



Sensori Fisici

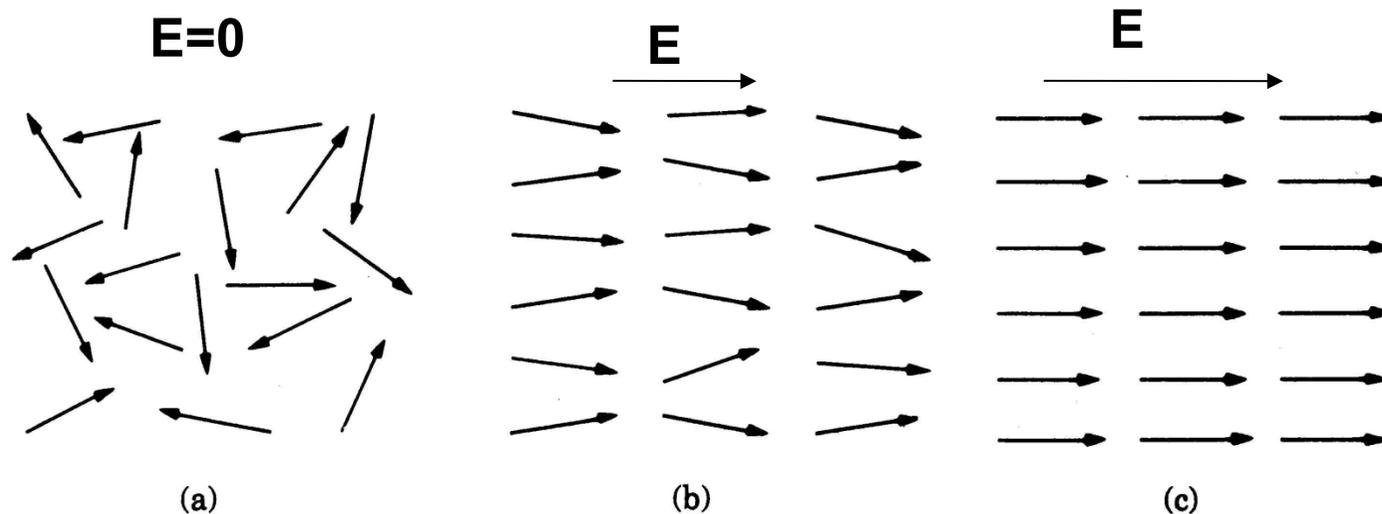
a.tognetti@centropiaggio.unipi.it

Polarizzazione materiali

- Si chiama momento di dipolo elettrico una grandezza vettoriale \mathbf{p} che ha direzione e verso dalla carica negativa a quella positiva e modulo $\mathbf{p} = q \mathbf{d}$
 - Unità di misura Coulomb*m

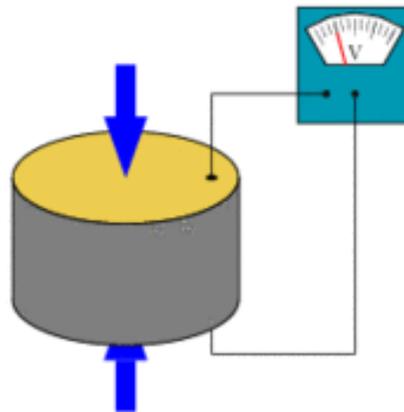


- Polarizzazione (\mathbf{Pv}) del materiale momento di dipolo \mathbf{P} per unità di volume
 - $\mathbf{Pv} = \Sigma \mathbf{p}$
 - Unità di misura: Coulomb/m²
 - $\mathbf{E}=0 \rightarrow \mathbf{Pv} = 0$



Trasduttori piezoelettrici

- Forza, accelerazione
- Effetto piezoelettrico
 - Alcuni cristalli o materiali ceramici hanno una polarizzazione spontanea.
 - $\mathbf{Pv} \neq 0$ con $\mathbf{E} = 0$
 - Se si deforma opportunamente la struttura cristallina si provoca una variazione della polarizzazione, le cariche esterne sulle superfici si modificano e quindi varia la differenza di potenziale.
 - Processo inverso: applicando dall'esterno una differenza di potenziale tra le due superfici, si ha una deformazione del materiale (dovuta a una forza che agisce sui dipoli elettrici). Il materiale può essere stirato, compresso o fatto vibrare.

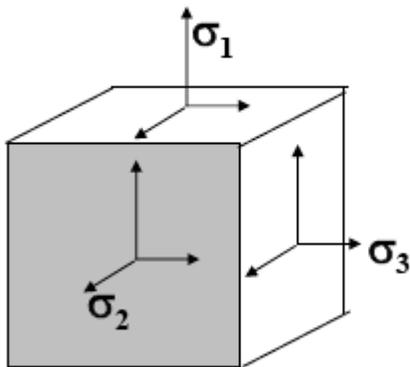


Trasduttori piezoelettrici

- Fenomeno non isotropo
 - Comportamento elettro-meccanico diverso per diverse direzioni di sollecitazione. Per la descrizione matematica del fenomeno piezoelettrico si utilizza una terna di riferimento ortogonale generalmente coincidente con gli assi di simmetria naturali del cristallo e si pone in relazione il vettore polarizzazione con gli sforzi a cui è soggetto il cristallo

Lo stato tensionale è descritto da nove componenti, tre componenti assiali ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) e sei componenti normali delle tensioni ($\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8, \sigma_9$).

Per motivi di simmetria le componenti si riducono a sei.



Le relazioni precedenti diventano:

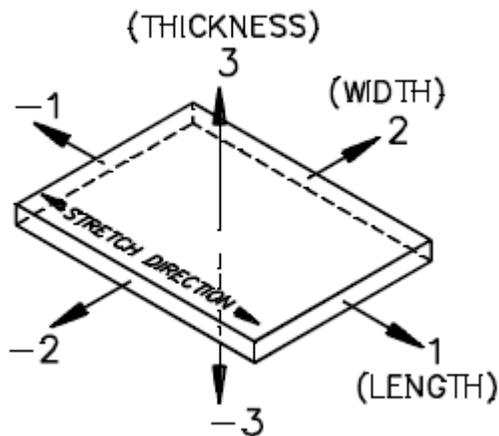
$$P_i = \sum_{j=1}^6 d_{ij} \sigma_j$$

Generazione di carica superficiale in relazione a uno stress meccanico applicato

quindi la matrice d_{ij} dovrebbe essere composta da 18 termini. In realtà nei materiali di interesse solo alcuni di questi termini sono diversi da zero.

Trasduttori piezoelettrici

- Sensore piezoelettrico
 - Applicazione di elettrodi al materiale piezoelettrico per misurare la carica generata
- Coefficienti piezoelettrici
 - Legano la generazione di carica alla deformazione causata da una forza esterna applicata
 - Variano con la posizione degli elettrodi e con la direzione della forza applicata
 - Forniti dal costruttore



d_{ij}
i asse “elettrico”
j asse “meccanico”

Esempio: **d31** elettrodi
disposti perpendicolarmente
alla direzione 3, forza
applicata lungo la direzione 1

Sensore a Film sottile:
coefficienti utili d31, d32, d33

Trasduttori piezoelettrici

Parameter	PZT4 [5]	PZT5A [5]	BaTiO ₃ [6]	PVDF [62]
d_{31} pC/N	-122	-171	-78	25
d_{32} pC/N	-122	-171	-78	2
d_{33} pC/N	285	374	190	-33
d_{15} pC/N	495	585	260	27

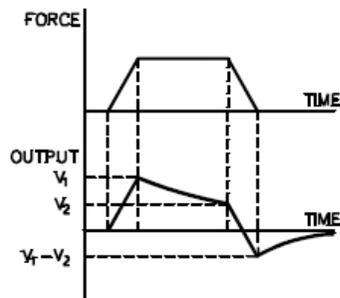
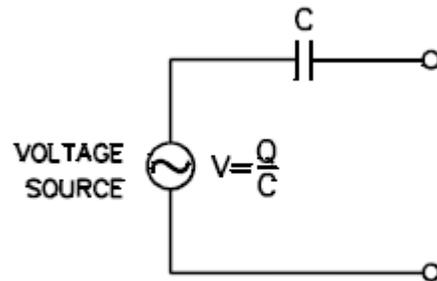
Trasduttori piezoelettrici

$$P = \frac{Q}{A} = d_{ij} \sigma_j \quad \text{Film sottile} \quad \longrightarrow \quad P = \frac{Q}{A} = d_{3j} \sigma_j$$

$$V = g_{ij} \sigma_j h \quad \text{Tensione a circuito aperto}$$

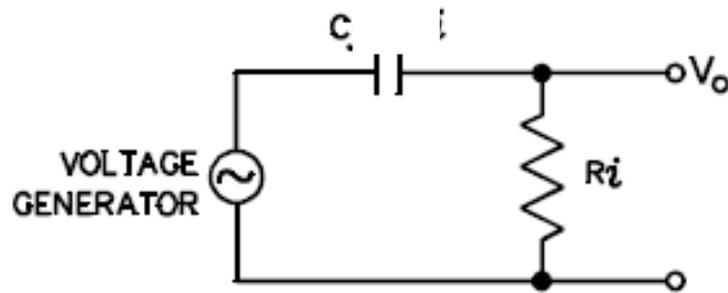
Conoscendo la dimensione del sensore abbiamo una diretta proporzionalità tra tensione e forza applicata

Circuito equivalente



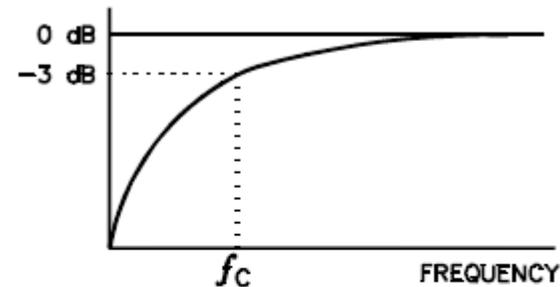
La componente continua della risposta è nulla. Utilizzabile solo per forze che variano nel tempo

Trasduttori piezoelettrici



Alta impedenza di uscita il segnale di ingresso viene attenuato (effetto di “loading”, più importante alle basse frequenze)

Il trasduttore si comporta come un filtro **passa alto**. La frequenza di taglio dipende dalla capacità del trasduttore e dall'impedenza di ingresso del circuito.



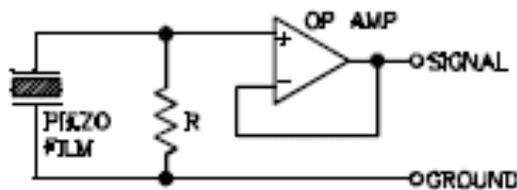
f_c = CUT-OFF FREQUENCY

$$= \frac{1}{2\pi \times \text{TIME CONSTANT}}$$

$$= \frac{1}{2\pi RC}$$

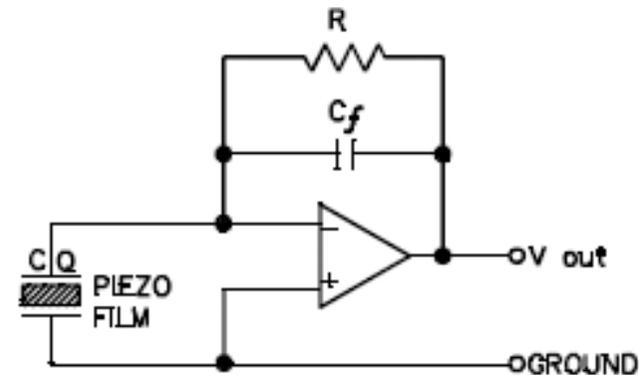
Trasduttori piezoelettrici

Circuiti di lettura



Buffer

Amplificatore carica



C_f = FEED BACK CAPACITANCE

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_f}$$

$$\text{VOLTAGE GAIN} = -\frac{Q}{C_f}$$

$$\text{TIME CONSTANT} = RC_f$$

$$\text{CUT-OFF FREQUENCY} = \frac{1}{2\pi RC_f}$$

Trasduttori piezoelettrici

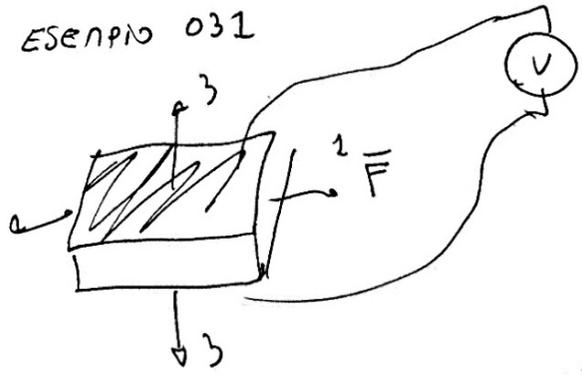
i.

▪ Applicazioni biomediche

- La semplicità dei dispositivi ed il basso costo dei materiali piezoelettrici li rendono ottimi candidati nella realizzazione di trasduttori di diversi fenomeni fisiologici. Alcuni cristalli piezoelettrici vengono utilizzati, infatti, in microfoni per misurare e registrare il battito cardiaco (fonocardiografi), oppure per rivelare i suoni associati al metodo occlusivo per misurare la pressione sistolica e diastolica (suoni di Korotkoff).
- Il campo di applicazione più ampio è quello degli accelerometri. Fondamentalmente gli accelerometri consistono di una massa collegata ad una faccia di un materiale piezoelettrico.
- E' da notare anche il fatto che i trasduttori ultrasonici per uso diagnostico sono tutti basati sull'uso di materiali piezoelettrici (sia effetto diretto che inverso)

Sensore piezoelettrico circuito equivalente

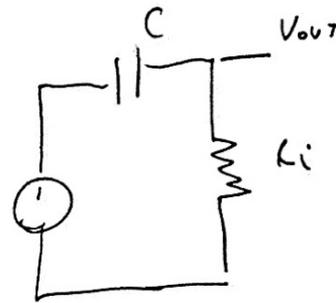
ESEMPIO 031



$Q = d_{31} \sigma_1 A$
 $V = \frac{Q}{C} = \frac{d_{31} \sigma_1 A}{C}$

CIRCUITO EQUIVALENTE

\Rightarrow



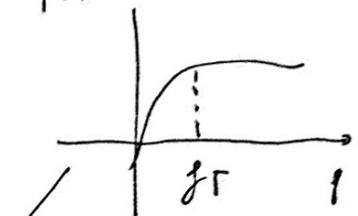
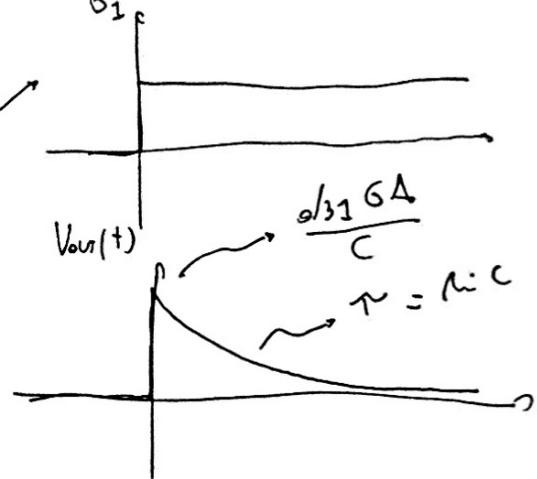
$V = \frac{Q}{C}$

$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V(s)} = \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{Cs}} = \frac{R_i Cs}{R_i Cs + 1}$

$f_r = \frac{1}{2\pi R_i C} \rightarrow$ DIPENDE DA OA C!

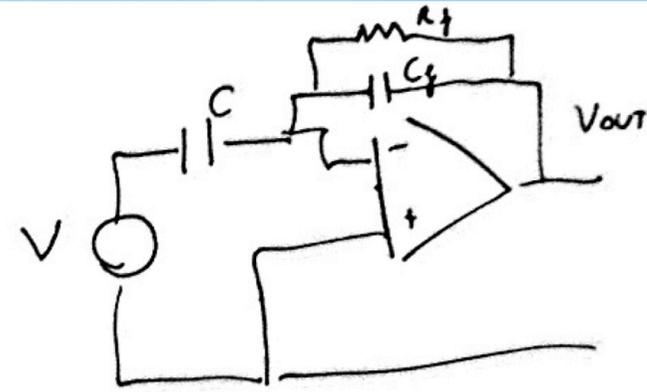
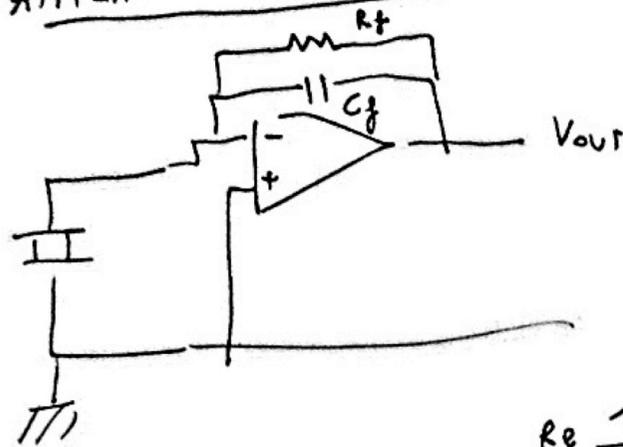
$\sigma_1 = \delta u(t)$

PASSO / ACTO!

Amplificatore di carica

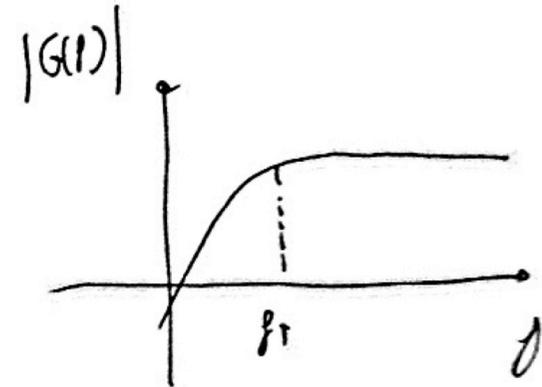
AMPLIFICATORE di CARICA



$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = - \frac{R_f \frac{1}{C_f s}}{R_f + \frac{1}{C_f s}} \cdot \frac{1}{C s}$$

$$= - \frac{R_f C s}{R_f C_f s + 1}$$

$$\theta_1 = \delta u(t)$$

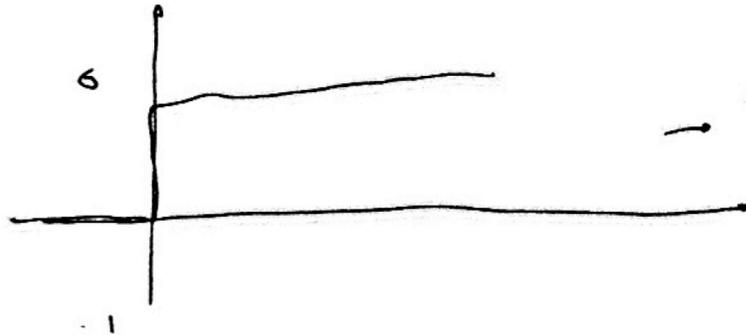


$$f_T = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \rightarrow \text{non dipende da } C!$$

-e

Amplificatore di carica

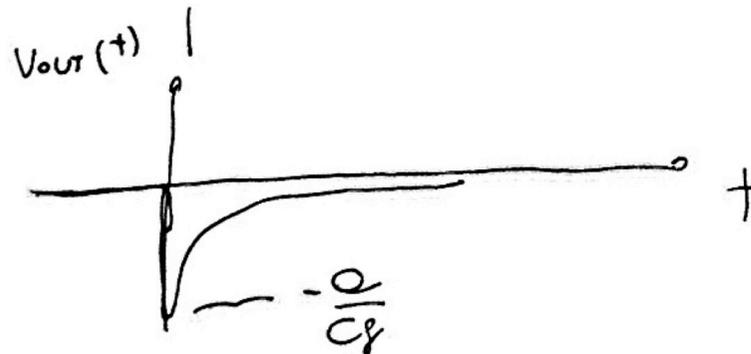
$$e_1 = \delta u(t)$$



$$V_{out}(s) = -\frac{R_f C_f s}{R_f C_f s + 1} \cdot \left(\frac{1}{C_f} \right) \cdot \left(\delta_{s1} 6A \right)$$

GAINING

$$= -\delta \frac{R_f}{R_f C_f s + 1} = -\frac{\delta}{C_f} \left(\frac{1}{s + \frac{1}{R_f C_f}} \right)$$



$$V_{out}(t) = -\frac{\delta}{C_f} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau = R_f C_f \rightarrow$ non viene $\infty T!$