

Sensori termici

Caratterizzazione dei sensori termici:

- principio di funzionamento e grandezza misurata
 1. Il trasferimento di calore
 2. Equivalenti elettrici dei parametri termici
 3. La misura di temperatura (le unità di misura del S.I.)

Sensori termici

Caratterizzazione dei sensori termici:

- tipi di dispositivi, circuito di lettura (read-out) e modello del sensore (sensibilità)
1. Sensori termoelettrici integrati:
 - sensore di radiazione infrarossa a pile di microtermocoppie (Lahiji & Wise, 1982)
 2. Sensori basati su giunzioni a semiconduttore:
 - termometro a diodi (Barth & Angell, 1982)
 - sensore a transistori bipolari PTAT (National Semicond)
 3. Sensori termo-meccanici:
 - termometro bimorfo integrato (esempio visto in Lab1)

Il trasferimento di calore

- un sensore termico si basa su due passi fondamentali:
 1. energia termica $\rightarrow \Delta T$: l'energia termica viene convertita in una differenza di temperatura attraverso un flusso di calore dal misurando al sensore
 2. $\Delta T \rightarrow$ energia elettrica: la differenza di temperatura è trasformata in un segnale elettrico, ad esempio per effetto termoelettrico o termoresistivo

Il trasferimento di calore

- il trasferimento di una quantità di calore dal misurando al sensore può avvenire in tre modi (che possono anche essere combinati):
 1. conduzione: sfrutta il contatto fisico tra i corpi. Le particelle nel corpo più caldo hanno più energia cinetica e si muovono verso il corpo freddo raffreddandosi (cedendo energia al corpo freddo)
 2. convezione: sfrutta un fluido intermedio (gas o liquido). Il fluido trasporta il calore dal corpo più caldo al corpo più freddo. La convezione può essere naturale o forzata.
 3. irraggiamento: sfrutta l'emissione di onde elettromagnetiche del corpo caldo.

I modelli del trasferimento di calore

- conduzione:

nelle ipotesi di trasferimento di calore monodimensionale è

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{equazione del flusso}$$

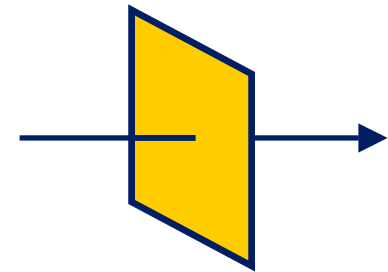
Q è la quantità di calore trasferita [J]

k è la conducibilità termica [W/(mK)]

A è l'area della sezione attraversata dal flusso di calore [m²]

T è la temperatura [K]

x è la direzione normale ad A [m]



I modelli del trasferimento di calore

- conduzione:

nelle ipotesi di trasferimento di calore monodimensionale è

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

equazione della diffusione

k è la conducibilità termica [W/(mK)]

ρ è la densità di massa [Kg/m³]

c è il calore specifico [J/(kgK)]

T è la temperatura [K]

x è la direzione normale ad A [m]

I modelli del trasferimento di calore

- convezione:

nelle ipotesi di trasferimento di calore monodimensionale è

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A \Delta T$$

α è il coefficiente convettivo [W/(m²K)]

Q è la quantità di calore trasferita [J]

A è l'area della sezione attraversata dal flusso di calore [m²]

ΔT è la differenza di temperatura tra il corpo e il fluido [K]

α dipende dalla capacità termica, dalla viscosità e dalla velocità del fluido

I modelli del trasferimento di calore

- irraggiamento:

la radiazione spettrale di un corpo alla temperatura T è

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon_T \sigma A T^4 \quad \text{equazione di Stefan-Boltzmann}$$

ε_T è l'emissività ($\varepsilon_T = 1$ per il corpo nero ideale)

σ è la costante di Stefan-Boltzmann = $5,67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

Q è la quantità di calore trasferita [J]

A è l'area della sezione attraversata dal flusso di calore [m^2]

T è la temperatura [K]

Equivalenti elettrici dei parametri termici

| | | | |
|--|------------------|---|---------------------|
| Q | calore | $Q = qpV$ | carica |
| $\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$ | flusso di calore | $J = \frac{I}{A}$ | densità di corrente |
| T | temperatura | φ_p | pseudopot. di Fermi |
| $\frac{\partial q}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ | | $J = -\sigma_p \frac{\partial \varphi_p}{\partial x}$ | |
| $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ | | $\frac{\partial \varphi_p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \varphi_p}{\partial x^2}$ | |

Equivalenti elettrici dei parametri termici

| | | | |
|---|------------------|-------------------|---------------------|
| Q | calore | $Q = qpV$ | carica |
| $\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$ | flusso di calore | $J = \frac{I}{A}$ | densità di corrente |
| T | temperatura | Φ_p | pseudopot. di Fermi |

J

$$J/s = W$$

$$J/(sm^2) = W/m^2$$

K

C

$$C/s = A$$

$$C/(sm^2) = A /m^2$$

V

Equivalenti elettrici dei parametri termici

Resistenza termica:

$$R_{th} = \frac{L}{kA} \quad \text{misurata in K/W}$$

Capacità termica:

$$C_{th} = \rho c V \quad \text{misurata in Ws/K}$$

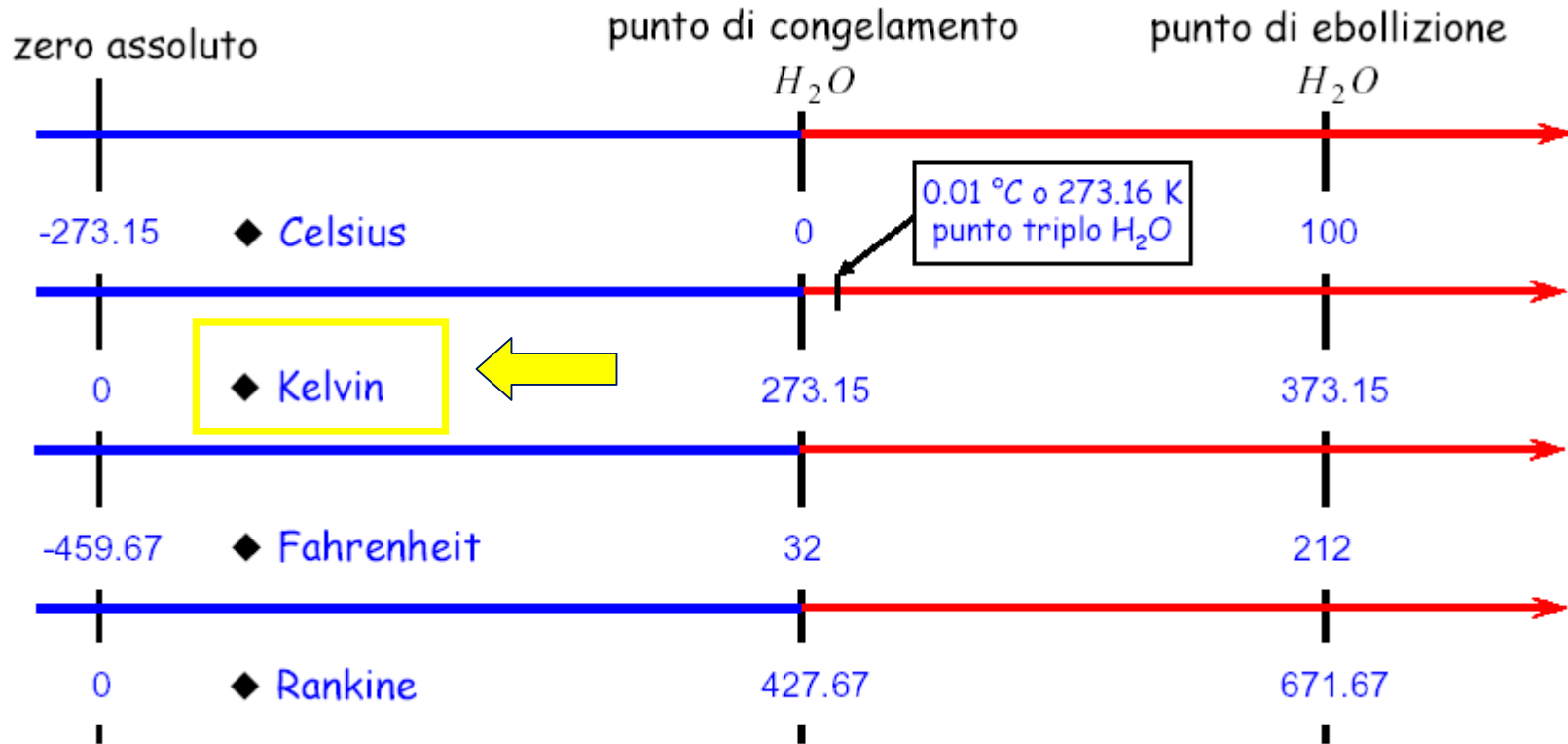
Equivalenti elettrici dei parametri termici

$$R_{th}C_{th} = L^2 \frac{\rho c}{k} = \tau$$

| Material | k (W/mK) | c (J/kgK) | ρ (Kg/m ³) | τ/L^2 (s/m ²) |
|------------------|----------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|
| SiO ₂ | 1,38 | 745 | 2200 | 1190000 |
| Si bulk | 149 | 700 | 2330 | 11000 |
| Si poly | 34 | 770 | 2330 | 53000 |
| Al | 237 | 899 | 2700 | 10000 |
| Au | 318 | 128 | 1900 | 765 |

La misura di temperatura

- scale di temperatura:



La misura di temperatura

- range di valori (spettro di temperature):

- *Range I:* da **13.8 K (-259.34 °C)**H a **273.15 K (0 °C)**
- *Range II:* da **273.15 K (0 °C)**H₂O a **903.89 K (630.74 °C)** ←
- *Range III:* da **903.89 K (630.74 °C)**Sb a **1337.58 K (1064.43 °C)**
- *Range IV:* oltre **1337.58 K (1064.43 °C)**Au

- MISURA DI ENERGIA TERMICA:

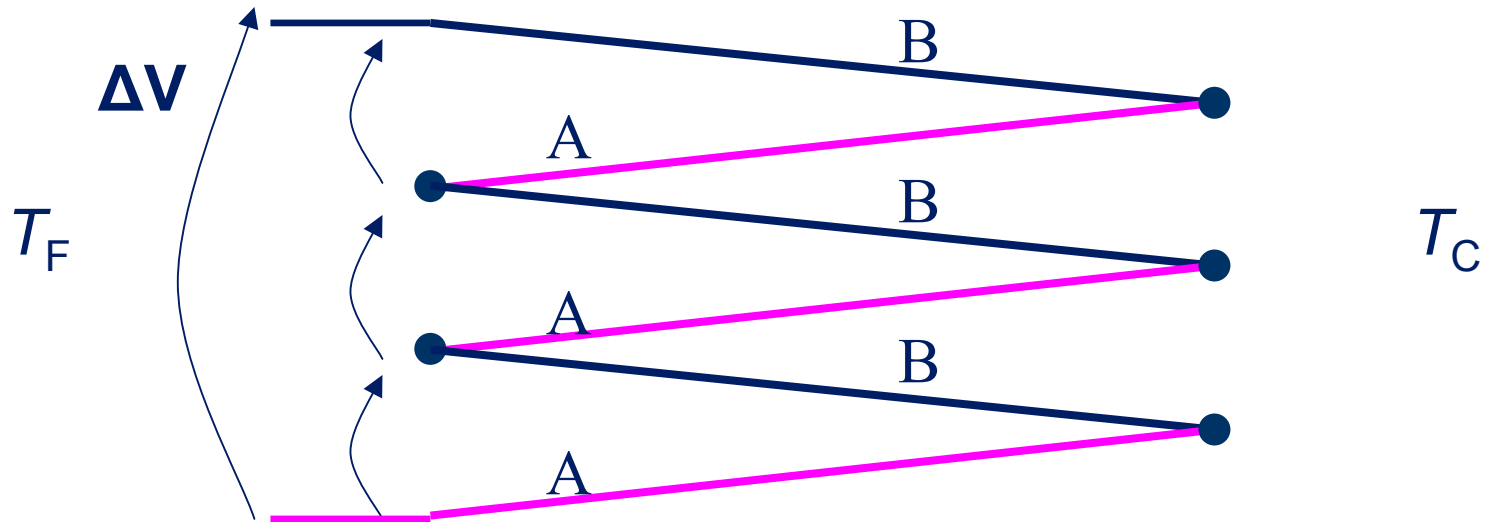
1 caloria (cal) è la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di 1 grammo di H₂O da 14.5 a 15.5 °C.

$$1\text{J} = 0.2389\text{ cal}$$

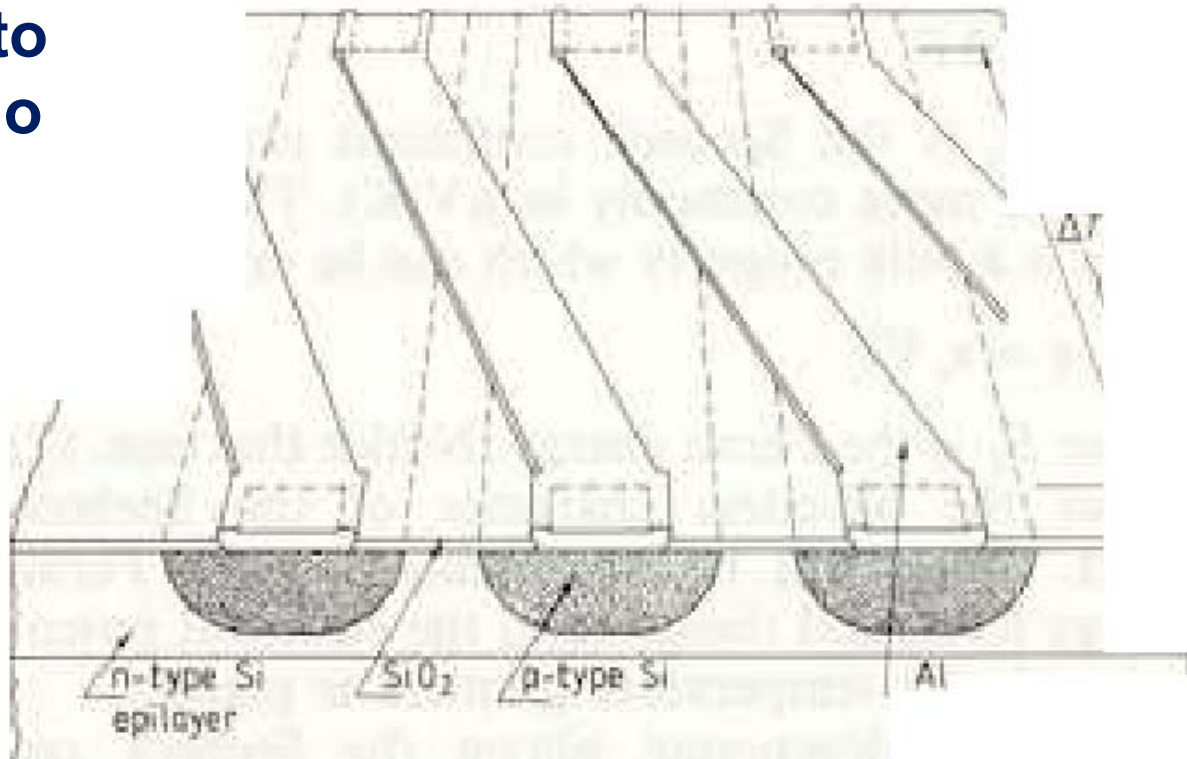
Sensori termoelettrici integrati

EFFETTO SEEBECK: usando due materiali diversi con una estremità posta ad una temperatura T_F e con l'altra ad una temperatura T_C si osserva che $dV_{AB} = \alpha_{AB} dT$ (principio delle termocoppie), con α_{AB} il coefficiente di Seebeck relativo

$$\Delta V = N \alpha_{AB} \Delta T$$



**giunto
caldo**



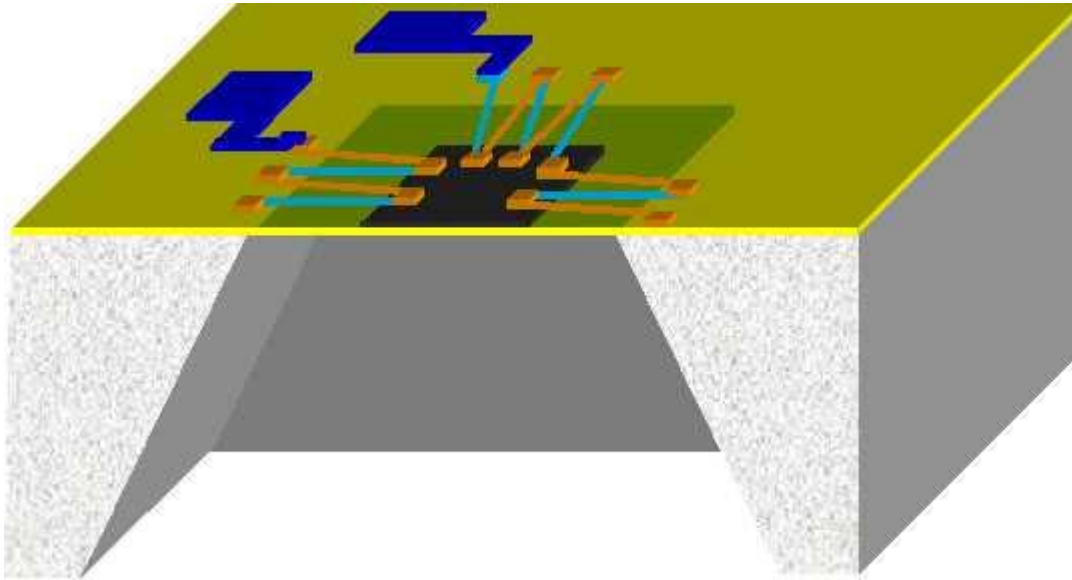
**giunto
freddo**

→ R_{th} deve essere grande, in modo da garantire il max gradiente di temperatura e per tempi lunghi: strisce lunghe e sottili.

→ si deve anche garantire l'isolamento termico tra giunto caldo e giunto freddo: il substrato di silicio non va bene perchè ha una conducibilità termica troppo alta

→ nella regione del giunto caldo invece si devono garantire R_{th} e τ piccoli

- membrana chiusa:

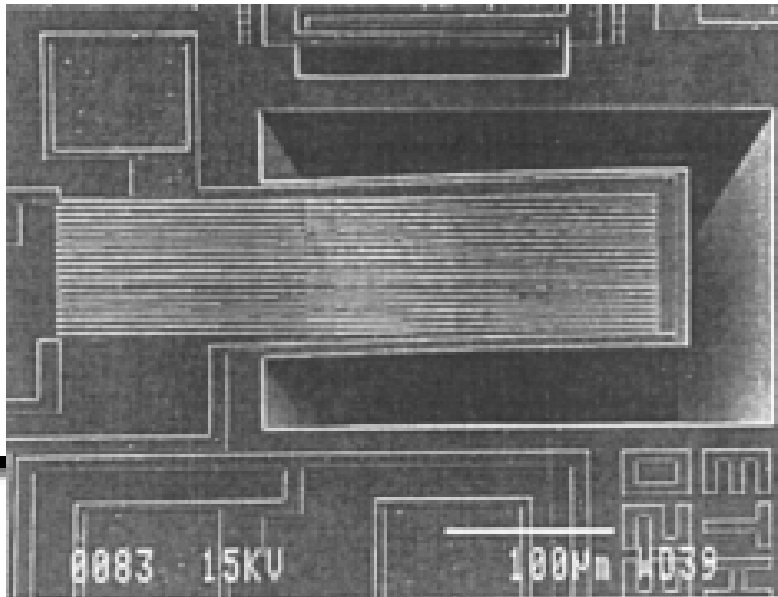


→ R_{th} aumenta di 2 ordini di grandezza

→ nella regione centrale invece R_{th} e τ si riducono moltissimo

→ molta area disponibile per la realizzazione delle pile di termocoppie (N grande)

- trave a sbalzo:

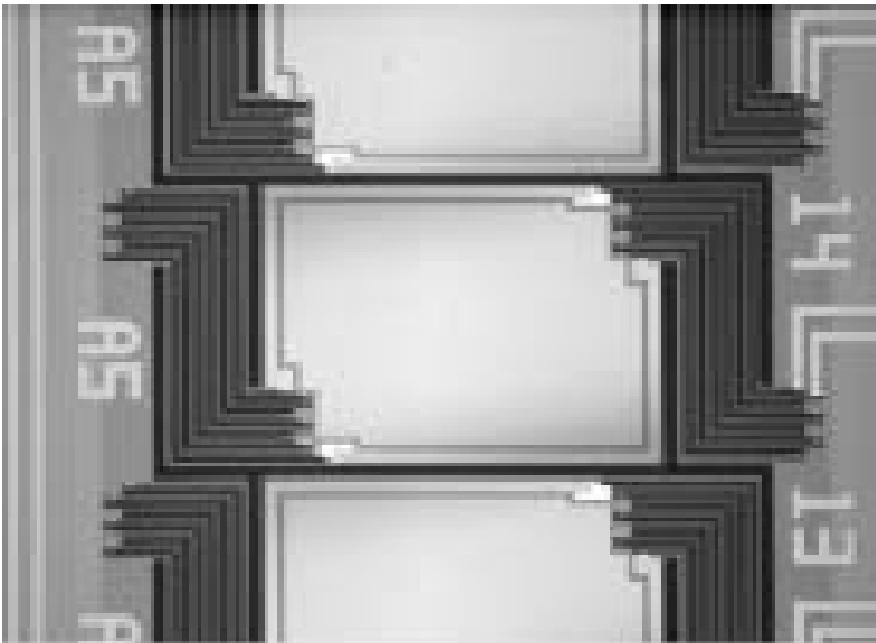
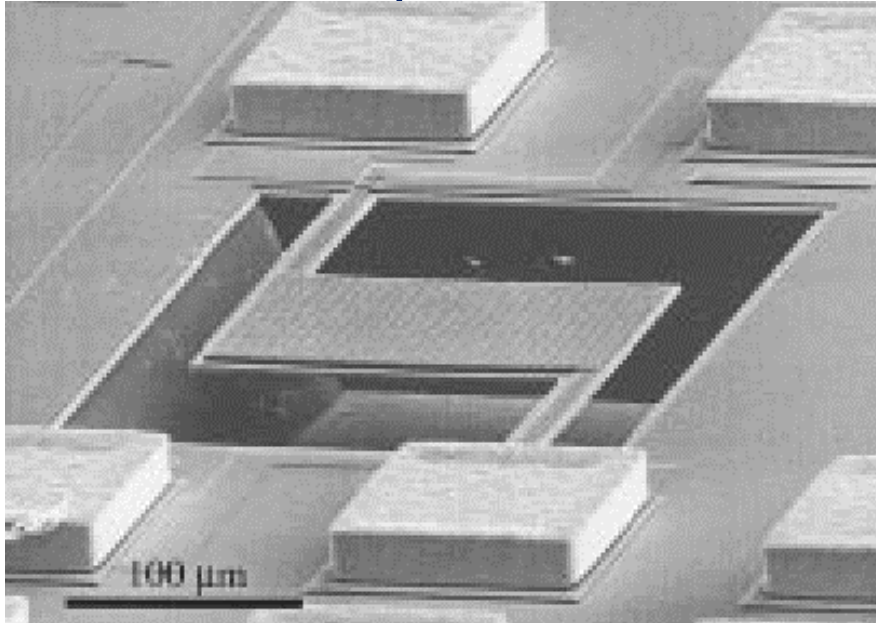


→ R_{th} aumenta ulteriormente perchè è maggiore il rapporto L/W della struttura

→ la regione del giunto caldo non è più limitata dalla geometria

→ più fragile meccanicamente

- membrana aperta:



→ l'area del giunto caldo è molto più estesa e molto più isolata dal giunto freddo

→ i ponticelli di sospensione sono molto lunghi e stretti, ottenendo così ottime pile di termocoppie

→ l'area disponibile per la realizzazione delle pile di termocoppie è complessivamente limitata (N piccolo)

→ la realizzazione è più difficile e può presentare criticità di processo e di packaging.

Principali applicazioni dei sensori termoelettrici

Microcalorimetro:

è un sensore chimico in grado di misurare la quantità della sostanza da monitorare: a tal fine il giunto caldo delle termocoppie è ricoperto con un materiale (catalizzatore) in grado di reagire chimicamente con la sostanza di interesse. Il calore generato dalla reazione chimica del catalizzatore causerà un aumento della temperatura sul giunto caldo, che potrà essere misurata sulle termocoppie: la tensione sarà proporzionale alla frequenza della reazione chimica.

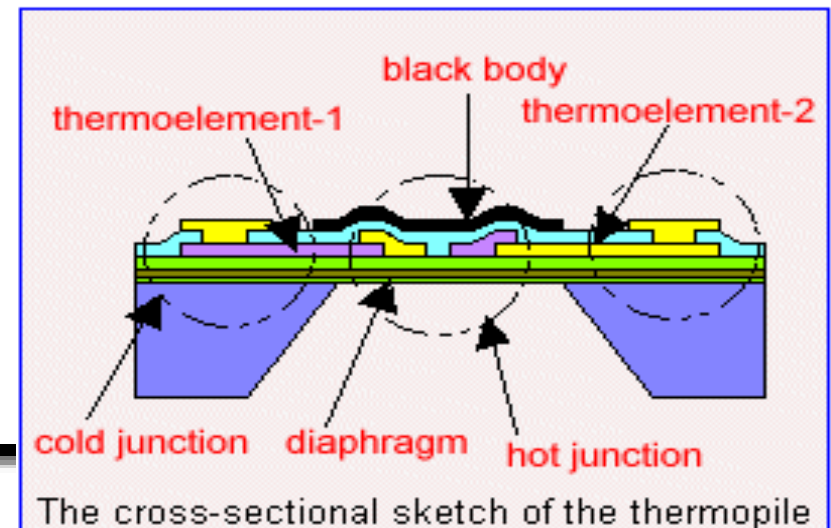
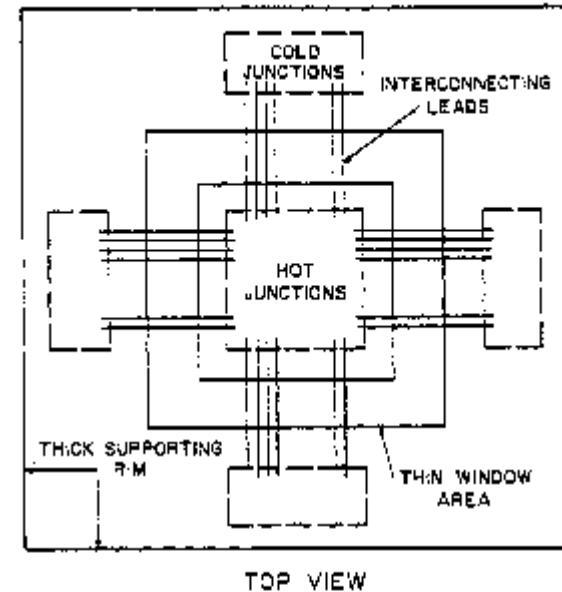
Flussimetro:

si realizza una resistenza in poly-Si sul giunto caldo e si riscalda il giunto per effetto Joule. Quindi si espone il giunto caldo al flusso di un fluido (sia gas che liquido). Il fluido genera un trasferimento di calore per convezione forzata, proporzionale alla velocità del fluido, che porta al raffreddamento del giunto. La variazione di temperatura è misurata dalle termocoppie: la tensione sarà proporzionale alla velocità del fluido.

Principali applicazioni dei sensori termoelettrici

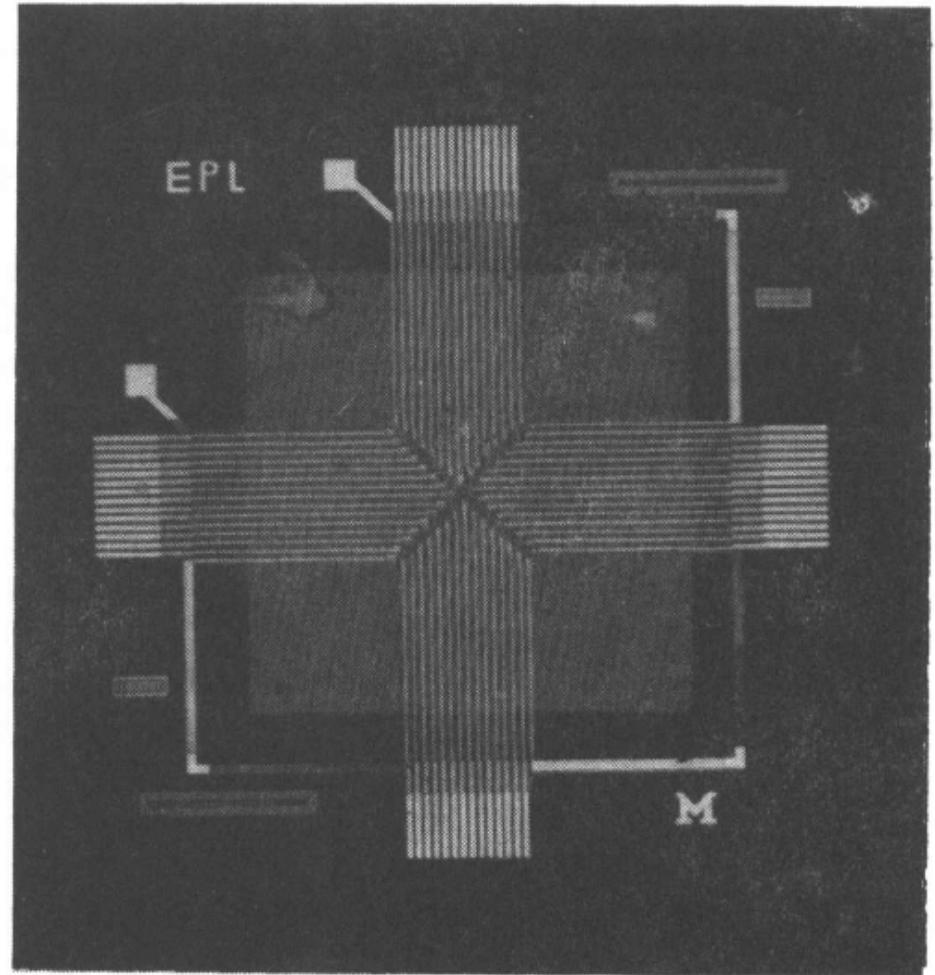
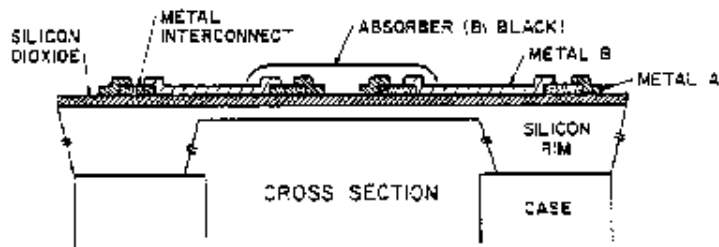
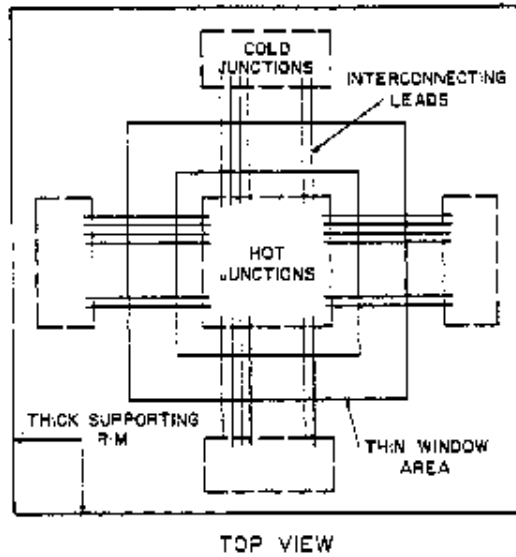
Sensore di radiazione infrarossa:

è un sensore d'immagine (radiazione dal visibile al profondo infrarosso). La regione del giunto caldo è ricoperta da un materiale che assorbe tali radiazioni. L'isolamento termico del giunto caldo fa aumentare la temperatura del materiale assorbente. La differenza di temperatura misurata dalle termocoppie sarà proporzionale all'intensità di radiazione incidente sul giunto assorbente.



Sensore di infrarossi a termocoppie

(Lahiji & Wise, "A monolithic thermopile detector fabricated using integrated-circuit technology", IEDM 1980)



Sensori basati su giunzioni a semiconduttore

applicazioni:

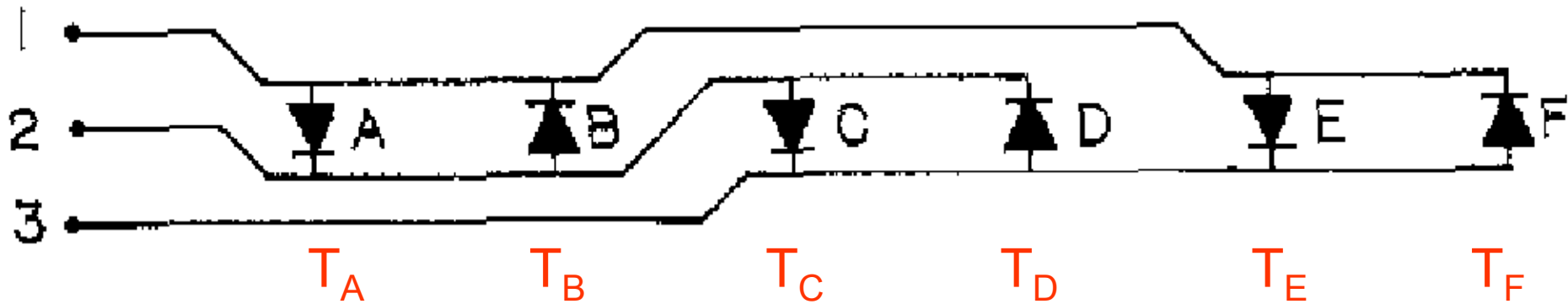
range di temperature non estremi, molti prodotti commerciali disponibili, completamente integrati nella tecnologia CMOS, facile da realizzare anche la parte di condizionamento e conversione A/D on chip

vantaggi:

risposta estremamente lineare, con uscita in tensione o in corrente, accurati, poco costosi

Termometro a diodi

(Barth & Angell, "Thin Linear Thermometer Arrays for use in Localized Cancer Hyperthermia", IEEE Trans. on ED, 1982)



| | |
|----|-------------------|
| t1 | $I_{12} - V_{12}$ |
| t2 | $I_{21} - V_{21}$ |
| t3 | $I_{23} - V_{23}$ |
| t4 | $I_{32} - V_{32}$ |
| t5 | $I_{13} - V_{13}$ |
| t6 | $I_{31} - V_{31}$ |

Sensore a transistori bipolari PTAT

