDE(\lambda, V) = \underbrace{f(\lambda)}_{\text{FILL FACTOR}} \underbrace{E_R(V)}_{\text{EFFICIENZA QUANTILA}} \underbrace{F}_{\text{PROBABILITÀ DI INIZIO VARIANTE}}$$

QUELLO CHE ORA SI VUOL FARE È CARATTERIZZARE IL NUMERO CHE SI HA:

2) DARK COUNT RATE: È LA MISURA DI EVENTI IN ASSENZA $\gamma \Rightarrow$ SUCCEDERE A CAUSA DELLE AGITAZIONI TERMICHE CHE PRODUCONO UNA COPPIA e^- , h^+ . DI NORMA LO SI HA PER UNA SOLA CELLA UNA VOLTA E PER MISURARLO SI SETTA LA SCELTA TRA 1 E 2 FOTONI E MISURO IL RATE SOPRA DI ESSO. (STAIRCASE PLOT) \Rightarrow DIPENDE DA V_{Bias} , T , A_{cella} . PER RIDURLO AL MINIMO IMPOSTO LA SCELTA SOPRA IL 18, CHE VA BENE SE NON DEVO FARE MISURE DI SINGOLO FOTONE.



2) CROSSTALK OTTICO: PROBABILITÀ CHE LA VARIANTE IN UNA CELLA NE CAUSI UNA IN UN'ALTRA. QUESTO AVVIENE PERCHÉ e^- - h^+ ACCELERATI PRODUCONO UN γ (IR SECONDARIO) CHE PRODUCONO UN'ALTRA COPPIA e^- - h^+ IN UN'ALTRA CELLA, DIPENDE DA ΔV E F . SI HA CHE UN SEGNALE DI SINGOLO γ VIENE LETTO COME DOPIPIO γ .

$$PER \text{ MISURARLO: } CTO = \frac{DCT|_{2\gamma}}{DCT|_{1\gamma}} \Rightarrow \text{ADGIUSTANDO PDE E CT LO SI PUÒ RIDURRE.}$$

3) AFTERPULSING: VARIANTE SECONDARIA DOVUTA ALLA LIBERAZIONE DI UN e^- INTRAPPOLATO DOPO UN Δt FINO A 1 ns. SE $\Delta t < t_{rec}$ HANNO POCO IMPATTO, EMPIRICA PIÙ ACCOLA. SE $\Delta t > t_{rec}$ HANNO UN BELL'IMPATTO, SOPRATTUTTO SE IL TC È ALTO. SI HA UNA DIPENDENZA DIRETTA CON ΔV . PER MISURARLA RICAVO LA DISTRIBUZIONE DI DCT CONSECUTIVI CON $V_{Tk} \approx 0.5 V_{g\gamma}$.

4) RANGE DINAMICO E LINEARITÀ: ESISTE UN AMPIETÀ MASSIMA MISURABILE DAL SiPM OLTRE AL QUALE L'OUTPUT NON È PIÙ AFFIDABILE $\Rightarrow \gamma$ TOU CHE TUTTE LE CELLE SONO ACCESE, IL SiPM È SATURO. SI PUÒ VERIFICARE CHE LA LINEARITÀ TRA I_{out} E P_{in} CESSA A ~70% DEL RD. ($RD = RD(N_{cel}, \Delta V, \lambda)$). SI PUÒ QUINDI SCRIVERE LA SEGUENTE RELAZIONE PER LE CELLE ACCESE:

$$N_{Fired} = N_{cell} \left(1 - e^{-\frac{PDE \cdot N_{\gamma}}{N_{cell}}} \right) \begin{cases} \text{POT. BASSA} \Rightarrow N_F = PDE \cdot N_{\gamma} \\ \text{POT. ALTE} \Rightarrow N_F = N_{cel} \end{cases}$$

5) TEMPERATURA: LA TEMPERATURA HA UN RUOLO IMPORTANTE NELLE MISURE, INFATTI PER V_{bv} SE SI HANNO DEI ΔT PICCOLI NON SERVONO CORREZIONI, SE ΔT SONO GRANDI ANORA DEVO STABILIZZARE V_{bias} O T (TRA V_{bv} E T È PRESENTE UNA RELAZIONE DI LINEARITÀ). INOLTRE ANCHE IL DCT AUMENTA SE T AUMENTA (O DIMINUISCE SE T DIMINUISCE) E IN PARTICOLARE SI HA UNA RELAZIONE DI TIPO ESPONENZIALE ($DCT \propto e^T$).