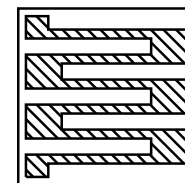
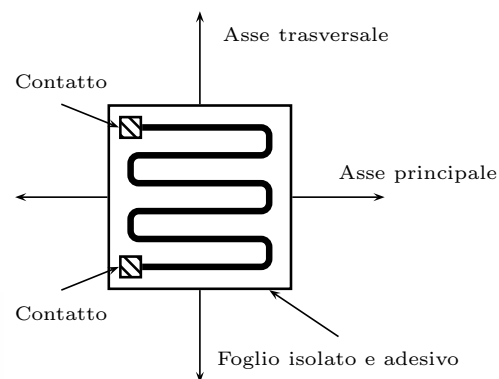
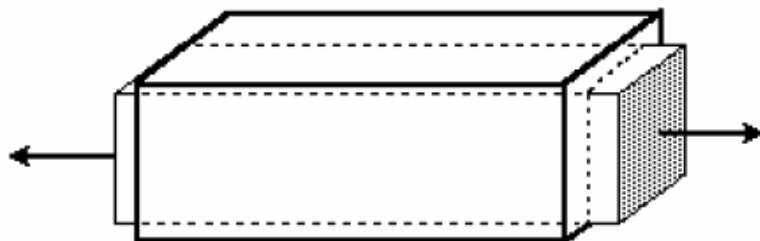


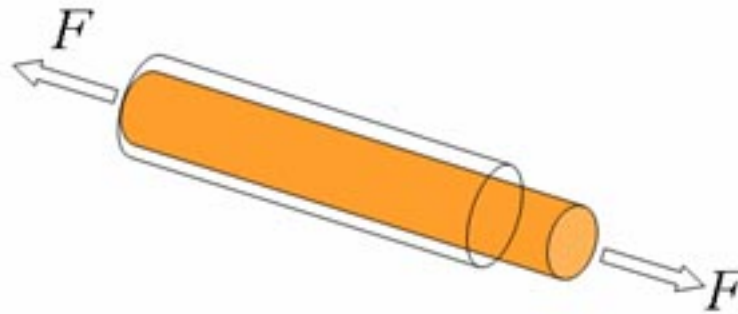
Estensimetri – Strain gage

- L'estensimetro (Strain gage, raramente Strain gauge) è un sensore in cui la deformazione elastica subita da un elemento metallico oppure da un semiconduttore si riflette nella variazione della resistenza dell'elemento.
- Sono utilizzati per la misura di deformazione e conseguentemente di forza/pressione (conoscendo le proprietà elastiche del mezzo a cui vengono applicati)
- Tre sono le principali tipologie costruttive degli estensimetri:
 - 1) filo metallico teso
 - 2) deposito metallico su film
 - 3) Semiconduttore



Estensimetri – Strain gage

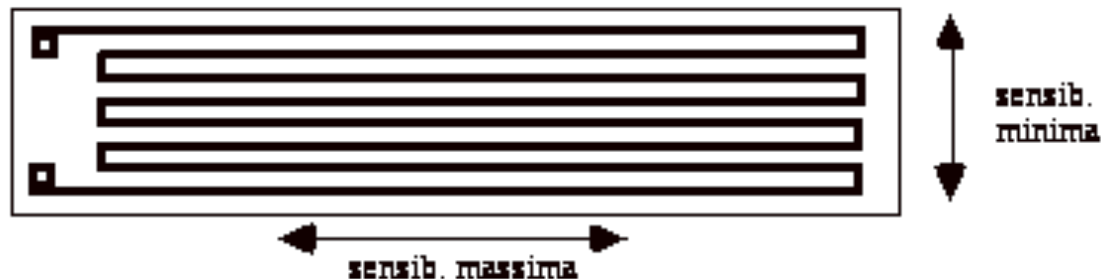
- 1) Filo metallico teso
 - Un sottile filo metallico conduttore viene vincolato, in tensione, alla struttura di cui si desidera misurare la deformazione mediante dei supporti isolanti.
 - Questi devono essere posti lungo l'asse in cui si intende rilevare la deformazione. La deformazione della struttura provoca una variazione della distanza fra i supporti e quindi una deformazione del filo metallico che subisce sia una variazione della lunghezza l , sia una variazione della sezione S .



Estensimetri – Strain gage

▪ 2) Deposito metallico su film

- Negli estensimetri a deposito metallico su film si usa come elemento deformabile un elemento simile ad un circuito stampato che vede una sottile pista conduttrice solidale ad un supporto isolante costituito da un film plastico di modesto spessore.
- La forma della pista conduttrice è tale da esaltare la dimensione totale lungo un asse e minimizzare quella lungo l'asse ortogonale.
- All'estremità della pista conduttrice sono poi ricavate delle piazzole per il collegamento dei reofori di alimentazione e misura. Spesso più estensimetri vengono disposti l'uno vicino all'altro, secondo assi concorrenti per ottenere una scomposizione vettoriale della deformazione.



Estensimetri – Strain gage

▪ 3) Semiconduttore

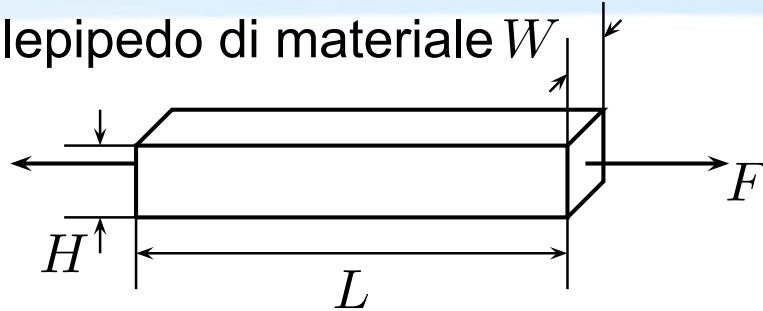
- Gli estensimetri a semiconduttore vengono realizzati mediante un processo di drogaggio del supporto che porta ad ottenere una pista conduttiva di forma analoga a quella dell'estensimetro a deposito metallico su film.
- Il supporto è frequentemente realizzato con la tecnologia del film spesso (thick film)
- In questi sensori l'effetto piezoresistivo è:
 - molto intenso
 - dipendente dal materiale e dal drogaggio
 - dipendente dalla temperatura
 - dipendente dallo sforzo, quindi con effetti di non linearità

Estensimetri – Strain gage

- I valori nominali di resistenza per gli estensimetri a deposito metallico su film sono compresi fra 100Ω e $1k\Omega$, con delle tolleranze di produzione che possono essere valutate nell' $1\div 2\%$
- Sono sottili ($2\ \mu\text{m} \div 10\ \mu\text{m}$) e con tratti trasversali larghi in modo da non risentire rispetto all'asse principale.
- I vantaggi degli strain gauges litografici sono:
 - precisione (piccole tolleranze di produzione)
 - riproducibilità (strain gauges matched)
 - piccole dimensioni del foglio di supporto
 - ampia superficie esposta (disperde bene il calore)
 - ampi contatti terminali
- Gli estensimetri a semiconduttore hanno invece resistenze comprese fra 60Ω e $10k\ \Omega$ con delle tolleranze che vanno dall' 1% al 10%

Formule per la deformazione

Consideriamo un parallelepipedo di materiale W



dove L è la lunghezza e $S = W \cdot H$ è la sezione. Definiamo sforzo (stress) il rapporto tra la forza applicata e la sezione del corpo

$$N = \frac{F}{S}$$

e deformazione (strain) la variazione relativa di lunghezza

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Se il materiale è elastico la deformazione è proporzionale allo sforzo:

$$\varepsilon \propto N \Rightarrow \varepsilon = \frac{N}{E}$$

dove E è chiamato Modulo di Young

Estensimetri – Strain gage

- La caratteristica di maggiore interesse nell'estensimetro è la sensibilità con cui la resistenza si modifica in conseguenza della deformazione
- Facendo riferimento ad una struttura cilindrica di altezza pari ad L in condizioni di riposo si consideri di applicare una sollecitazione assiale di trazione: il cilindro subirà una deformazione più o meno evidente a seconda dell'intensità della sollecitazione, delle caratteristiche del materiale e della geometria. L'altezza subirà un'allungamento pari a ΔL .
- Il rapporto $\Delta L/L$ costituisce l'indicazione della deformazione specifica subita dal cilindro. Il valore del rapporto, indicato col simbolo ϵ , viene chiamato "strain".

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- ϵ è adimensionale, ma viene comunemente misurato in microstrain ($\mu\epsilon = \epsilon * 10^6$)
 - Deformazione massima con strain gage metallici 40000 $\mu\epsilon$ (4%)

Formule per la deformazione

Quando una barra è tesa la lunghezza aumenta, quindi

$$\Delta L > 0$$

e si contrae la sezione

$$\Delta W < 0 \quad \Delta H < 0$$

Definiamo il rapporto di Poisson

$$\nu = -\frac{\Delta W}{W} / \frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta H}{H} / \frac{\Delta L}{L}$$

ν dipende dal materiale, di solito si ha

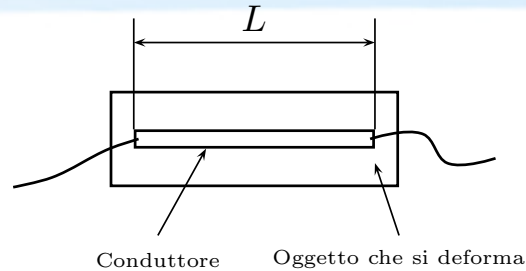
$$0,25 < \nu < 0,4$$

Per i metalli più comuni (Cu, Fe, acciaio)

$$0,3 < \nu < 0,35$$

$\frac{\Delta L}{L} = 10^{-6}$ viene chiamato 1 microstrain. Il microstrain è l'unità di misura normalmente impiegata per le misure di deformazione.

Principi di funzionamento estensimetri



La resistenza del conduttore vale

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

dove ρ è la resistività del conduttore. La variazione relativa di resistenza è (per piccole variazioni)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

ma la variazione relativa della sezione si può scrivere come

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta H}{H} = -2\nu \frac{\Delta L}{L}$$

Si ha quindi

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L}(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Per i metalli più comuni $\nu = 0,3 \div 0,35$, quindi

$$\frac{\Delta R}{R} = (1,6 \div 1,7) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Principi di funzionamento estensimetri

In alcuni metalli (soprattutto Ni e leghe di Ni) si ha forte effetto piezoresistivo, cioè variazione di resistività causata dalla deformazione:

$$\rho = \rho_0(1 + \beta N)$$

dove β è il coefficiente di piezoresistività. Si trova perciò

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \beta N$$

quindi

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \left[1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L} \right] = \frac{\Delta L}{L} \left[1 + 2\nu + \frac{\beta N}{\varepsilon} \right] = \frac{\Delta L}{L} [1 + 2\nu + \beta E]$$

Lo strain gauge trasduce una variazione relativa di lunghezza ($\frac{\Delta L}{L}$) in una variazione relativa di resistenza ($\frac{\Delta R}{R}$), ed è caratterizzato dal Gauge Factor

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 1 + 2\nu + \beta E = (1,6 \div 1,7) + \beta E$$

- valori più comuni: $G = 1,8 \div 2,2$
- tipi speciali: $G = 2 \div 3,5$ (leghe Ni-Cu e Ni-Fe-Cr)
- con Nickel si arriva a $G = 12$

Estensimetri – Strain gage

- Fattore di gage (gage factor)

- È possibile ricavare l'espressione della sensibilità dell'estensimetro rapportando la variazione relativa di resistenza $\Delta R/R$ al valore dello strain. Questo fattore viene comunemente indicato con il termine di "fattore di gage" (GF).

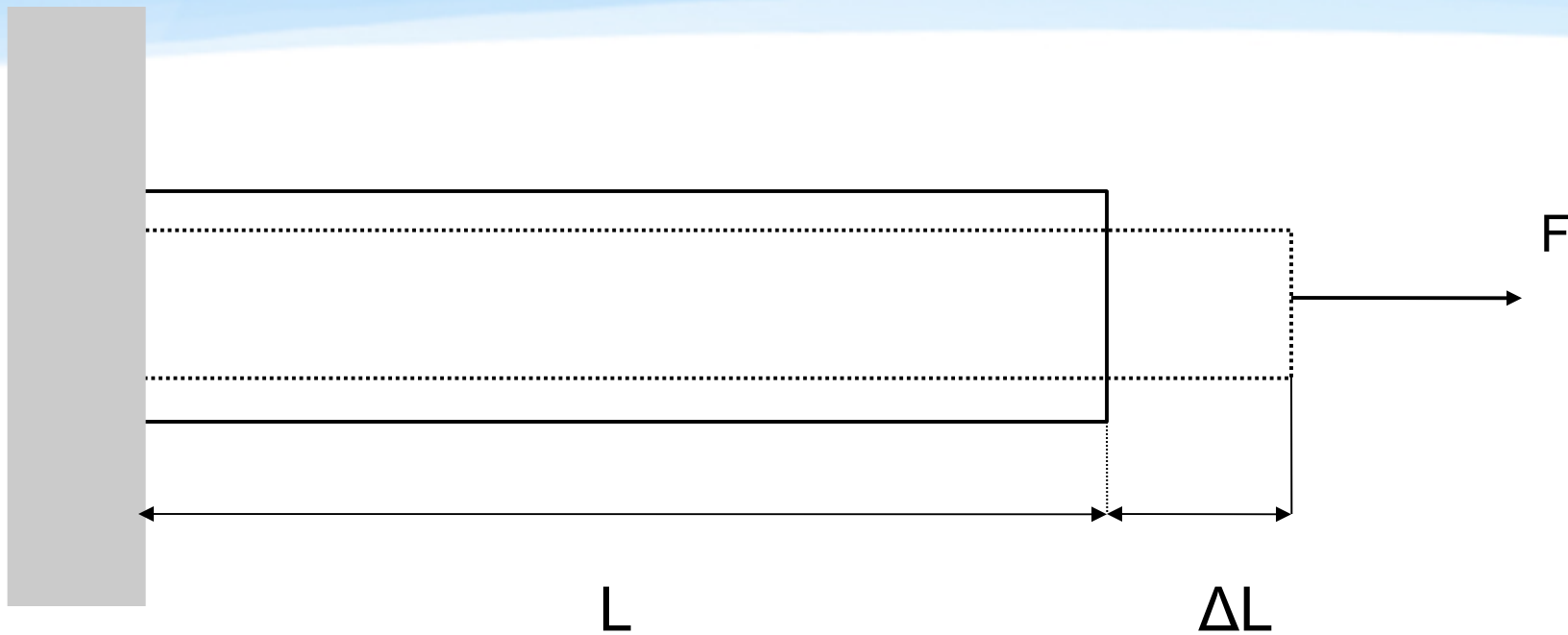
$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad \Delta R / R = GF \epsilon$$

- Il valore del fattore di gage dipende dal materiale utilizzato per la realizzazione dell'estensimetro: per gli estensimetri metallici GF è compreso fra 2 e 4.
- La variazione della resistenza è tipicamente molto piccola
- Il valore del fattore di gage è influenzato dalla temperatura

$$R(\epsilon) = R_0(1 + GF \epsilon)$$

Materiale	G
Platino	6
Costantana	2
NichelCromo	2.5
Silicio(tipo p)	100-170

Estensimetri – Strain gage



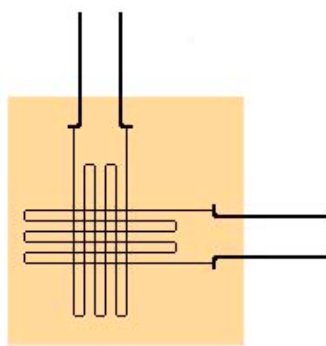
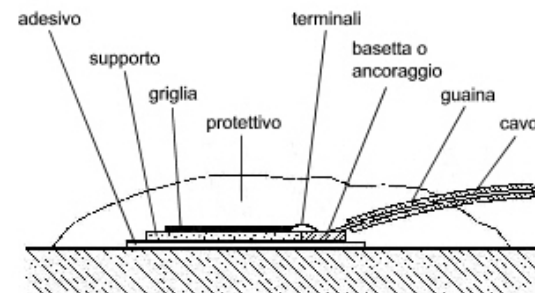
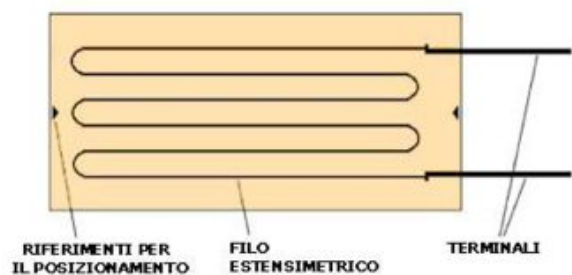
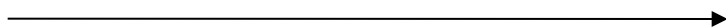
$$\epsilon = \Delta L / L$$

$$GF = \frac{\Delta R \setminus R}{\Delta L \setminus L}$$

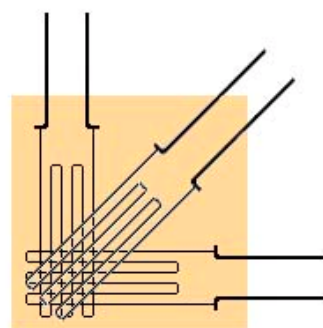
$$R(\epsilon) = R_0(1 + GF \epsilon)$$

Estensimetri – configurazioni

Asse di sensibilità

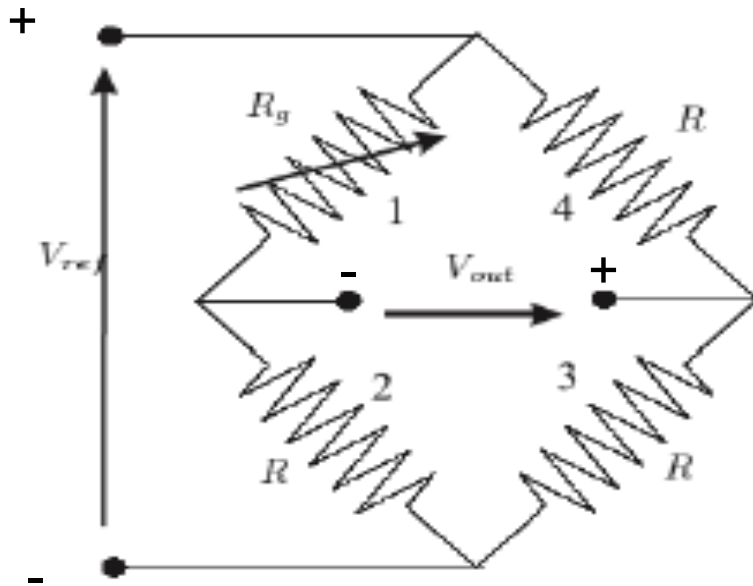


Estensimetro biassiale
con griglie a 90°



Estensimetro triassiale
con griglia intermedia
a 45°

Estensimetri – circuiti di lettura



Ponte di Wheatstone

Resistenza del
sensore = R in
assenza di
deformazione

$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R}{2R} - \frac{R}{R + R + \Delta R} \right) = V_{ref} \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} \right) \approx V_{ref} \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

$$\Delta R = R_0 GF \epsilon$$

Effetto della Temperatura

Le variazioni di R per effetti termici sono date da:

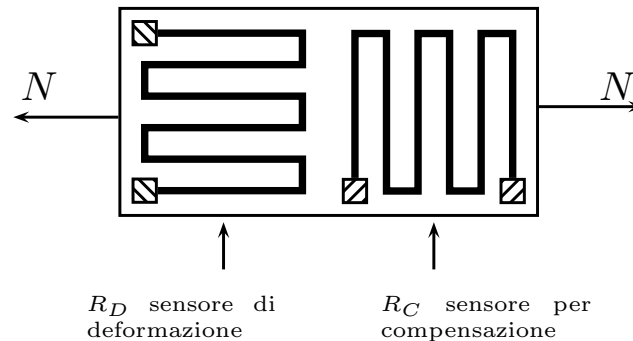
$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_T = \alpha \Delta T$$

con $\alpha \simeq 4 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$, mentre le variazioni di R per deformazioni sono date da

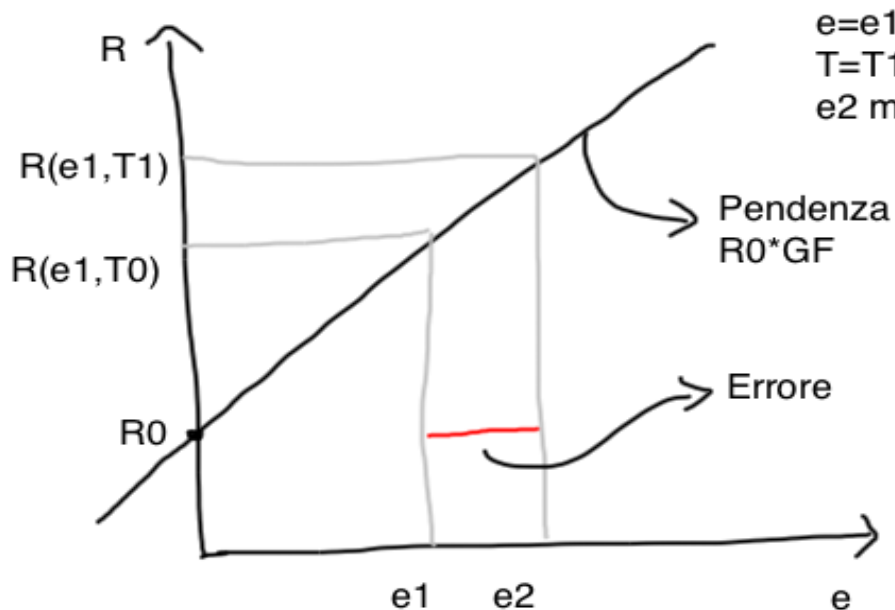
$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_N = G_F \varepsilon$$

con $G_F \approx 2$. Quindi una $\Delta T = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ha effetto equivalente a $\varepsilon \simeq 2000$ microstrain.

Occorre perciò compensare le variazioni dovute a ΔT utilizzando due sensori identici (“matched strain gauges”) entrambi esposti alla stessa temperatura T , ma solo uno soggetto a deformazione:



Effetto temperatura



e=e1
T=T1
e2 misurata

$$R(\epsilon) = R_0(1 + GF \epsilon)(1 + \alpha(T - T_0))$$

$$errore = |\epsilon_2 - \epsilon_1|$$

$$\frac{R(\epsilon) - R_0}{\epsilon} = R_0 GF$$

$$\epsilon_2 = \frac{(R(\epsilon_1, T_1) - R_0)}{GF \cdot R_0} = \frac{(1 + GF \cdot \epsilon_1) \cdot (1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)) - 1}{GF}$$

$$\epsilon_1 = \frac{(R(\epsilon_1, T_0) - R_0)}{GF \cdot R_0}$$

Influenza temperatura

- Influenza temperatura

Esempio: $GF=2$, $\epsilon_1 = 1000 \mu\epsilon$, $T_0=20C$, $T_1=40C$, $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} C^{-1}$

$$\epsilon_2 = \frac{(R(\epsilon_1, T_1) - R_0)}{GF \cdot R_0} = 1100 \mu\epsilon$$

$$errore = |\epsilon_1 - \epsilon_2| = 100 \mu\epsilon$$

Nota: 20°C di variazione implicano 100μϵ di errore
È necessario compensare la dipendenza dalla temperatura

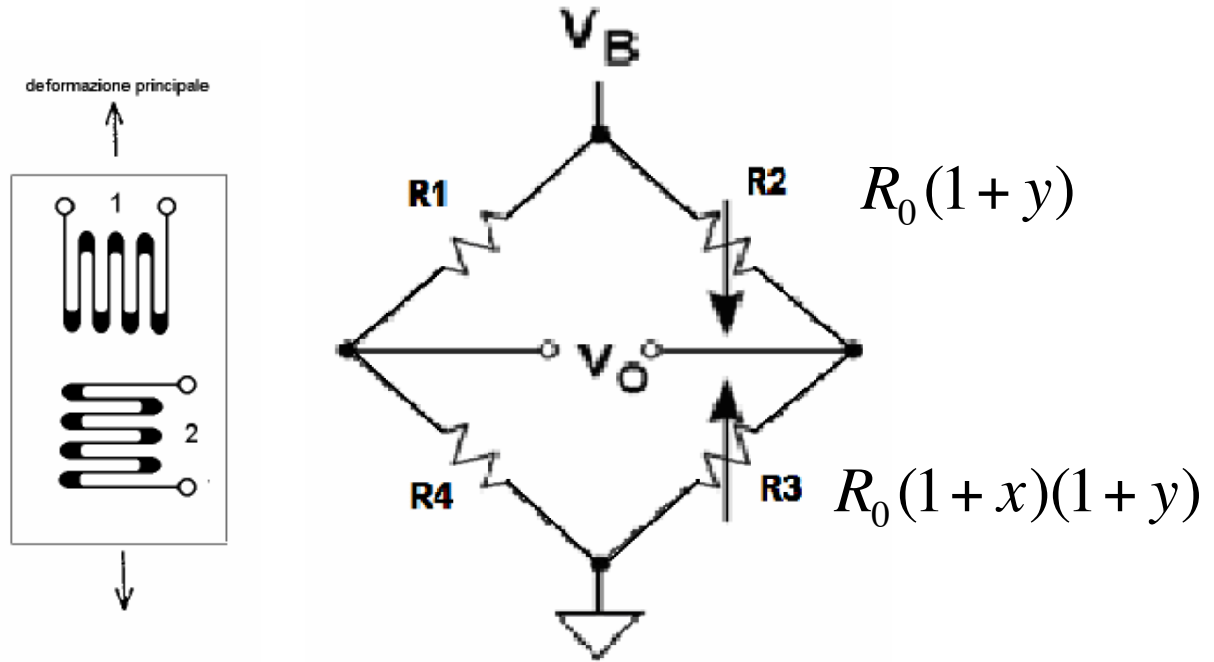
Estensimetri – circuiti di lettura effetto temperatura

■ Compensazione effetti temperatura

Dummy gage:

Stesso effetto termico, ma non risente della deformazione

Il sensore 2
Non risente della
deformazione



$$y = \alpha(T - T_0) \quad R_0 \Rightarrow R(T) = T_0$$

Un ponte così bilanciato darà in uscita una tensione

$$V_u = V_{ref} \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

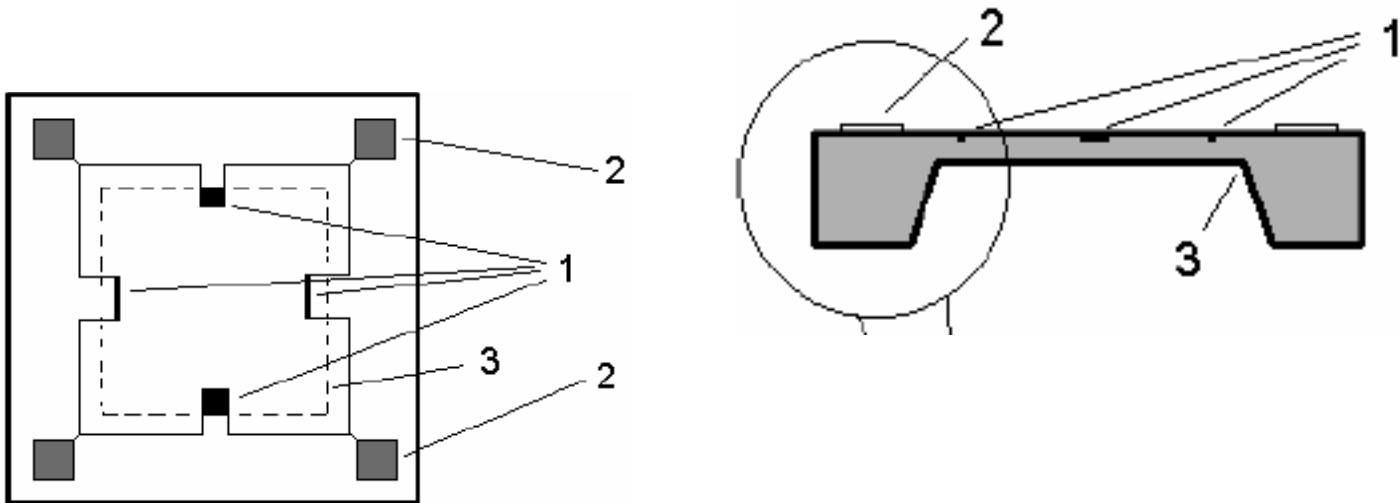
Estensimetri - applicazioni biomediche

- I sensori piezoresistivi vengono utilizzati, in campo biomedico, in quelle applicazioni in cui è importante misurare variazioni dimensionali o stati di tensione meccanica.
- Esempi di questo tipo possono essere la misura della variazione della circonferenza della gabbia toracica per il monitoraggio della respirazione o il rilevamento delle variabili cinematiche di parti del corpo in movimento.
- Un'altra importante applicazione è la pletismografia basata sull'uso di estensimetri. Il metodo consiste nel circondare l'arto in esame con un fascia elastica dotata di estensimetri e di registrare la variazione relativa di resistenza.
 - Attraverso il fattore di gage si può risalire alla variazione di lunghezza e di conseguenza alla variazione di volume. Sebbene qualche controversia sull'affidabilità di questa metodologia, studi comparativi con sistemi tradizionali ne hanno decretato l'efficacia.
- Sono utilizzati anche nella realizzazione di “piattaforme di forza” per lo studio della cinematica e dinamica articolari nell'analisi della camminata (gait analysis)

Misure di pressione

▪ Ponte estensimetrico

- Gli estensimetri a semiconduttore, per le ridotte dimensioni geometriche e per l'elevato GF, che può arrivare fino a 200, si prestano particolarmente per la realizzazione di sensori di pressione a membrana deformabile. In questo sensore la pressione da misurare agisce su di una membrana di materiale idoneo (silicio od altro) su cui sono stati ricavati, con le usuali tecniche di drogaggio selettivo, gli estensimetri e gli eventuali circuiti elettronici per il trattamento dell'informazione. La deformazione del substrato provoca la variazione della resistenza degli estensimetri e quindi la nascita di una tensione di squilibrio.



Misure di pressione

- Si deve però segnalare il pericolo che il fluido sotto misura possa contenere elementi chimici in grado di reagire con il materiale che compone la membrana modificando la risposta del sensore. Per questo motivo si continuano a costruire anche sensori in cui la membrana elastica è costituita da metalli inattaccabili su cui vengono montati degli estensimetri classici a deposito metallico su film.
- Il vantaggio principale degli estensimetri a semiconduttore è quello che sullo stesso chip possono essere integrati sia l'elemento sensibile, sia un circuito elettronico in grado di effettuare operazioni quali la linearizzazione o la compensazione in temperatura migliorando sensibilmente le prestazioni metrologiche del sistema.