



Accelerometri

Electronica dei Sistemi Analogici e Sensori
Corso di Laurea Magistrale Ingegneria Elettronica

Università di Firenze

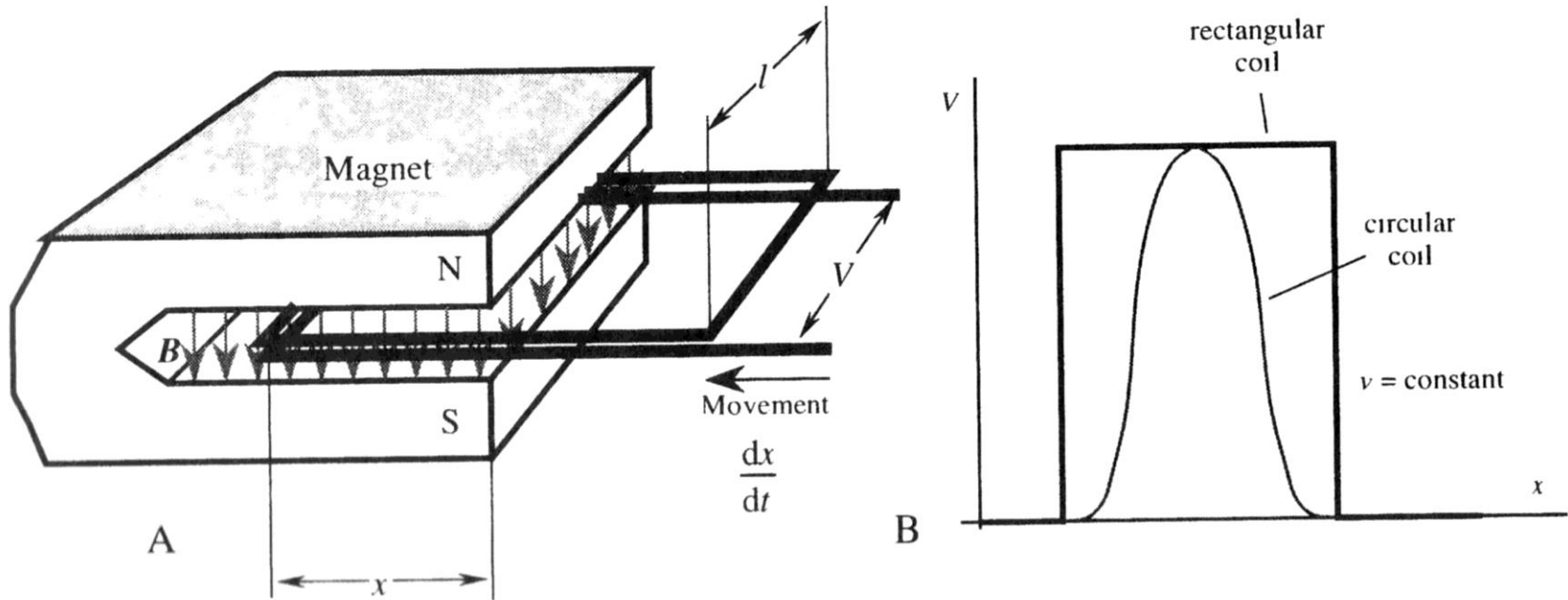
A.A. 2014-2015 – Prof. Ing. Lorenzo Capineri

Velocità e Accelerazione

L'accelerazione è una caratteristica dinamica associata ad un oggetto, dal momento che richiede l'applicazione di una forza. In effetti però spostamento, velocità e accelerazione sono tra loro correlate in quanto sono l'una la derivata temporale della precedente. In generale comunque operare misure mediante grandezze derivate, può nel caso di ambiente rumoroso provocare grossi errori di valutazione.

Per questo **sensori di velocità o accelerazione** non si basano su sensori di posizione o prossimità, le cui grandezze vengono poi derivate, ma su fenomeni fisici direttamente legati alla velocità o accelerazione.

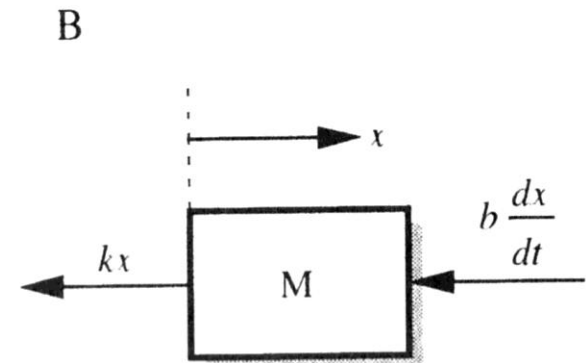
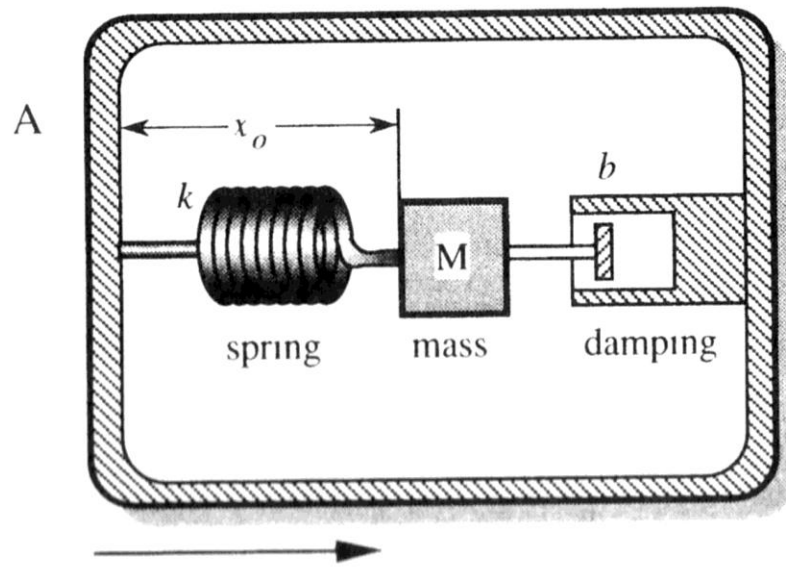
Sensore elettromagnetico di velocità



Legge di Faraday (rettangolo di lato attivo / immerso in un campo B):

$$V = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} = -N \frac{d}{dt} (Blx) = -NBl \frac{dx}{dt} = -NBlv$$

Accelerometro



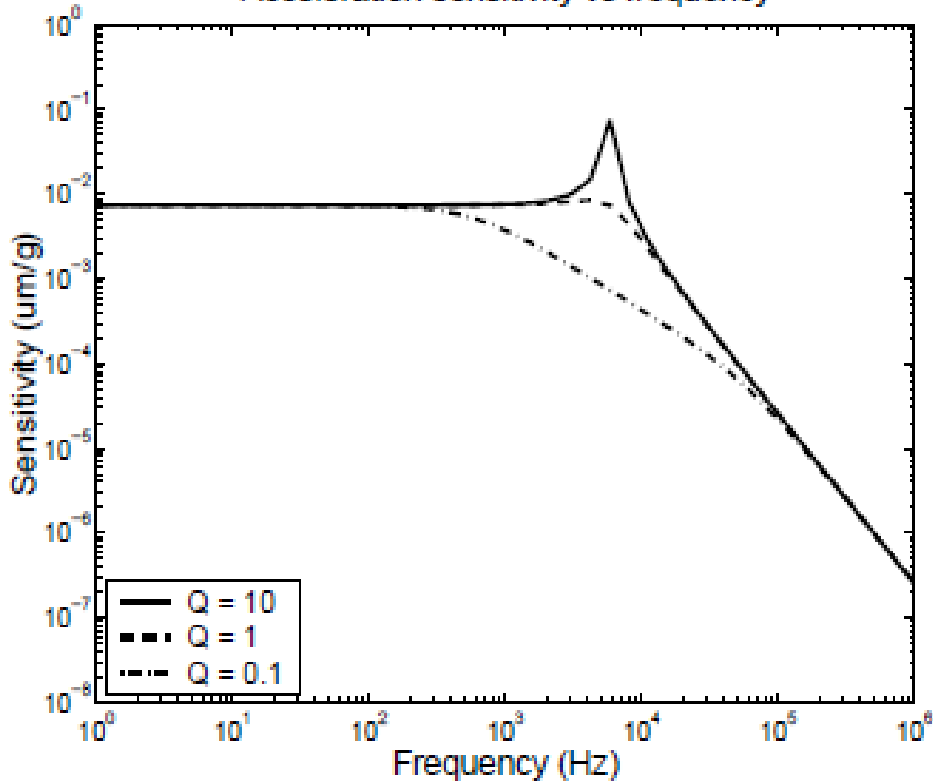
Modello 1D nel dominio di Laplace:

$$X(s) = \frac{-MA(s)}{Ms^2 + bs + k}$$

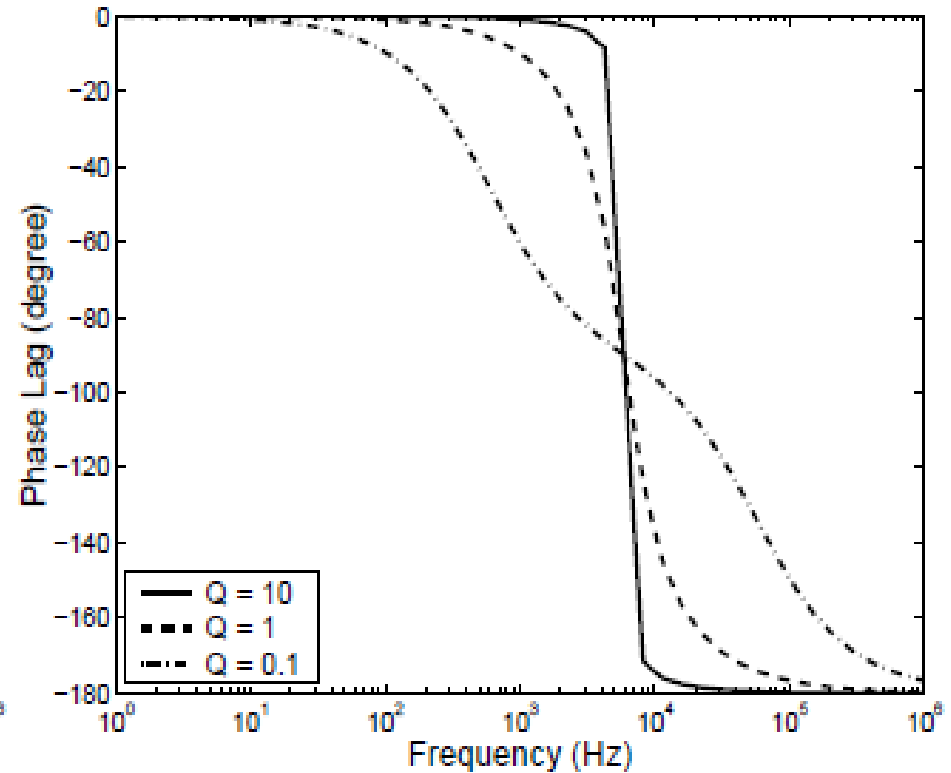
Dove: M indica la massa inerziale, k è la rigidità della molla, b il coefficiente di smorzamento del pistone, x l'entità dello spostamento della massa M

Risposta in frequenza

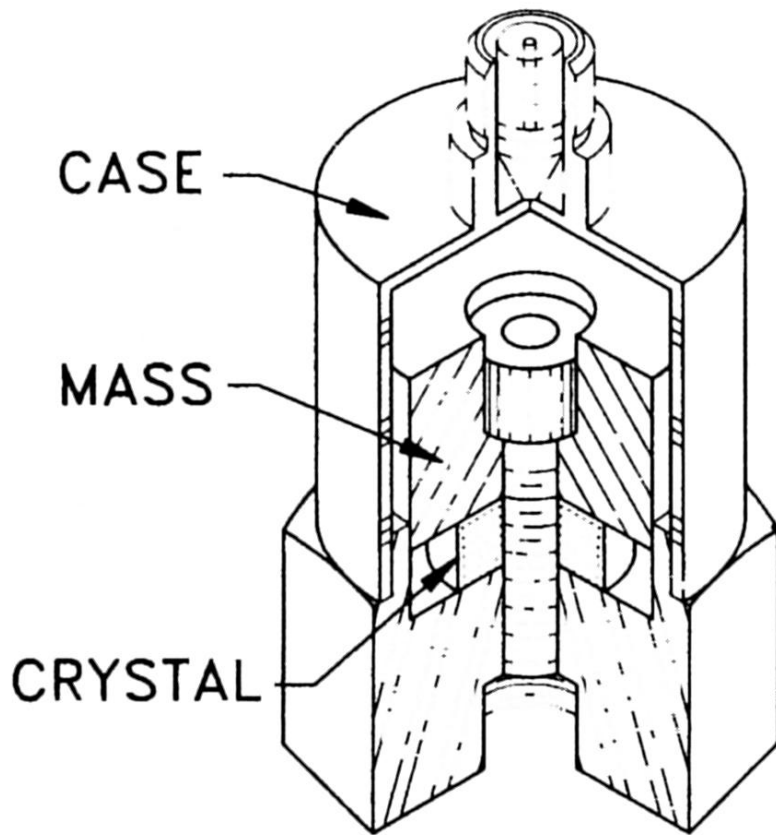
Acceleration sensitivity vs frequency



Displacement phase lag vs frequency



Accelerometro Piezoelettrico



Questo tipo di sensori operano da frequenze minime di 2Hz a valori dell'ordine dei 5kHz, sono altamente lineari, operano in intervalli estesi di temperatura (fino a 120°) e presentano un'alta reiezione ai disturbi. I materiali piezoelettrici più comuni per questo tipo di applicazioni sono quelli di tipo ceramico, come il titanato di bario o il titanato zirconato di piombo (PZT). In sensori miniaturizzati vengono implementate strutture basate sul silicio; essendo però questo materiale sprovvisto di proprietà piezoelettriche, viene depositato un sottilissimo strato piezoelettrico tra le deposizioni successive di silicio.

Accelerometri Capacitivi con tecnologia MEMS

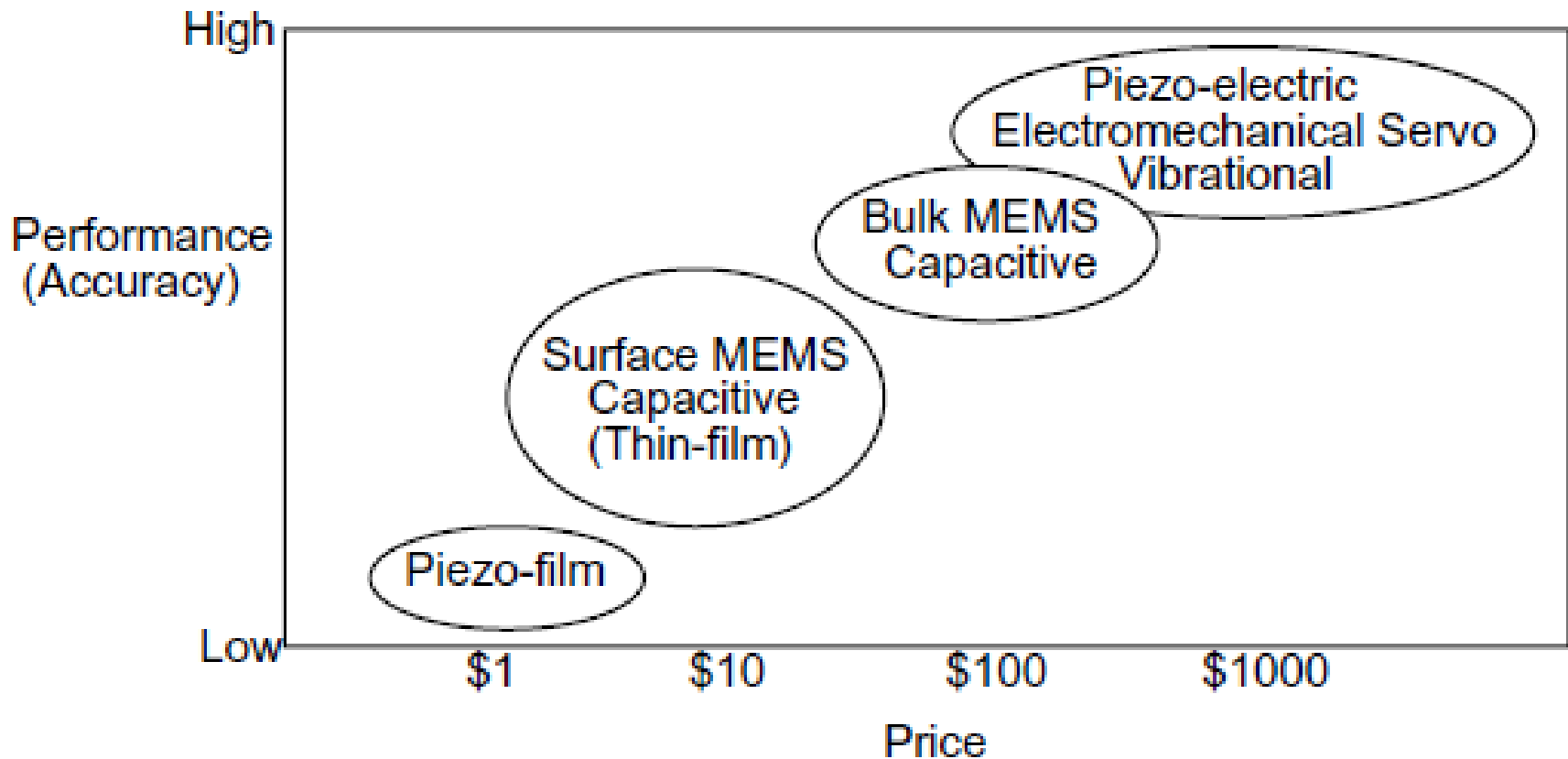
Motivazione dell'uso di tecnologie MEMS: ridurre le dimensioni e abbattere i costi.

Il primo accelerometro realizzato con tecniche di micromachining alla Stanford University nel 1979.

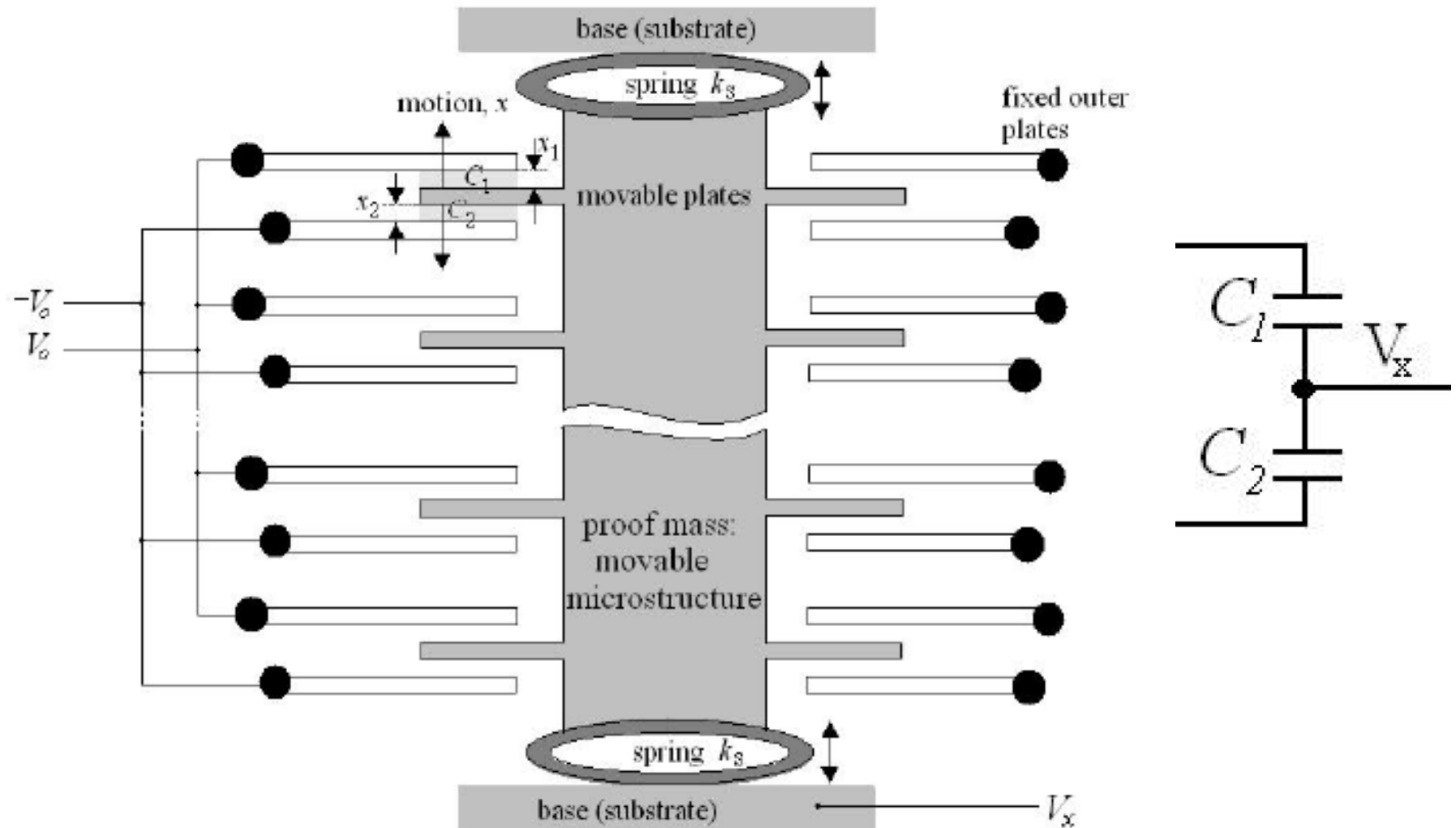
Dopo 15 anni la tecnologia divenne matura per realizzare prodotti commerciali su larga scala. Negli anni '90 gli accelerometri MEMS hanno rivoluzionato la sicurezza nel settore dell'auto con i sistemi airbag.

Oggi il loro mercato è vasto: protezione hard-disk rivelatori di cadute per disabili, monitoraggio movimento corpo umano (settore medicale, intrattenimento), microsismica etc..

Confronto Prestazioni/Costo



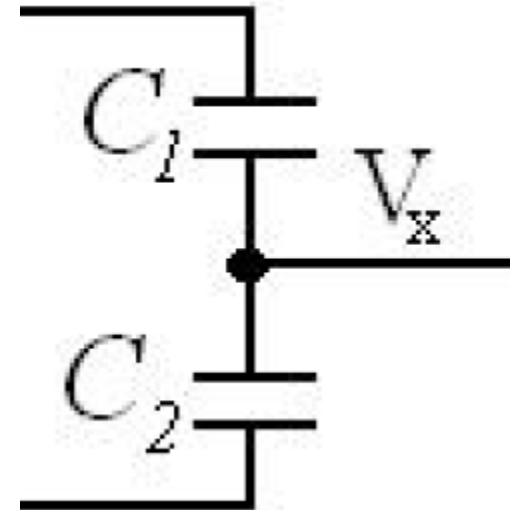
Accelerometro capacitivo MEMS



Equazioni costitutive

$$C_1 = \epsilon_A \frac{1}{x_1} = \epsilon_A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C$$

$$C_2 = \epsilon_A \frac{1}{x_2} = \epsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C$$



Per accelerazione = 0 le due capacità risultano uguali a C_0 essendo $x_1 = x_2 = d$

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_A \frac{1}{d}$$

Dove: ϵ cost. dielettrica rel. Materiale dell'accelerometro, d distanza a riposo, A area (trascurando effetti di bordo del campo elettrico). Def.: $\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon A$

Risposta dell'accelerometro MEMS

Per valori di $x \neq 0$ la differenza di capacità ΔC vale:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2}$$

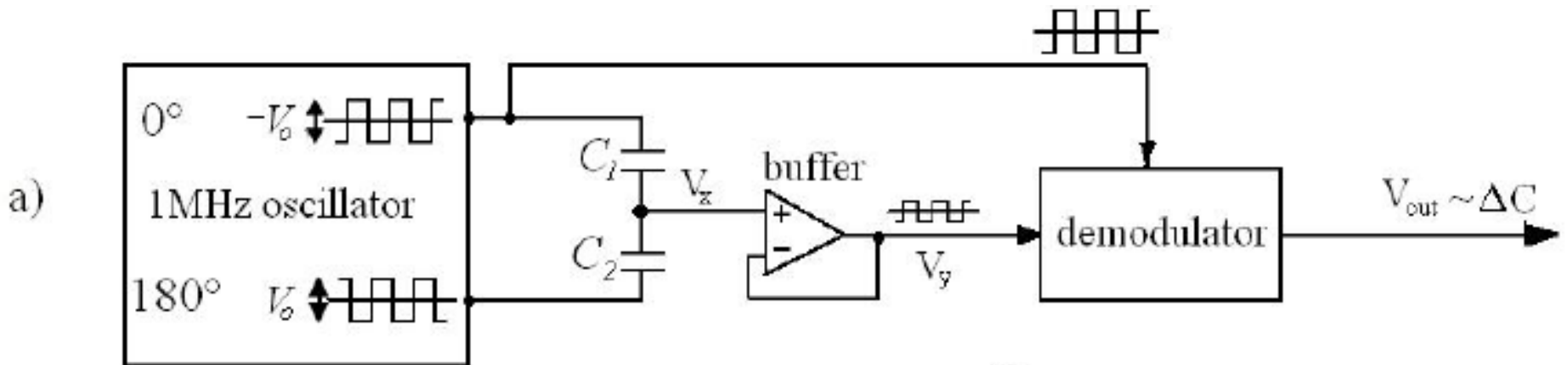
Si risolve la seguente equazione del secondo ordine per x :

$$\Delta C x^2 + \epsilon_A x - \Delta C d^2 = 0$$

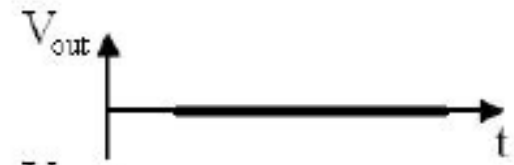
Assumendo piccoli spostamenti si può trascurare il termine $\Delta C x^2$:

$$x \approx \frac{d^2}{\epsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0}$$

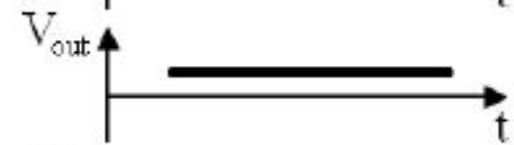
Circuito di interfaccia (ADXL05)



b) $a_1 = 0$



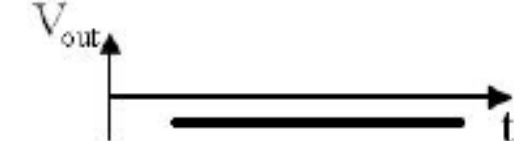
c) $a_1 > 0$



d) $a_2 > a_1 > 0$



e) $a_1 < 0$



Risposta del circuito

Per l'equilibrio delle correnti tra i due condensatori (Ingresso op. amp. con corrente trascurabile) risulta:

$$(V_x + V_0)C_1 + (V_x - V_0)C_2 = 0$$

Quindi l'uscita in tensione V_x risulta:

$$V_x = V_0 \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{x}{d} V_0$$

Si nota che l'uscita V_x ha il segno di x :

$V_x > 0$ se $a > 0$ e $V_x < 0$ se $a < 0$

Sensibilità

All'equilibrio per la seconda legge del moto vale:

$$ma = md^2x/dt^2 = k_S x$$

Da cui si ricava la relazione tra a ed x:

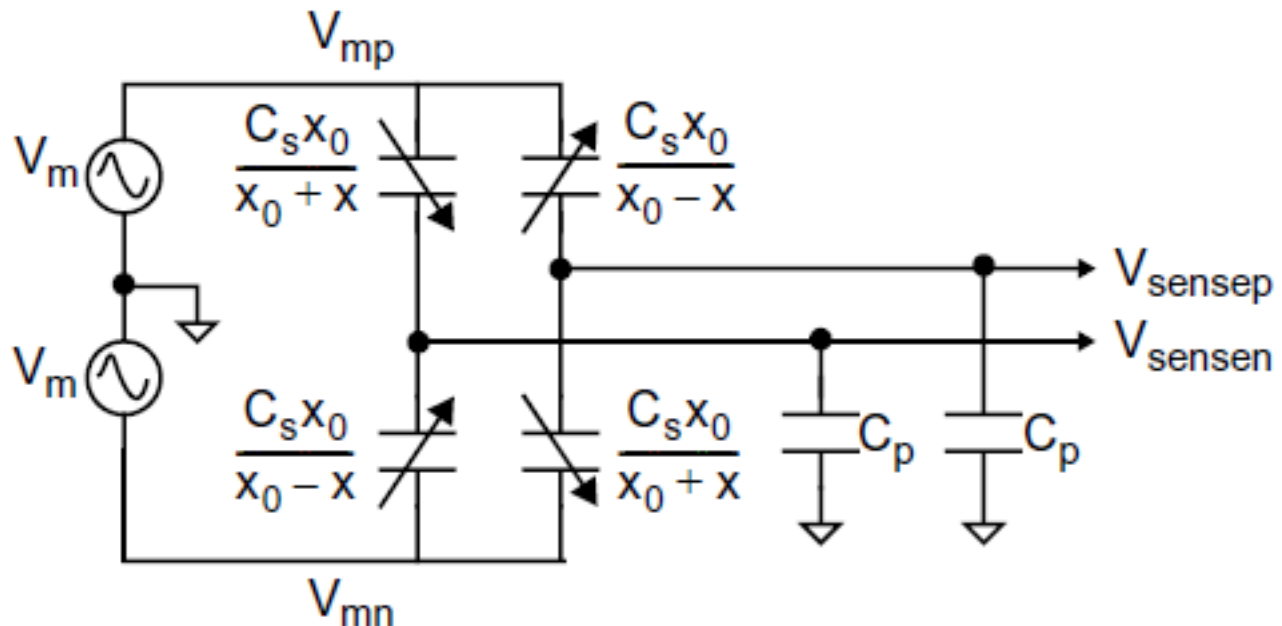
$$a = \frac{k_S}{m} x = \frac{k_S d}{m V_0} V_x$$

Valori tipici:

$m = 0.1 \mu\text{gr}$; $C_0 = 20 \text{ fF}$; $d = 1.3 \mu\text{m}$ \rightarrow $\Delta C = 0.4 \text{ fF}$

Configurazione differenziale

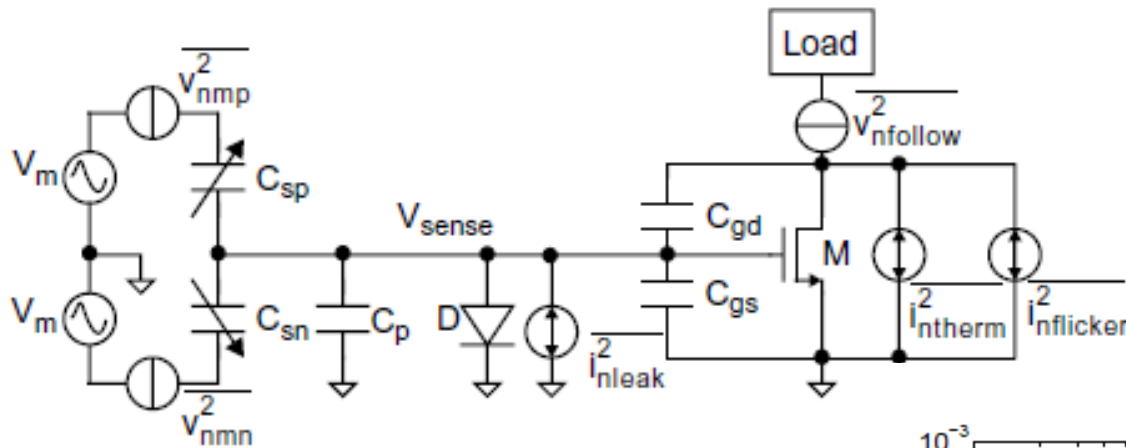
- Per ridurre la suscettibilità EMI si può ricorrere alla struttura a ponte con uscita differenziale.
- Si raddoppia la sensibilità ma si introducono anche segnali spuri dovuti all'asimmetria introdotta dalle tolleranze della lavorazione micromeccanica.



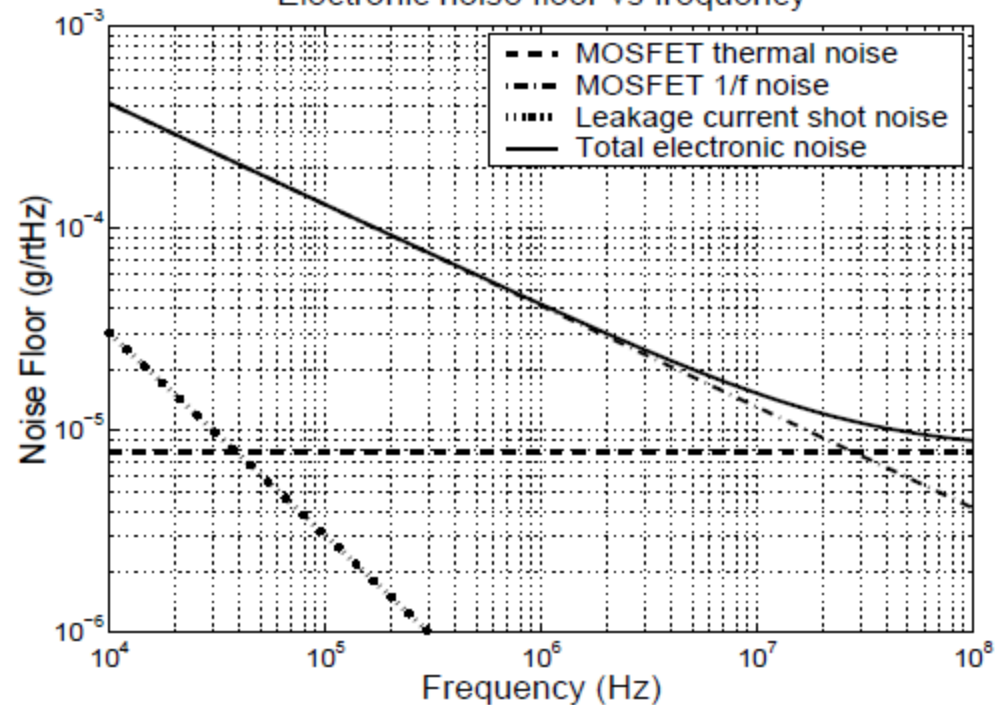
Valutazione delle tecnologie elettroniche per interfaccia MEMS

- Considerando $C_0 = 20\text{fF}$, alla frequenza di 1MHz l'impedenza corrispondente risulta 10M Ω .
- Di conseguenza le tecnologie più adatte per garantire una elevata impedenza di ingresso sono quelle FET e CMOS.
- Per queste tecnologie il rumore $1/f$ dei semiconduttori è elevato e limita la sensibilità degli accelerometri.
- In alternativa si possono utilizzare amplificatori *chopper*.
- Altre fonti di rumore sono quelle dovute alle vibrazioni meccaniche delle molle.
- Quindi si cerca di limitare la banda del segnale di uscita al valore strettamente necessario (filtri coerenti o non).

Rumore intrinseco



Electronic noise floor vs frequency



Valori tipici di un accelerometro MEMS commerciale Freescale MMA7260

Alimentazione	Assi	Sensibilità	Banda	Dinamica	Densità Spettrale rumore
2.2-3.6 V (portable electronics battery compatible)	X,Y	800 mV/g	0-350 Hz	±1.5g	350µg/√Hz
0.5mA	Z		0-150 Hz	±2g	
				±4g	
				±6g	

Bottom View



16 LEAD
QFN
CASE 1822-02