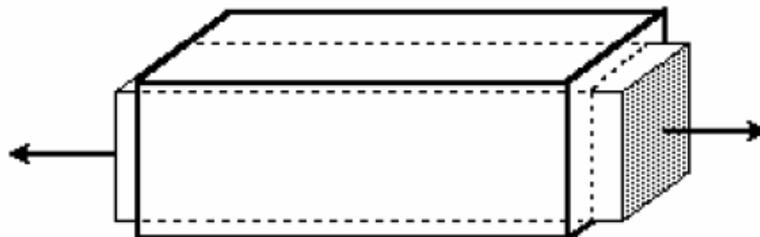


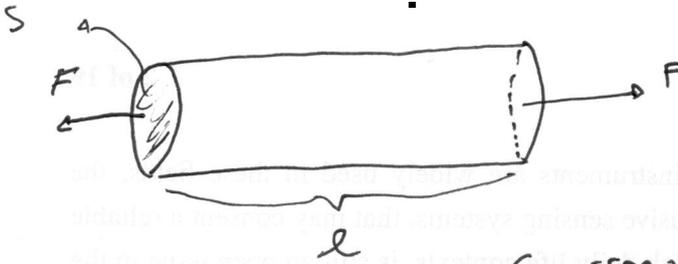
Estensimetri – Strain gage

- L'estensimetro (Strain gage) 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)
- Le principali tipologie costruttive degli estensimetri son tre:
 - 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 sia della sezione S .



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

Relazione resistenza/deformazione



$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$$

$$\sigma = SF \alpha l_0$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \text{STRAIN o DEFORMAZIONE}$$

allungamento $\Delta l \rightarrow \Delta l = \frac{F l}{E S} \rightarrow \Delta l = \frac{1}{C} F$ $C = \frac{E S}{l}$

$C \rightarrow$ COSTANTE ELASTICA

(CAR. GEOMETRICHE S, l)
(FISICHE E)

diminuzione di sezione $\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l}$ $\mu \rightarrow$ COEFFICIENTE DI POISSON (0.3 METALLI)

$$R = \tau \frac{l}{S} \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\tau}{\tau} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

\rightarrow VARIABILI INDIPENDENTI DALLA GEOMETRIA

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\tau}{\tau} + 2\mu \frac{dl}{l} = (1+2\mu) \frac{dl}{l} = K \frac{dl}{l}$$

$K =$ GAGE FACTOR

MATERIALI CONDUTTORI $\cong \sim$

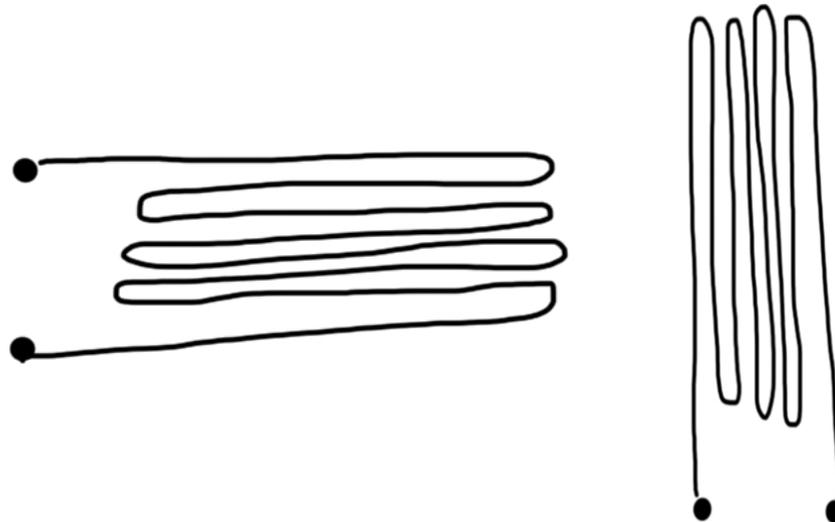
SEMI CONDUTTORI FINO A 200

E' POSSIBILE CHE CALCOLARE LA FORZA CHE CAUSA LA DEFORMAZIONE

$$F = \frac{E S}{l} \frac{\Delta l}{l} = \frac{E S}{K} \frac{dR}{R}$$

Estensimetri – Strain gage

- 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

- 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)

- 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 dell'ordine del $\pm 2\%$

- Gli estensimetri a semiconduttore hanno invece resistenze comprese fra 60Ω e $10k\Omega$ con delle tolleranze che vanno dall' 1% al 10%

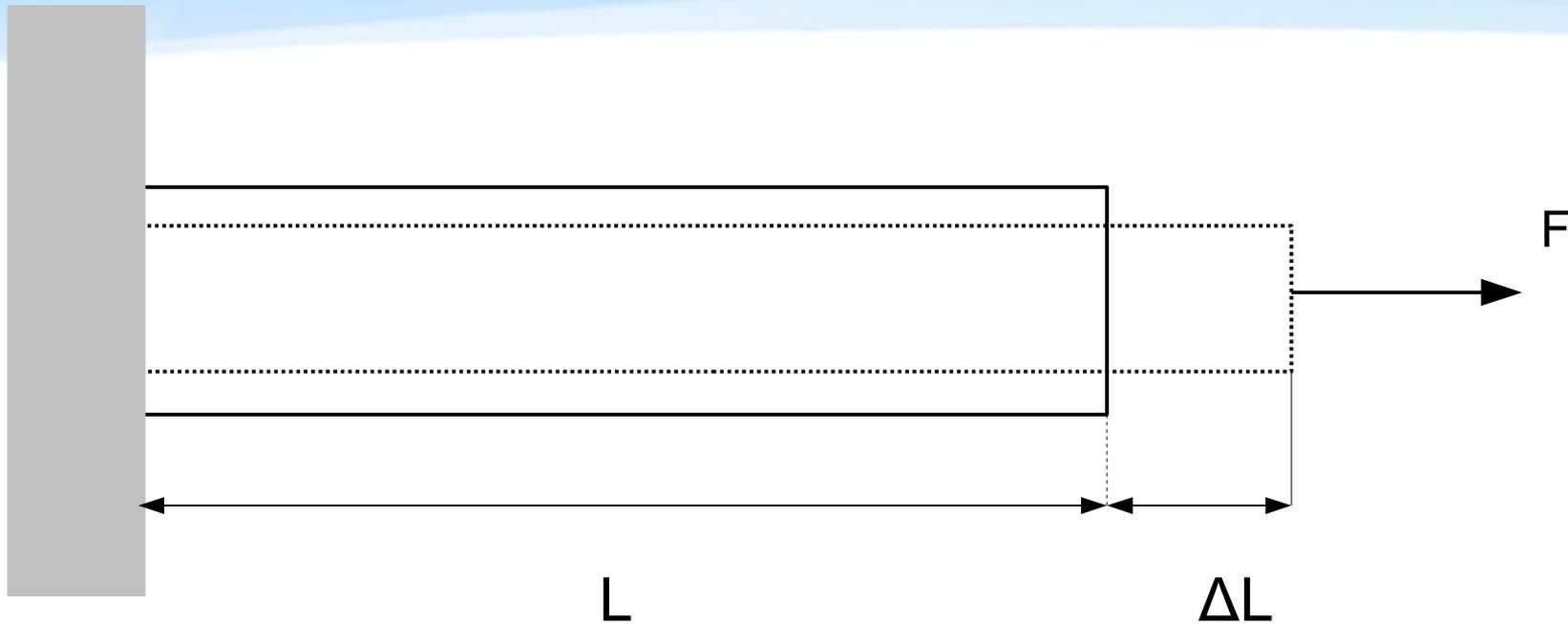
Estensimetri – Strain gage

- La caratteristica di maggiore interesse nell'estensimetro è la sensibilità con cui la resistenza si modifica in conseguenza della deformazione: per giungere però un tale parametro si deve preventivamente definire come misurare la 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%)

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 – Strain gage

- Fattore di gage (gage factor)

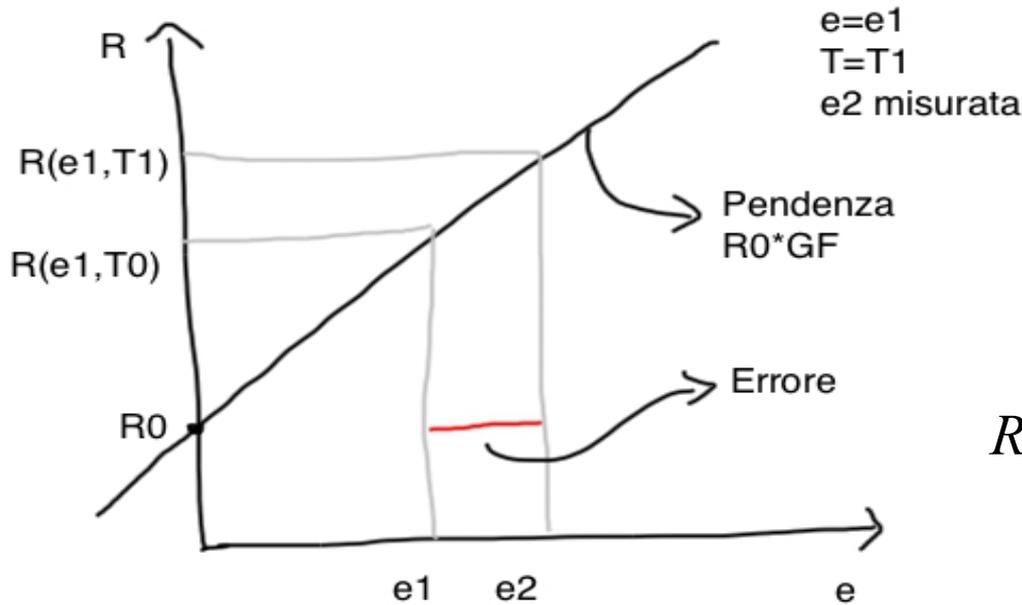
- È possibile ricavare l'espressione della sensibilità dell'estensimetro rapportando la variazione relativa di resistenza $\Delta R/R$ al valore dello strain. Questo fattore viene comunemente indicato con il termine di "fattore di gage" (GF).

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

- 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

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

Effetto temperatura



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

$$errore = |\epsilon_2 - \epsilon_1| = \Delta \epsilon = \frac{\Delta R}{R_0 GF}$$

$$R(\epsilon_1, T_1) - R(\epsilon_1, T_0) = \Delta R$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta \epsilon} = R_0 GF$$

Influenza temperatura

- Influenza temperatura

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

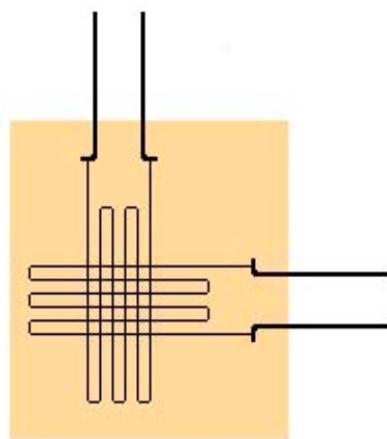
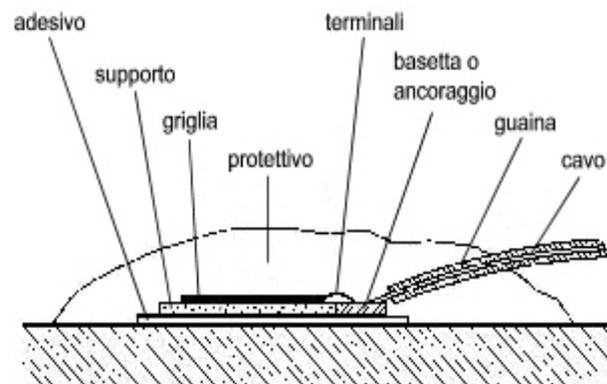
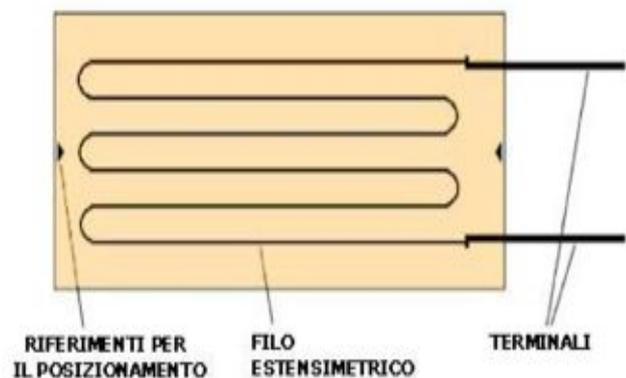
$$errore = \frac{(R(\epsilon_1, T_1) - R(\epsilon_1, T_0))}{GF \cdot R_0} = 10^{-4} = 100 \mu \epsilon$$

Nota: 20C di variazione implicano 100 $\mu\epsilon$ di errore

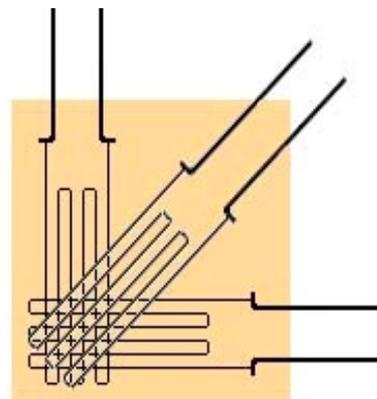
È necessario compensare la dipendenza dalla temperatura

Estensimetri – configurazioni

Asse di sensibilità

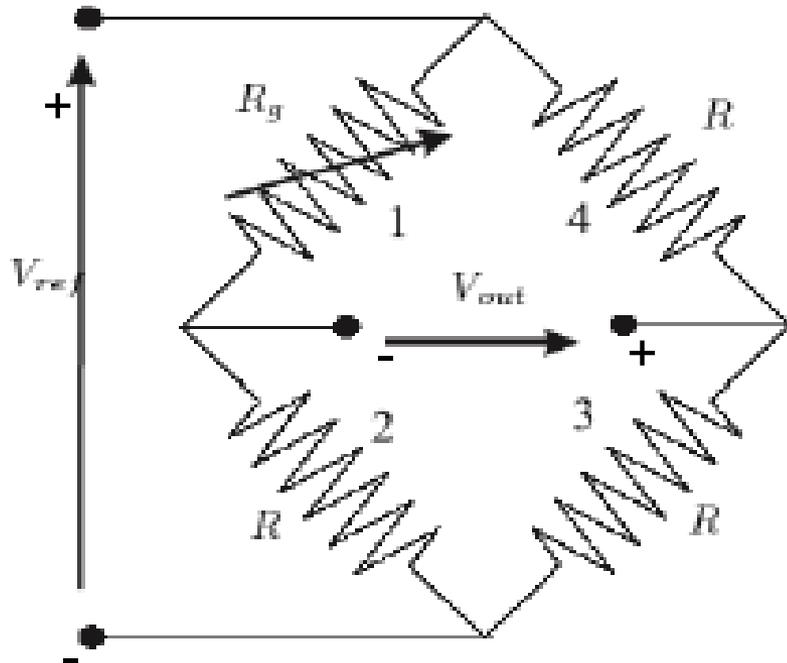


Estensimetro biassiale con griglie a 90°



Estensimetro triassiale con griglia intermedia a 45°

Estensimetri – circuiti di lettura



Ponte di Wheatstone

Resistenza del
sensore = R in
assenza di
deformazione

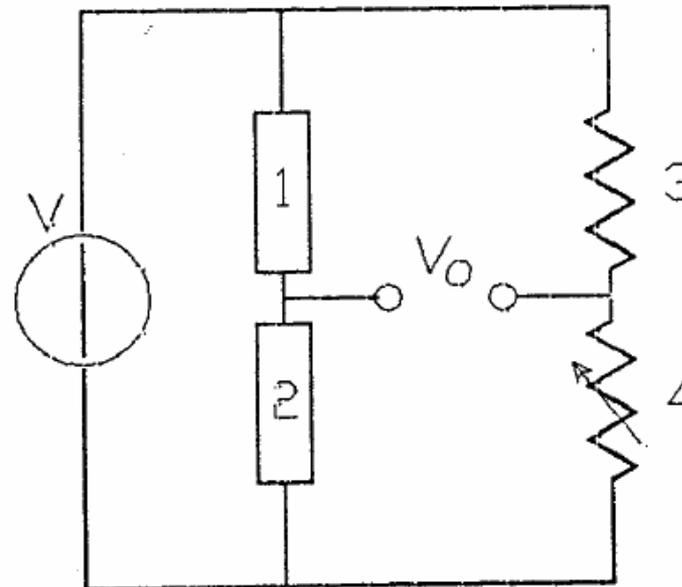
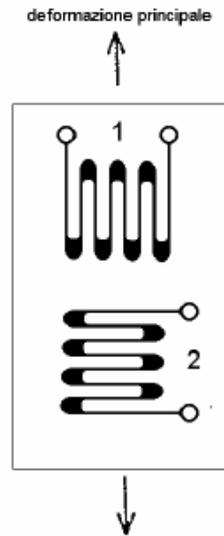
$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R}{2R} - \frac{R}{R + R + \Delta R} \right) = V_{ref} \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} \right) \approx V_{ref} \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

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

Estensimetri – circuiti di lettura

- Compensazione effetti temperatura

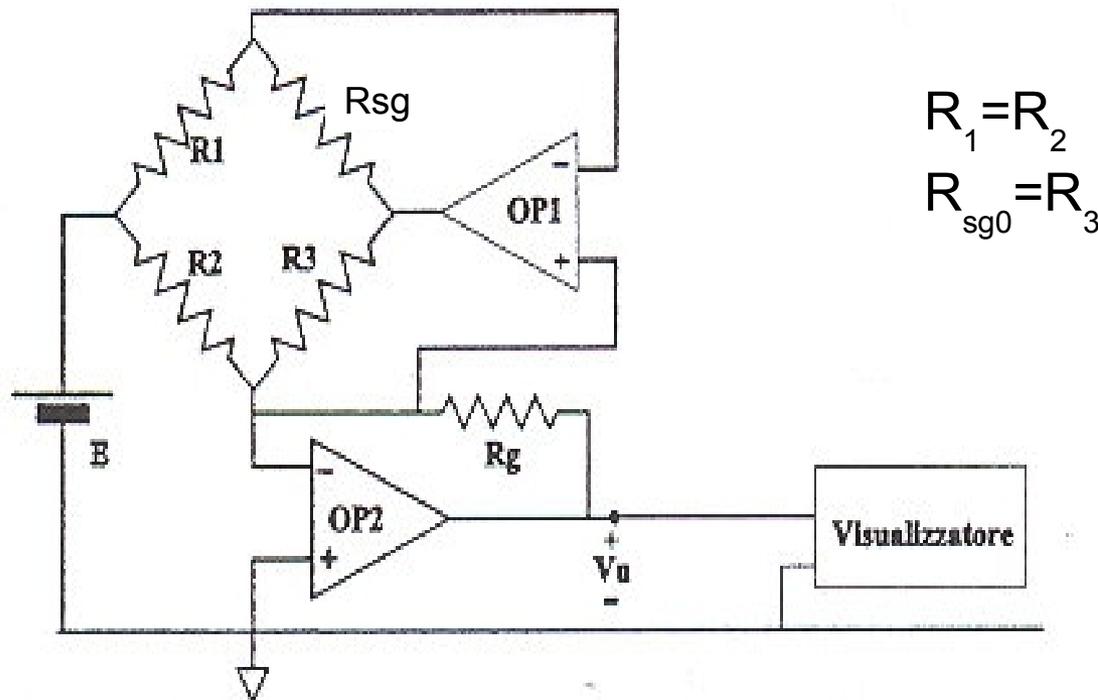
Il sensore 2
Non risente della
deformazione



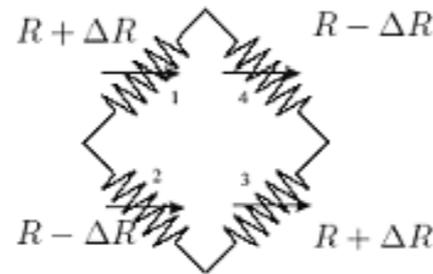
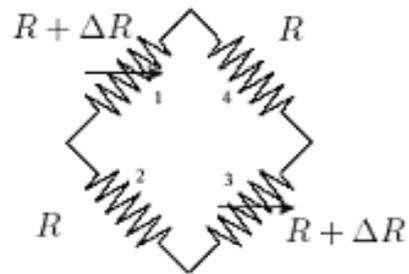
Dummy gage:

Stesso effetto termico, ma non risente della deformazione

Estensimetri – circuiti di lettura



Dummy gage e configurazioni



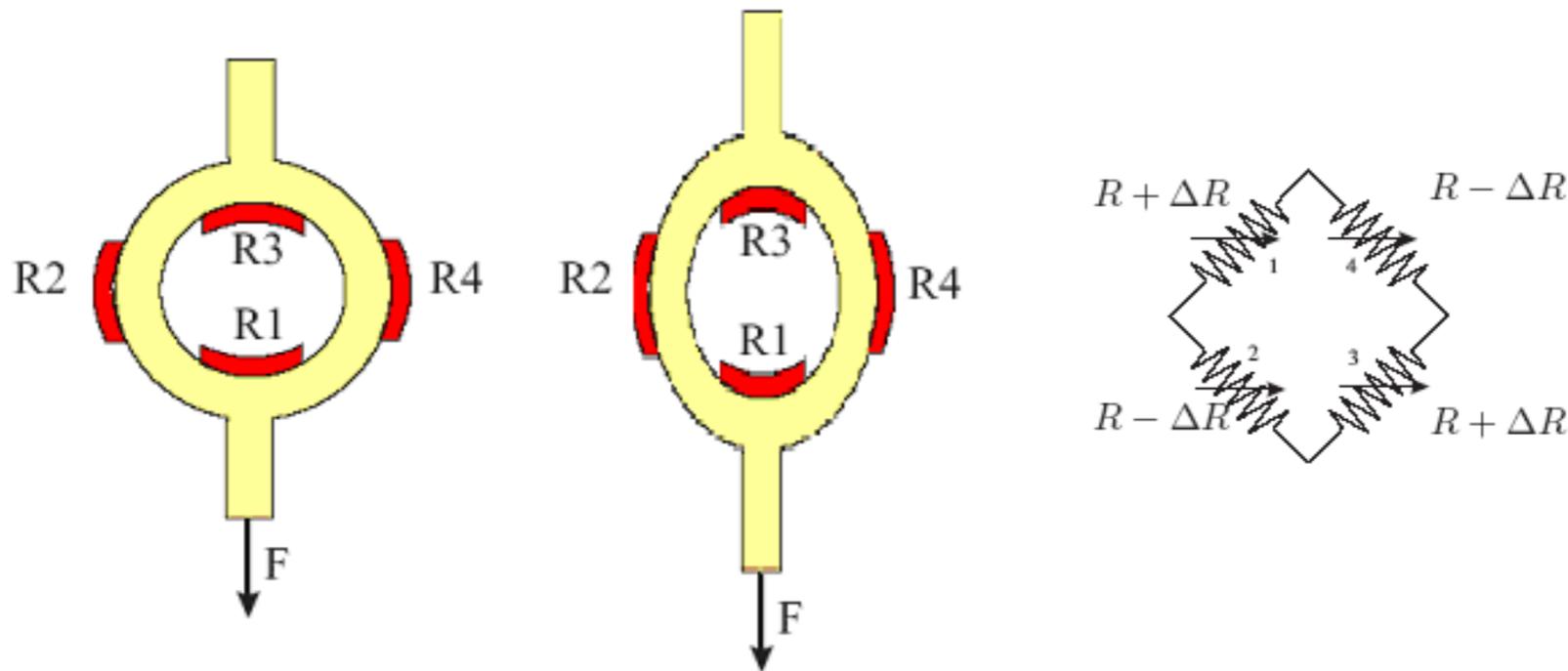
Per migliorare la precisione della misura usano estensimetri non deformati come resistenze di riferimento del ponte, meglio se provenienti dallo stesso lotto di fabbricazione.

E' possibile aumentare la sensibilità della misura, piazzando gli estensimetri, in modo che siano deformati simmetricamente a coppie.

$$V_{out} \simeq V_{ref} \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

$$V_{out} = V_{ref} \frac{\Delta R}{R}$$

Applicazione: cella di carico



Per la misura della forza F : 4 estensimetri lungo l'anello, F provoca l'allungamento di $R2$, $R4$ e una compressione di $R1$, $R3$

Massima variazione a seguito dell'applicazione del carico e minimo effetto della variazione di temperatura

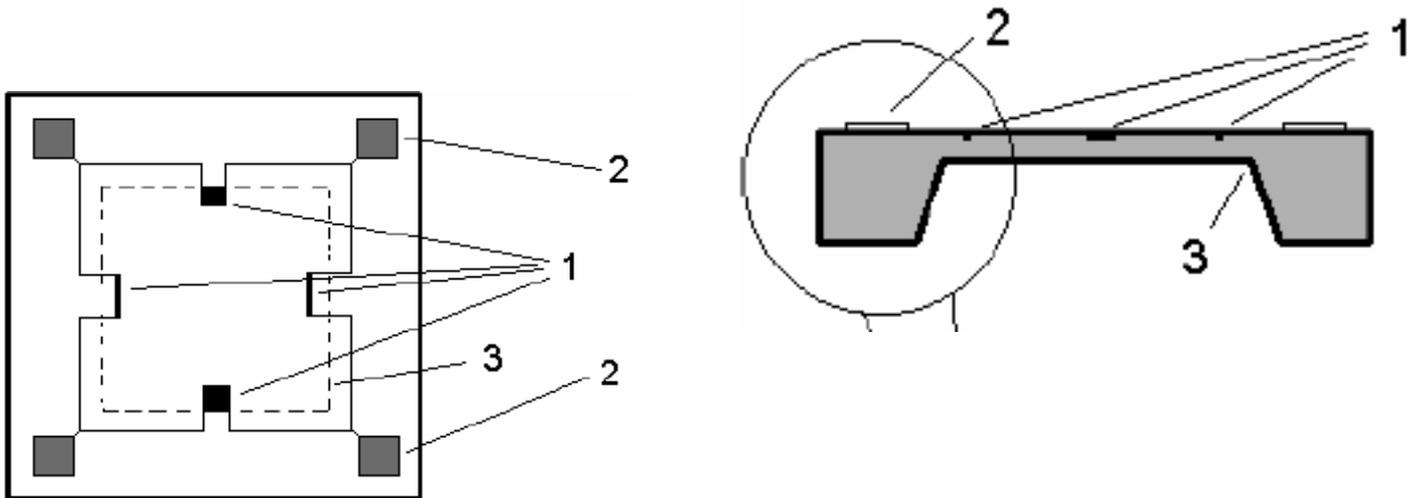
Estensimetri - applicazioni biomediche

- 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 gauge 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 e 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.