

Sensori di temperatura a semiconduttore, integrabili in circuiti

Termoresistenze in silicio: sfruttano la variazione di conducibilità in funzione della temperatura
 $(\sigma = \sigma(T))$

Giunzioni p–n: sfruttano la variazione della tensione di giunzione in funzione della temperatura
 $(V_j = V_j(T))$

Principio di funzionamento dei sensori a giunzione p–n

Equazione di Shockley del diodo:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V_j}{q}} - 1 \right)$$

È valida con tecnologie di fabbricazione “pulite”, cioè con bassa concentrazione di centri di generazione e ricombinazione nella zona svuotata, altrimenti va corretta in:

$$I = I_S \left(e^{\frac{V_j}{m \frac{kT}{q}}} - 1 \right)$$

con il fattore m compreso tra 1 e 2, a seconda della tecnologia usata.

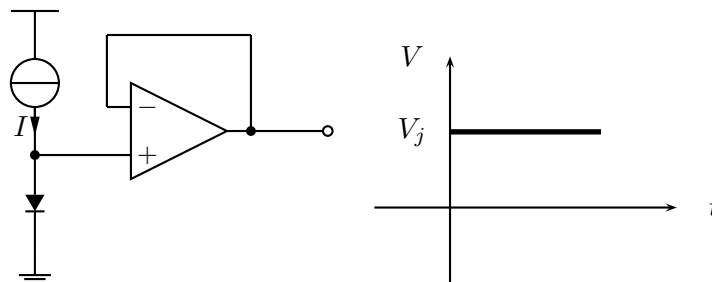
Invertendo si ricava la tensione di giunzione:

$$V_j = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)$$

essendo la corrente I_S molto piccola (pA o inferiore) si ha $\frac{I}{I_S} \gg 1$ anche con piccole correnti I dell'ordine dei μA , e quindi con ottima approssimazione si ottiene:

$$V_j \simeq m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_S} \right)$$

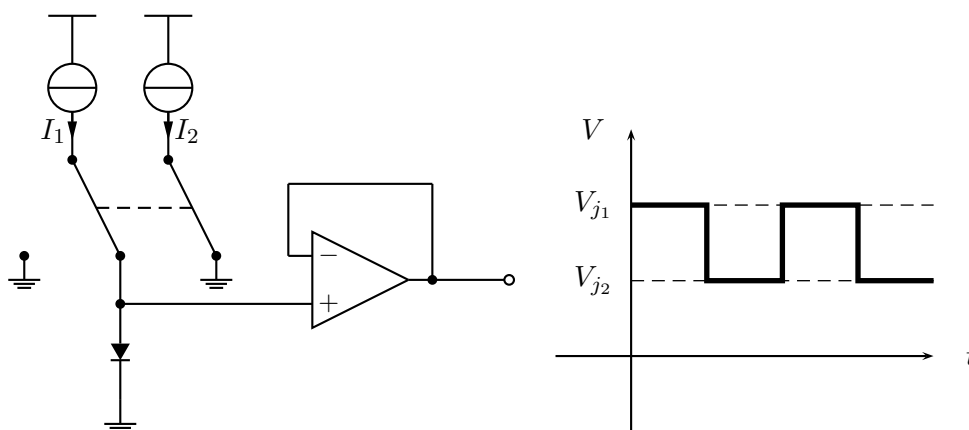
Si potrebbe polarizzare il diodo a corrente costante e misurare la tensione di giunzione:



ma non risulta conveniente perché:

- anche I_S dipende da T in modo fortemente non lineare: $I_S \propto e^{-\frac{E_G}{kT}}$
- I_S non è ben controllata nel processo di fabbricazione
- m dipende da T e non è ben controllato nel processo di fabbricazione, salvo che in tecnologie avanzate che assicurano $m \simeq 1$

Si può invece commutare la corrente I tra due livelli I_1 e I_2 e misurare l'ampiezza della corrispondente oscillazione di tensione a onda quadra (brevetto originale dei Bell Labs):



Si trova quindi

$$V_T = V_{j1} - V_{j2} = m \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{I_1}{I_S} \right) - \ln \left(\frac{I_2}{I_S} \right) \right] = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

Chiamiamo $B = \frac{I_1}{I_2}$. Essendo B un fattore ben controllato, si ottiene V_T proporzionale a T .

Realizzando la giunzione con tecnologia avanzata si può ottenere $m \simeq 1$ e avere un termometro assoluto:

$$V_T = (m \ln B) \frac{kT}{q} \simeq (\ln B) \frac{kT}{q}$$

La sensibilità è elevata:

$$\frac{dV_t}{dT} = (m \ln B) \frac{k}{q}$$

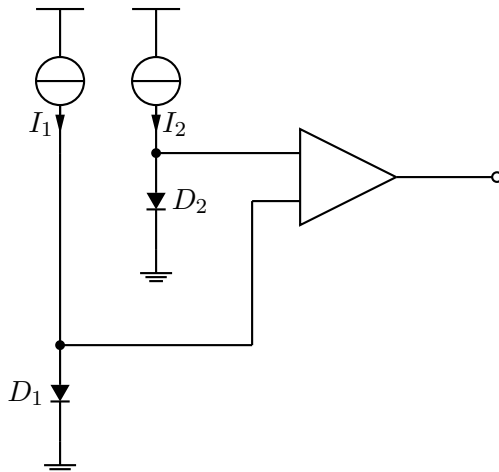
sapendo che per $T = 300$ K si ha $\frac{kT}{q} \simeq 25,85$ mV, si ottiene $\frac{k}{q} \simeq 86,17$ μ V/K. Scegliendo le correnti in modo da avere $B = 10$, e supponendo di avere $m = 1$ si trova

$$\frac{dV_t}{dT} \simeq 198,4 \mu\text{V/K}$$

Per misurare la temperatura occorre quindi misurare l'ampiezza di un'oscillazione; questo risulta meno semplice di una misura in continua, ma vantaggioso per minimizzare l'errore nella misura.

Realizzazione in circuito integrato, con possibilità di misura anche in continua

La tecnologia permette di realizzare nei circuiti integrati giunzioni “gemelle” e vicine, in modo da mantenerle alla stessa temperatura (visto che il silicio è un ottimo conduttore di calore). Lo schema diventa quindi:



dove la tensione di uscita è proporzionale a $V_{j1} - V_{j2}$.

Si impiegano valori I_1 e I_2 piccoli, in modo da minimizzare l'autoriscaldamento dei diodi, che dissipano potenze $P_1 = I_1 V_{j1}$ e $P_2 = I_2 V_{j2}$. Ad esempio, per $I \simeq 10 \mu\text{A}$, essendo $V_j \simeq 600 \text{ mV}$, si ha $P \simeq 6 \mu\text{W}$.

L'integrazione permette di realizzare diodi con giunzioni di uguale struttura verticale a diverse aree A_1 e A_2 . La tensione di giunzione V_j dipende comunque dalla densità di corrente j :

$$j = j_S \left(e^{\frac{V_j}{m \frac{kT}{q}}} - 1 \right)$$

$$V_j = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{j}{j_S} + 1 \right) \simeq m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{j}{j_S} \right)$$

Con due diodi di aree diverse:

$$I_1 = j_1 A_1 \Rightarrow j_1 = \frac{I_1}{A_1}$$

$$I_2 = j_2 A_2 \Rightarrow j_2 = \frac{I_2}{A_2}$$

quindi

$$V_T = V_{j1} - V_{j2} = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{j_1}{j_2} \right) = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_1 A_2}{I_2 A_1} \right) = m \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) + \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right]$$

Il rapporto $\frac{A_2}{A_1}$ è molto ben controllato nella realizzazione integrata, grazie alla litografia.

Il rapporto $\frac{I_1}{I_2}$ è ben controllato dal circuito

Si può usare uguale corrente ($I_1 = I_2 = I$): è più semplice e rende quasi uguale la dissipazione di potenza nei due diodi, e quindi più simili le temperature delle due giunzioni, perciò la misura è più accurata.

I due diodi che costituiscono il sensore possono essere integrati con un preamplificatore. Si realizza così un sensore integrato che dà in uscita una tensione amplificata e calibrata, lineare con la temperatura.