Ceramici piezoelettrici e loro applicazioni

maggio 2004

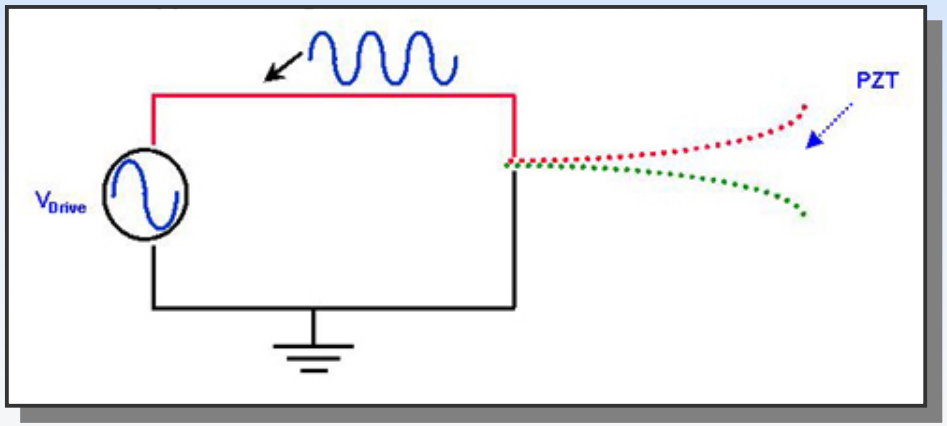
Ing. Francesca Lionetto

Piezoelettricità

Effetto piezoelettrico diretto:

l'applicazione di una forza o una vibrazione produce una tensione elettrica in uscita.

(*effetto piezogeneratore*)

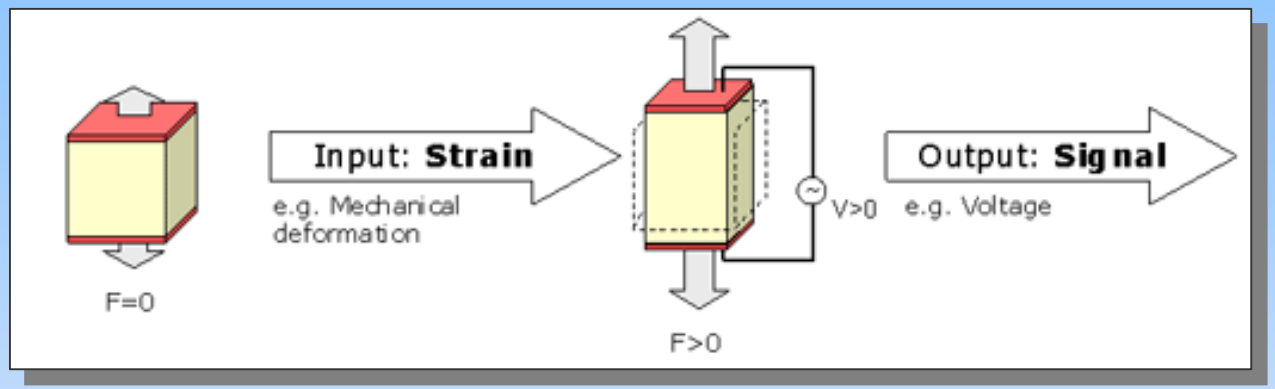


Effetto piezoelettrico inverso:

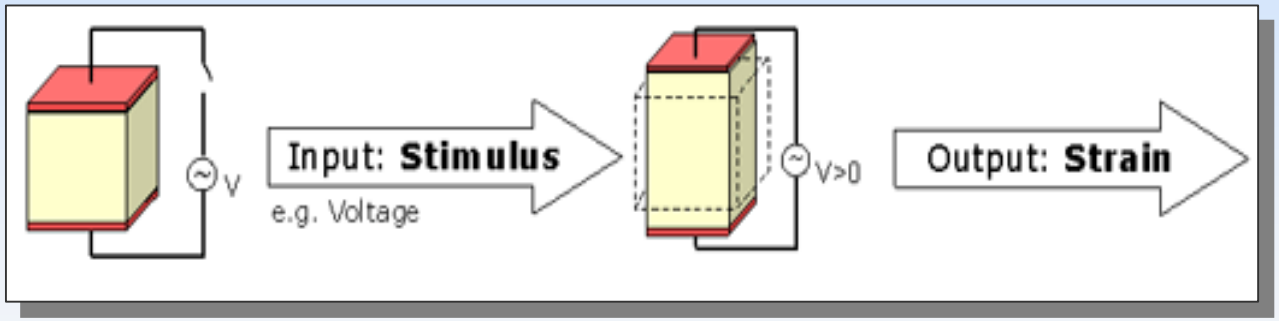
l'applicazione di una tensione elettrica produce in uscita una vibrazione o uno spostamento.

(*effetto piezomotore*)

Piezoelettricità



Effetto piezoelettrico diretto: un input meccanico (deformazione) produce un output di tensione elettrica. → **Sensori**



Effetto piezoelettrico inverso: un input elettrico (tensione elettrica) produce un output meccanico (deformazione). → **Attuatori**

Materiali piezoelettrici

La piezoelettricità si manifesta nei cristalli non dotati di centro di simmetria (21 classi cristallografiche) nei quali il momento di dipolo totale è diverso da zero.

<u>Materiali piezoelettrici naturali</u>: Quarzo, Tormalina, Sale Rochelle $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, Langasite ($La_3Ga_5SiO_{14}$), $Li_2B_4O_6$, ZnO;

<u>Materiali piezoelettrici dopo polarizzazione</u>:

Piezoceramici (policristallini): $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, PZT, $PbNb_2O_6$;

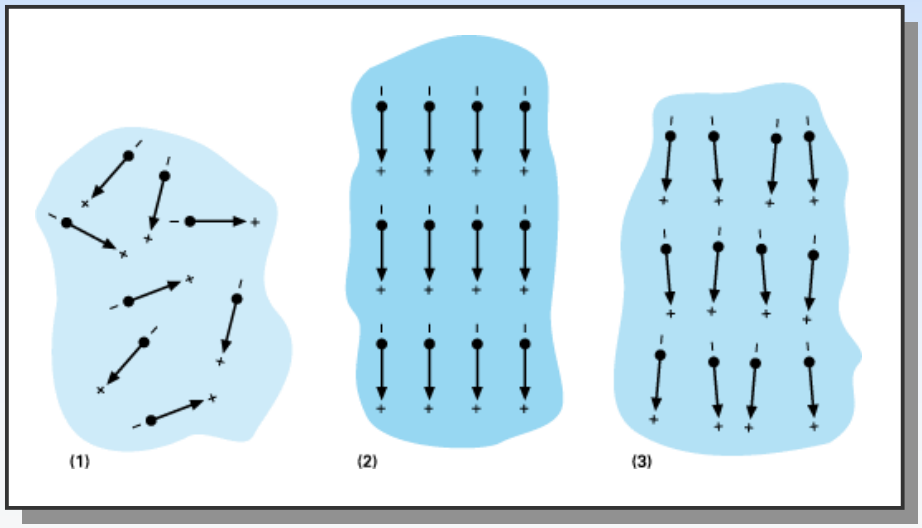
Piezocompositi (polimero-piezoceramico);

Piezopolimeri: PVDF, copolimeri di TrFE e TeFE.

Piezoceramici

Materiali policristallini costituiti da un gran numero di grani cristallini orientati casualmente.

Presentano effetto piezoelettrico solo dopo *polarizzazione*: applicazione di un elevato campo elettrico (1-4 kV/mm) che orienta i dipoli elettrici interni in un'unica direzione.



***Vantaggi dei piezoceramici*:**

- **elevata efficienza di trasformazione elettro-meccanica;**
- **buona lavorabilità;**
- **ampio range di forme ottenibili;**
- **produzione in serie.**

Limiti operativi

Depolarizzazione:

- forti campi elettrici in direzione opposta al campo polarizzante
- forti campi elettrici alternati
- forti stress meccanici
- temperature superiori al punto di Curie.

Temperatura di Curie:

temperatura alla quale si verifica una transizione di fase nella struttura cristallina tale da determinare la perdita delle proprietà piezoelettriche.

Invecchiamento:

decadimento delle proprietà piezoelettriche col tempo, man mano che ci si allontana dal momento in cui è avvenuta la polarizzazione.

Piroelettricità: variazione dello stato polarizzato interno con la temperatura.

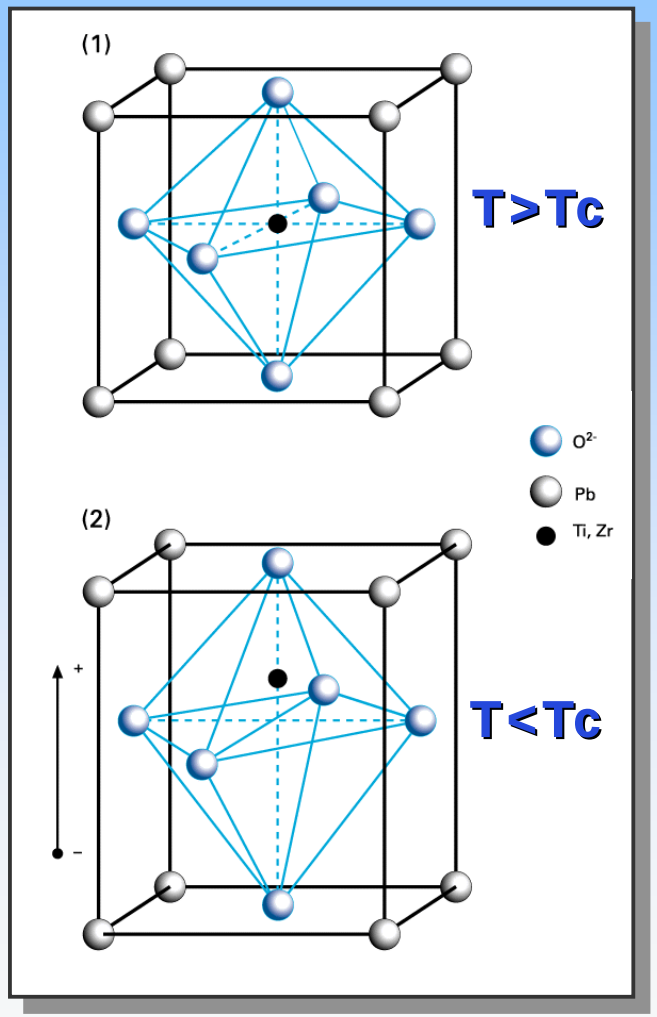
Struttura cristallina

Struttura cristallina <u>perovskite</u> (PZT, $BaTiO_3$, $PbTiO_3$)

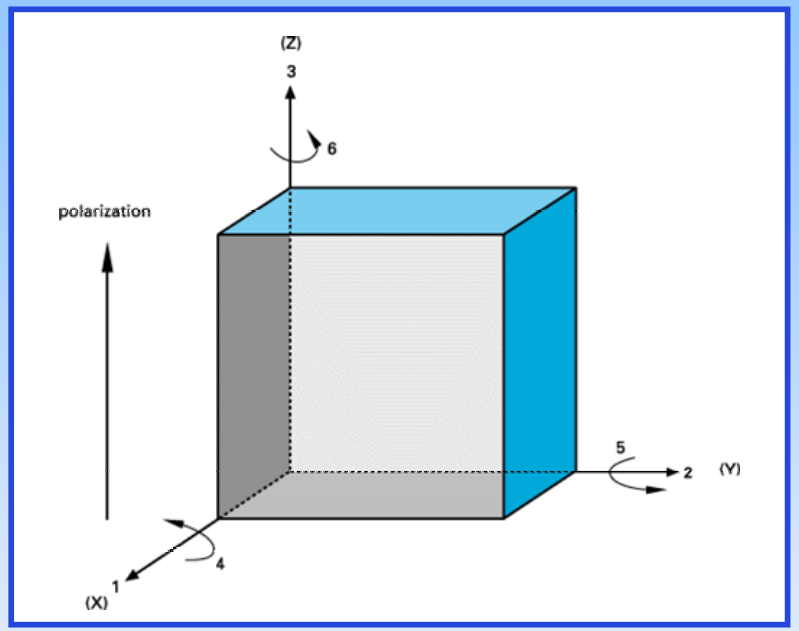
1) per $T>T_C$ la cella elementare ha una struttura cubica simmetrica (cristallo non piezoelettrico)

2) per $T<T_C$ la cella elementare ha una struttura tetragonale non simmetrica (cristallo piezoelettrico)

Spostamenti atomici di 0.1 Å.



Coefficienti piezoelettrici



pedice	asse
1	X
2	Y
3	Z
4	Rotazione intorno ad X
5	Rotazione intorno ad Y
6	Rotazione intorno ad Z

Per convenzione si considera l'asse 3 come la direzione di polarizzazione

d_{ij}, g_{ij}, k_{ij},

i = direzione elettrica

j = direzione meccanica

Coefficienti piezoelettrici

Coefficiente di deformazione o di carica

$$d = \frac{\text{deformazione} \cdot \text{sviluppata}}{\text{campo} \cdot \text{elettrico} \cdot \text{applicato}} \qquad \left[\frac{m}{V}\right]$$

$$d = \frac{\text{densità} \cdot \text{di} \cdot \text{carica} \cdot \text{di} \cdot \text{corto} \cdot \text{circuito}}{\text{stress} \cdot \text{meccanico} \cdot \text{applicato} \cdot \text{lungo} \cdot \text{una} \cdot \text{direzione}} \qquad \left[\frac{C/m^2}{N/m^2}\right]$$

Elevati d_{ij} sono richiesti nei trasduttori piezoelettrici

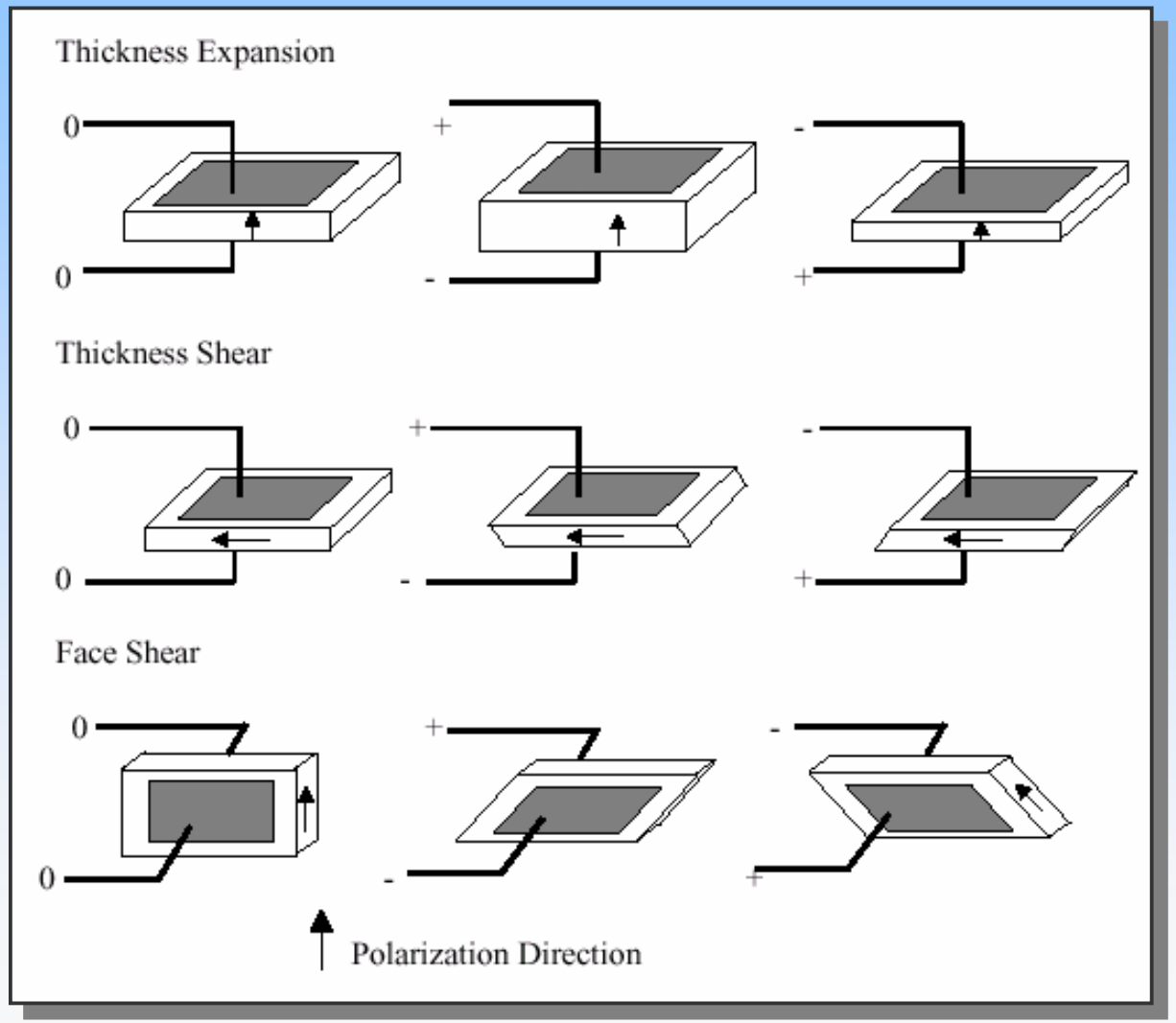
Coefficiente di tensione

$$g = \frac{\text{campo} \cdot \text{elettrico} \cdot \text{a} \cdot \text{circuito} \cdot \text{aperto}}{\text{stress} \cdot \text{meccanico} \cdot \text{applicato}} \qquad \left[V\frac{m}{N}\right]$$

$$g = \frac{\text{deformazione} \cdot \text{sviluppata} \cdot \text{lungo un asse}}{\text{densità} \cdot \text{di} \cdot \text{carica} \cdot \text{applicata}} \qquad \left[\frac{m^2}{C}\right]$$

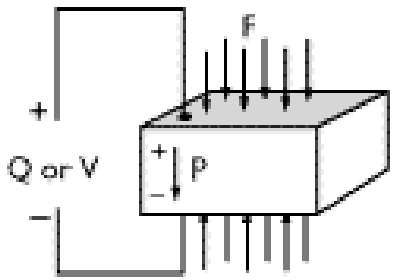
Elevati g_{ij} sono richiesti nei sensori piezoelettrici

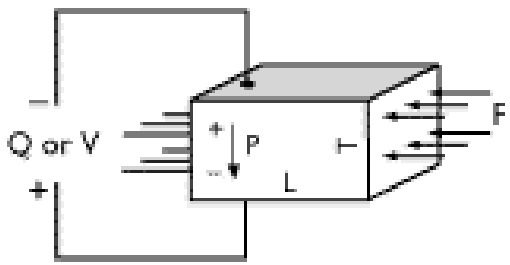
Modi di vibrazione

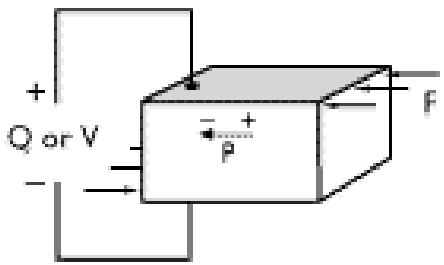


A seconda della direzione di sollecitazione meccanica o del campo elettrico rispetto alla direzione di polarizzazione, il piezoceramico può avere diversi modi di vibrare.

Coefficienti piezoelettrici







d_{33} **d_{31}** **d_{15}**

g_{33} **g_{31}** **g_{15}**

Coefficienti piezoelettrici

Coefficiente di accoppiamento elettromeccanico

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia} \cdot \text{meccanica} \cdot \text{convertita} \cdot \text{in} \cdot \text{energia} \cdot \text{elettrica} \cdot \text{accumulata} \cdot \text{nel} \cdot \text{cristallo}}{\text{Energia} \cdot \text{meccanica} \cdot \text{fornita} \cdot \text{in} \cdot \text{input}}}$$

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia} \cdot \text{elettrica} \cdot \text{convertita} \cdot \text{in} \cdot \text{energia} \cdot \text{meccanica} \cdot \text{accumulata} \cdot \text{nel} \cdot \text{cristallo}}{\text{Energia} \cdot \text{elettrica} \cdot \text{fornita} \cdot \text{in} \cdot \text{input}}}$$

Elevati k_{ij} sono richiesti negli attuatori piezoelettrici.

k_{ij} determina la larghezza di banda di filtri e trasduttori.

Range di valori: 0.14 ÷ 0.72.

Costante dielettrica relativa

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Elevate K_i sono desiderate per ottenere basse impedenze.

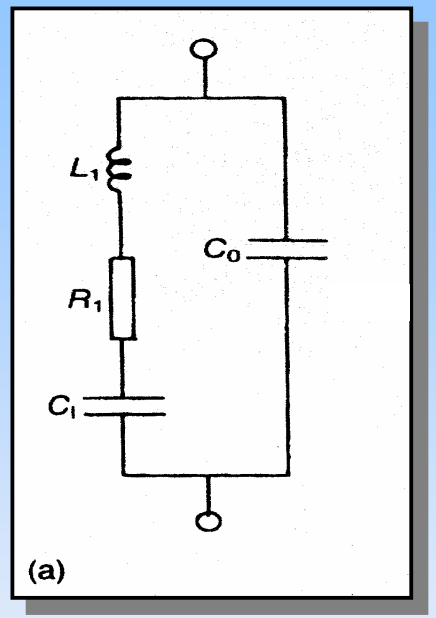
$$d_{ij} = K_i * \varepsilon_0 * g_{ij}$$

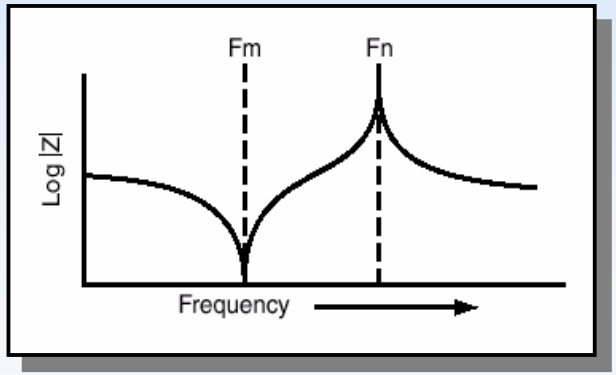
Circuito elettrico equivalente

Tale circuito è applicabile solo a frequenze vicine alla frequenza di risonanza del piezoceramico.

Diagramma dell'impedenza in funzione della frequenza: conoscendo le dimensioni, la massa, la capacità ed il fattore di dissipazione, si possono determinare tutte le proprietà del materiale.

Al variare della frequenza eccitatrice di un cristallo piezoelettrico si incontrano la frequenza di risonanza e di antirisonanza.





***<u>Frequenza di risonanza</u>*:**

frequenza alla quale l'impedenza del circuito equivalente è nulla.

Perdite nei dispositivi piezoelettrici

Fattore di merito Q_m:

rapporto tra reattanza e resistenza del circuito equivalente in serie

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r R_1 C_1}$$

Elevati Q_m sono richiesti per trasduttori con banda molto stretta.

Range di valori: $50 \div 10^6$

tan δ:

rapporto tra la potenza dissipata e quella reattiva

Il calore dissipato da un piezoelettrico è proporzionale a tan δ.

Analogie elettrico-meccaniche

UNITÀ ELETTRICHE		UNITÀ MECCANICHE	
e	Tensione [V]	**f**	Forza [N]
i	Corrente [A]	**v**	Velocità [m/s]
Q	Carica [C]	**s**	Spostamento [m]
C	Capacità [F]	$\mathbf{C_M}$	Compliance [m/N]
L	Induttanza [Henry]	**M**	Massa [kg]
Z	Impedenza	$\mathbf{Z_M}$	Impedenza meccanica
$i = \frac{dQ}{dt}$		$v = \frac{ds}{dt}$	
$e = L\frac{di}{dt} = L\frac{d^2Q}{dt^2}$		$f = M\frac{dv}{dt} = M\frac{d^2s}{dt^2}$	

Materiali piezoelettrici

Materiali piezoelettrici naturali: Quarzo, Tormalina, Sale Rochelle $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, Langasite ($La_3Ga_5SiO_{14}$), $Li_2B_4O_6$, ZnO;

Materiali piezoelettrici polarizzati:

- **Piezoceramici (policristallini): $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, PZT, $PbNb_2O_6$;**
- **Piezocompositi (polimero-piezoceramico) ;**
- **Piezopolimeri: PVDF, copolimeri di TrFE e TeFE.**

Direzioni guida nella ricerca di nuovi materiali piezoelettrici:

- **Elevata risoluzione (segnali di breve durata)**
- **Elevata conversione elettro-meccanica (elevata ampiezza di segnale)**
- **Buona stabilità a temperatura e umidità**
- **Buona lavorabilità**
- **Vasto assortimento di forme ottenibili**

Monocristalli

QUARZO (SiO_2)

T_c = 573 °C

Molto stabile con la temperatura però presenta bassi coefficienti elettromeccanici e piezoelettrici.

Applicazioni: accelerometri e risonatori ($Q_m=10^6$)

NIOBATO DI LITIO ($LiNbO_3$)

T_c= 1140 °C

Ottime proprietà piezoelettriche a T_{amb} ma non ad alta temperatura. Ottime proprietà elettro-ottiche

Applicazioni: filtri SAW

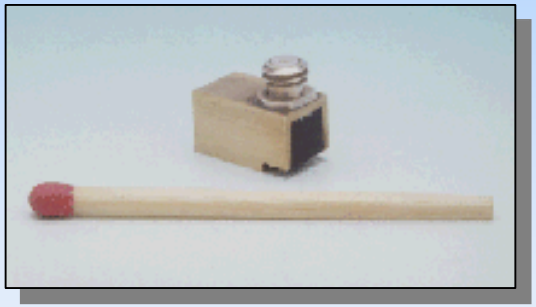
Ceramici piezoelettrici

Titanato di Bario ($BaTiO_3$) T_C = 130 °C

Struttura cristallina perovskite. Grande resistenza a depolarizzazione

Applicazioni: alte potenze acustiche (drogato con ioni CO^{3+})

Titanato di Piombo ($PbTiO_3$) T_C = 490 °C



Struttura cristallina perovskite; molto fragile; basso coefficiente kp

Applicazioni: sonde miniaturizzate

Metaniobato di Piombo ($PbNb_2O_6$) T_C = 570 °C

basso Q_m (larga banda), bassa impedenza acustica

Applicazioni: sonde per controlli non distruttivi, apparati di diagnostica medica, idrofoni per basse profondità.

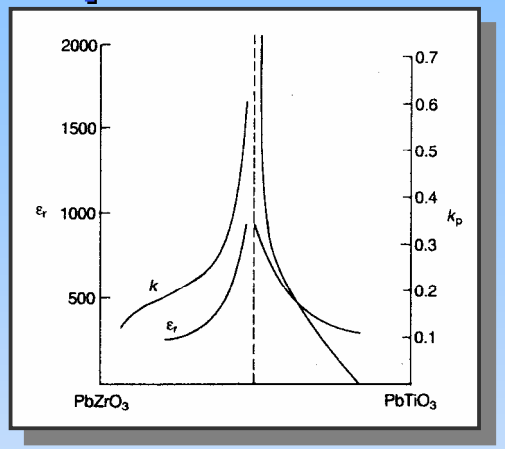
Ceramici piezoelettrici

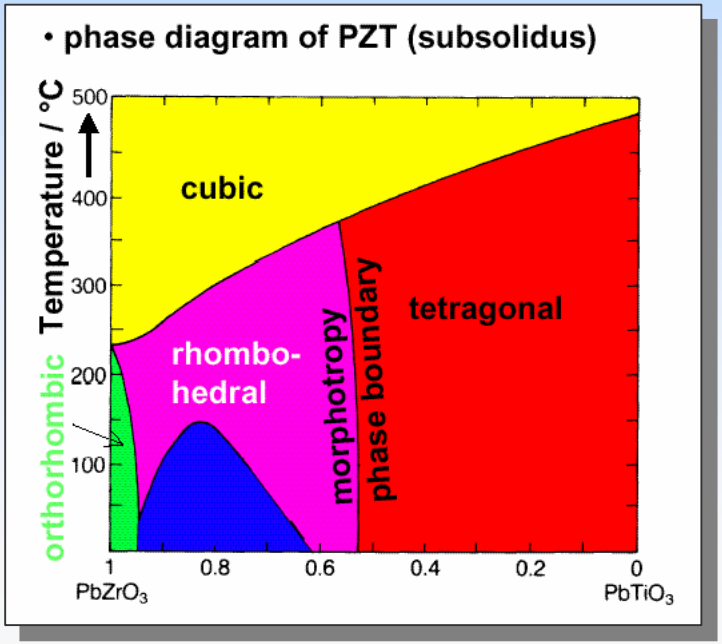
PZT, Titanato-Zirconato di Piombo

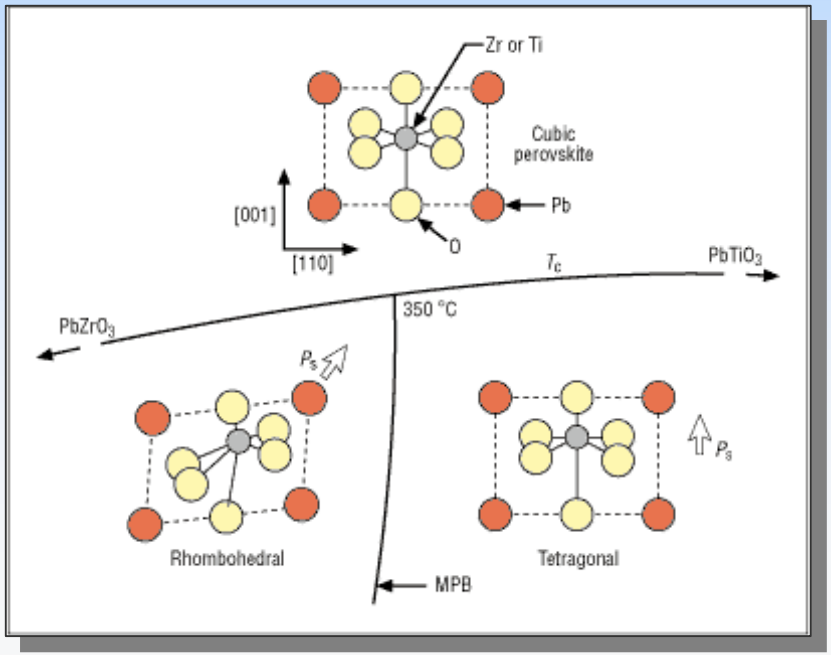
($PbTiO_3$*$PbZrO_3$) T_C = 220- 350 °C

Soluzione solida di PbTiO3 (52÷54%) e PbZrO3 (48÷46%)

Struttura cristallina perovskite







Ceramici piezoelettrici

Classificazione dei PZT

- **Hard PZT (PZT ad alta potenza)**

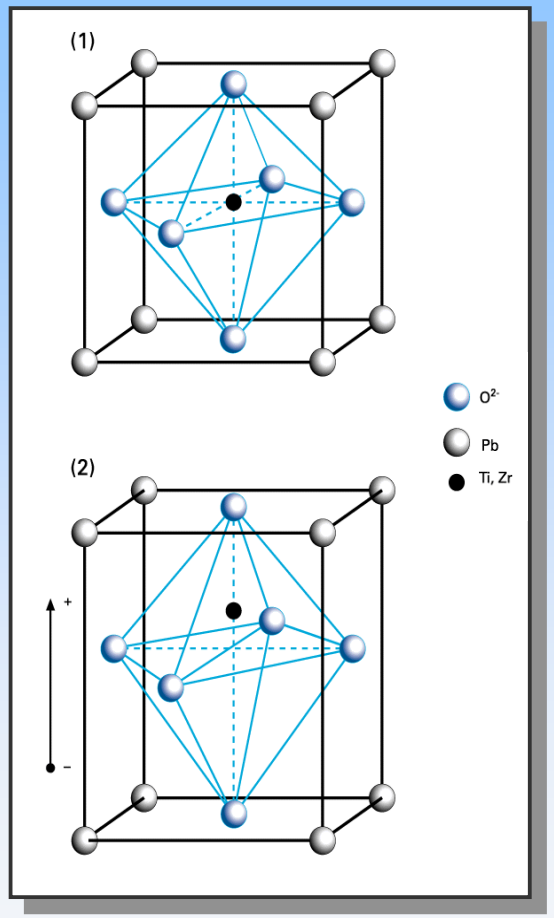
Bassa isteresi, alti Q_m, resistono ad alti carichi meccanici ed elettrici, invecchiano più lentamente.

Applicazioni: generatori e trasduttori ad elevata tensione elettrica o ad elevata potenza.

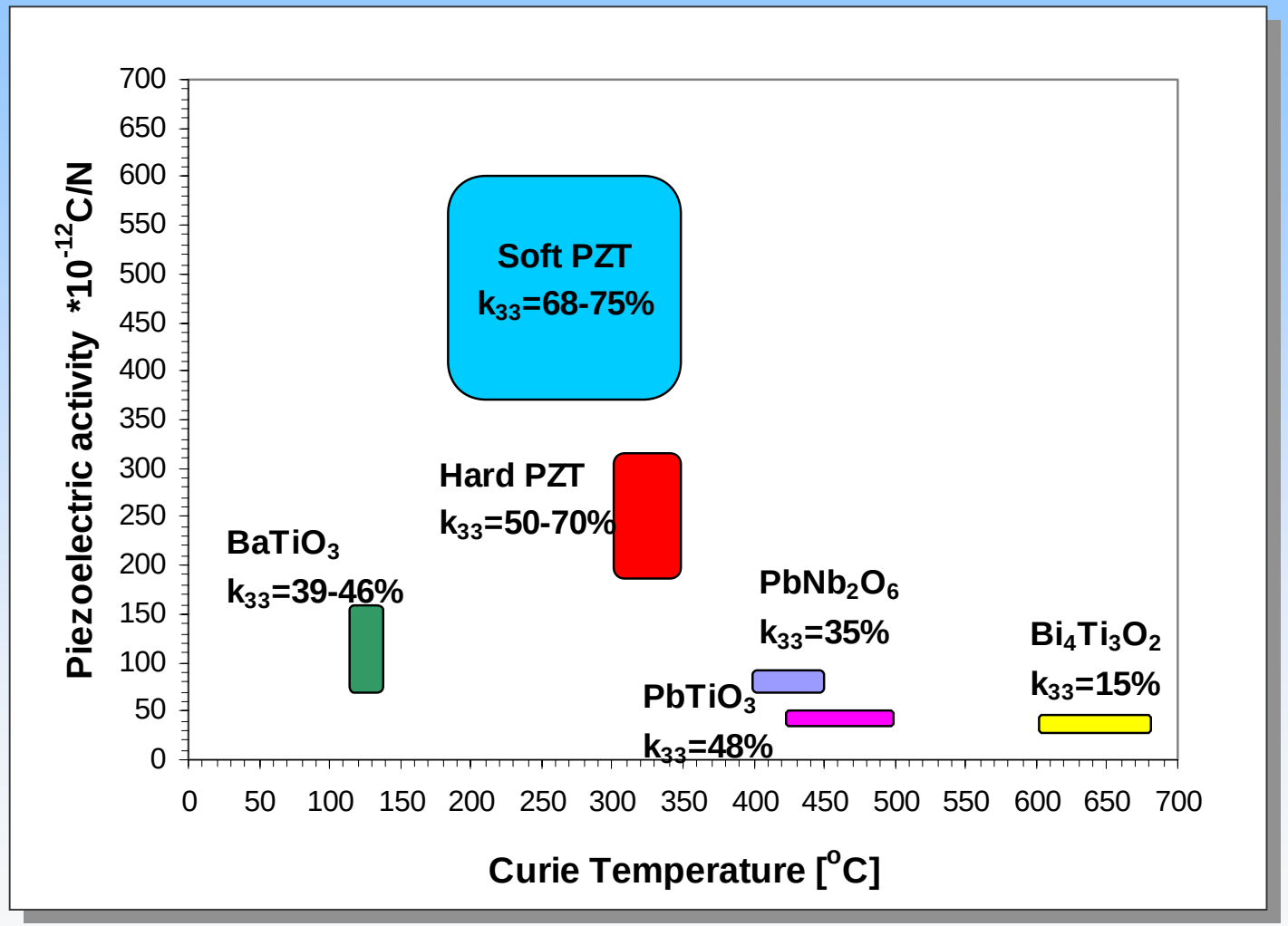
- **Soft PZT (PZT ad alta sensibilità)**

Grandi costanti dielettriche ma facile depolarizzazione e autoriscaldamento.

Applicazioni: sensori e trasduttori ad alta impedenza.



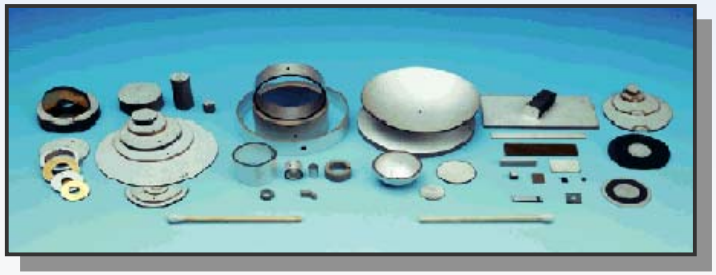
Proprietà piezoelettriche dei piezoceramici



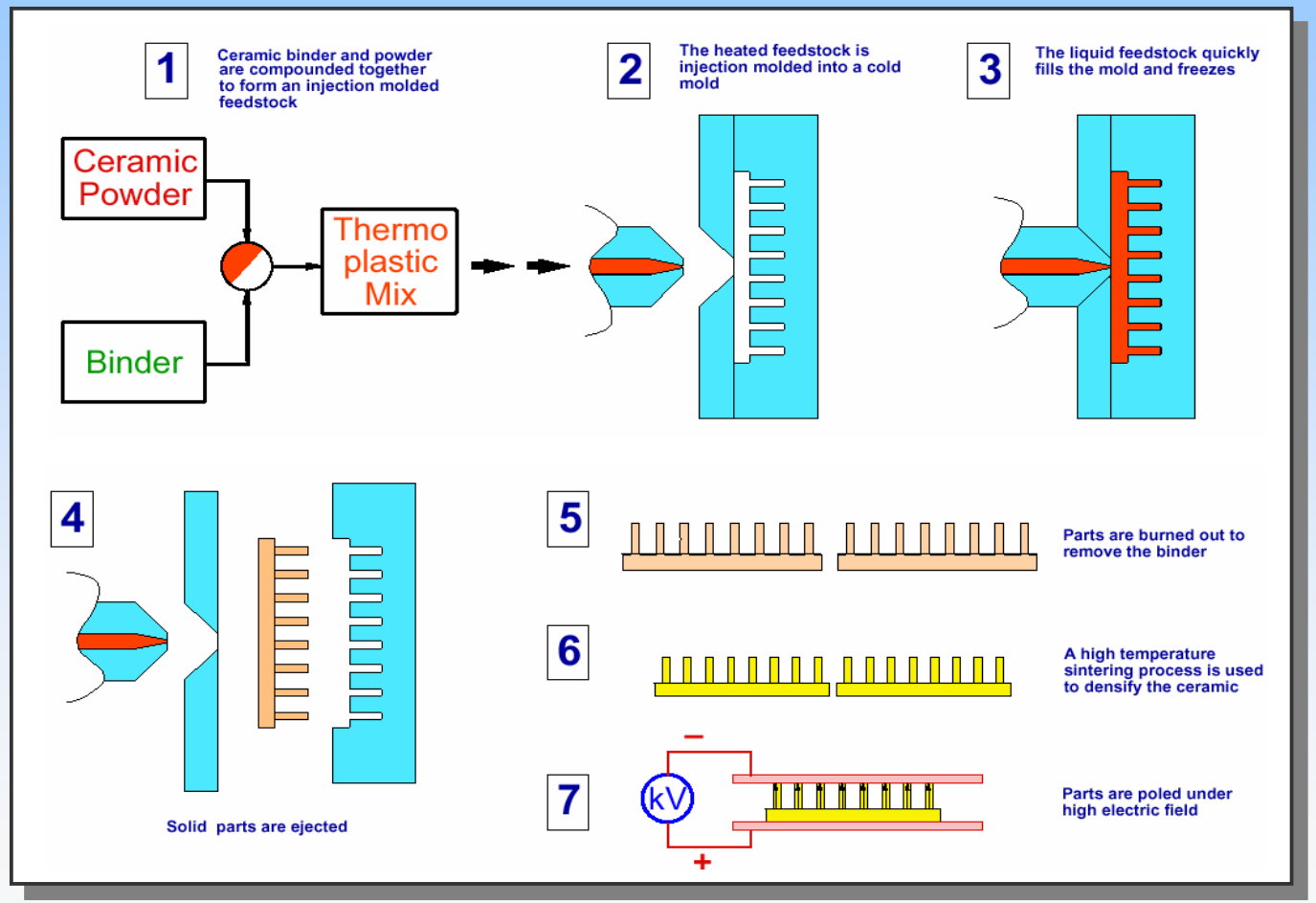
Ceramici piezoelettrici

Produzione dei PZT:

- Miscelazione
- Calcinazione (fino al 75% della T di sinterizzazione)
- Macinazione della polvere
- Spruzzatura e miscelazione con un legante
- Formatura e pressatura
- Prima combustione a 750 °C per eliminare il legante
- Sinterizzazione ad elevate T (1250-1350 °C)
- Taglio, lucidatura, lappatura
- Applicazione degli elettrodi (sputtering)
- Polarizzazione (campi elettrici di alcuni MV/m a 100-150 °C)



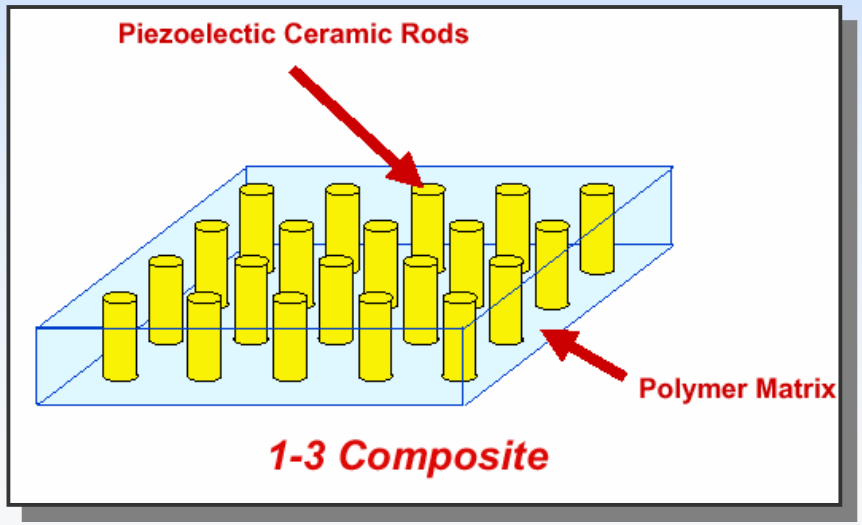
Produzione dei piezoceramici: injection molding



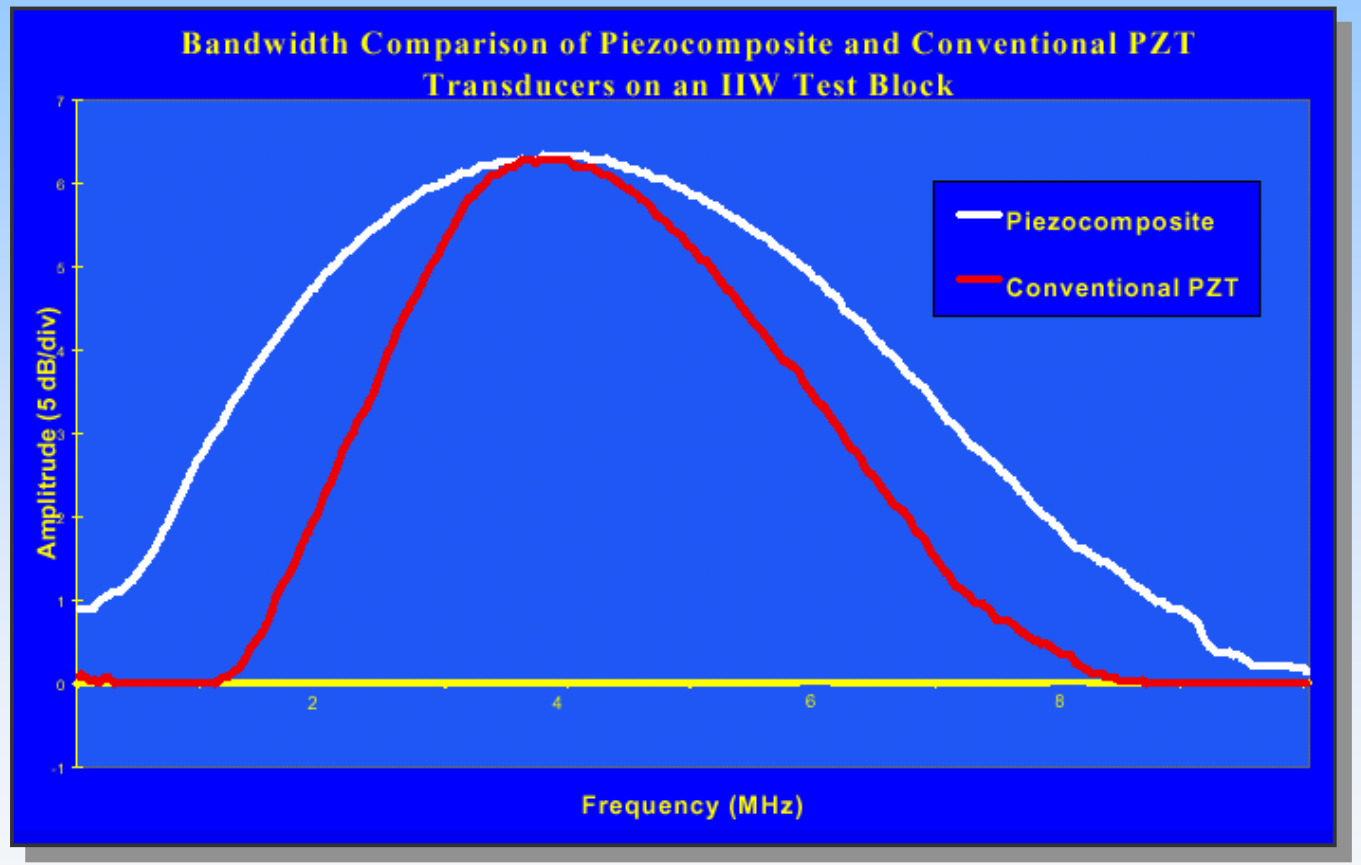
Compositi piezoelettrici

Vantaggi:

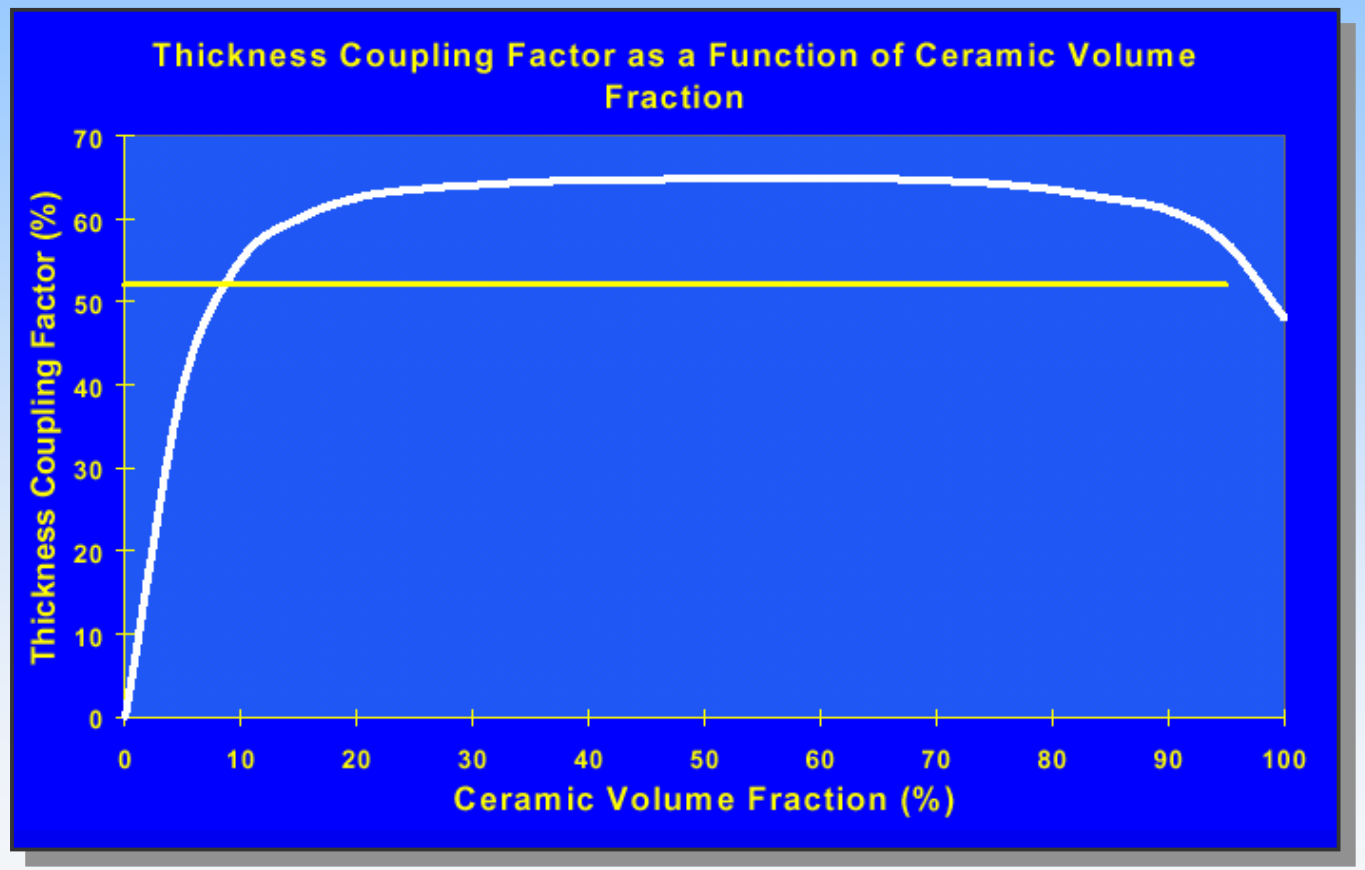
- **aumentata sensibilità**
- **aumentata larghezza della banda di frequenza**
- **minore impedenza acustica $Z=\rho v$ (migliore efficienza)**
- **progettazione su misura per l'applicazione desiderata**



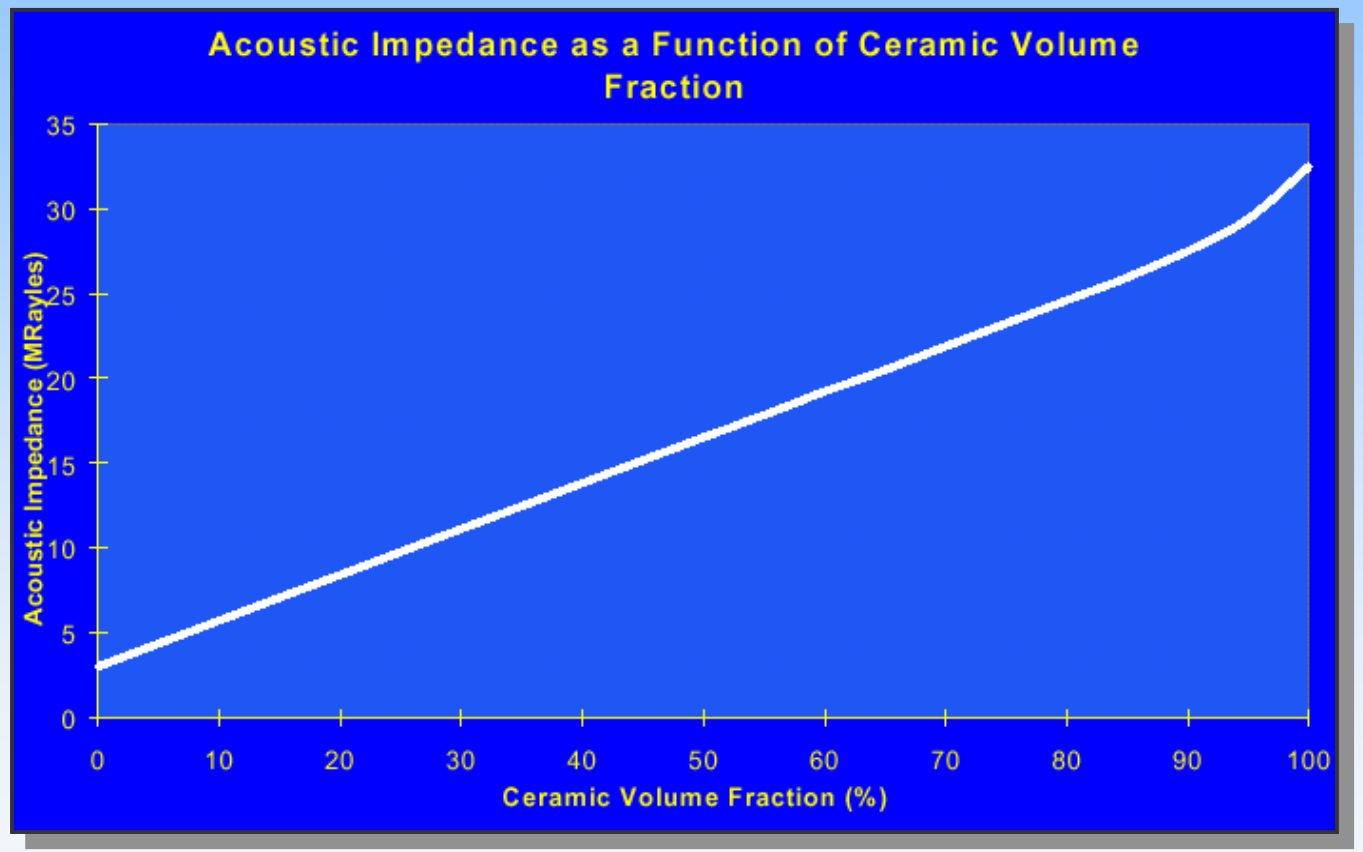
Compositi piezoelettrici



Compositi piezoelettrici



Compositi piezoelettrici



Monocristalli per elevata temperatura

Limiti dell'alta temperatura per cristalli naturali e piezoceramici:

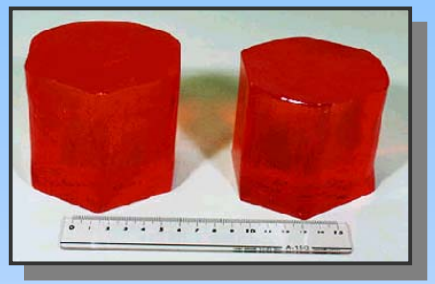
- **transizioni di fase**
- **depolarizzazione**
- **deriva della carica (per dispositivi a bassa frequenza)**
- **aumento dell'attenuazione e delle perdite dielettriche**
- **instabilità composizionale.**

⇓

negli ultimi decenni si è sviluppata la ricerca sui

monocristalli per elevate temperature

Monocristalli per elevata temperatura



LANGASITE ($La_3Ga_5SiO_{14}$) T_m = 1470 °C

Nessuna transizione di fase fino a T_m.

k superiore a quello del quarzo.

TETRABORATO DI LITIO ($Li_2B_4O_7$)

T_m = 917 °C

k superiore a quello del quarzo.

ZINCITE (ZnO)

T_m = 1975 °C

Applicazioni Filtri SAW, sensori chimici, ottica

ORTOFOSFATO DI GALLIO (GaPO4) T_α = 930°C

Polimeri piezoelettrici

Copolimeri di VDF (fluoruro di vinildene), **TrFE** (trifluoroetilene), **TeFE** (tetrafluoroetilene)

Sono usati ad elevate frequenze, laddove i piezoceramici sarebbero troppo fragili per essere usati.

Vantaggi:

- **vasto range di frequenza (10^3-10^9 Hz)**
- **bassa impedenza acustica**
- **alta deformabilità elastica**
- **alta rigidità dielettrica**

Svantaggi:

- **basse temperature operative**
- **debole trasmissione elettromeccanica**

Applicazioni

Sensori: **sfruttano l'effetto piezogeneratore**

Attuatori: **sfruttano l'effetto piezomotore**

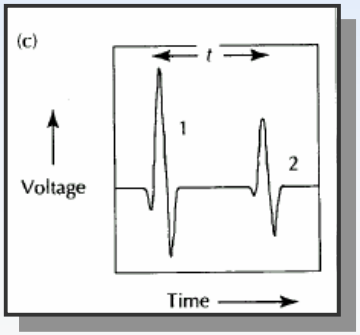
CAMPO	APPLICAZIONE
Automobilistico	Sensore di air bag, atomizzatori di combustibile (iniettori piezo), sensori di knocking, filtri radio, ecc.
Computer	Drive dell'hard disk, tastiera, stampanti a getto d'inchiostro, ecc.
Beni di consumo	Accendini del grill, umidificatori, rivelatori di fumo, pulitori di gioielli e lenti a contatto,
Industriale	Accelerometri, rivelatori di inquinamento, flussimetri, rivelatori di bolle d'aria nei tubi, sensori di impatto, indicatori di livello, equipaggiamento di microposizionamento, sensori di pressione, controlli non distruttivi, pulitori ad ultrasuoni, sgrassatori ad ultrasuoni, rettificatrici ad ultrasuoni, saldatori ad ultrasuoni, ecc.
Medico	Equipaggiamenti ecografici, pulitori dentali, nebulizzatori, terapie ad ultrasuoni, ecc.
Militare	Balistica, sonar, sistemi guida, ecc.
Telecomunicazioni, ottica e acustica	Microfoni, altoparlanti, tweeter, risonatori, filtri, microscopia a scansione, videocamere, ecc.

Applicazioni idroacustiche

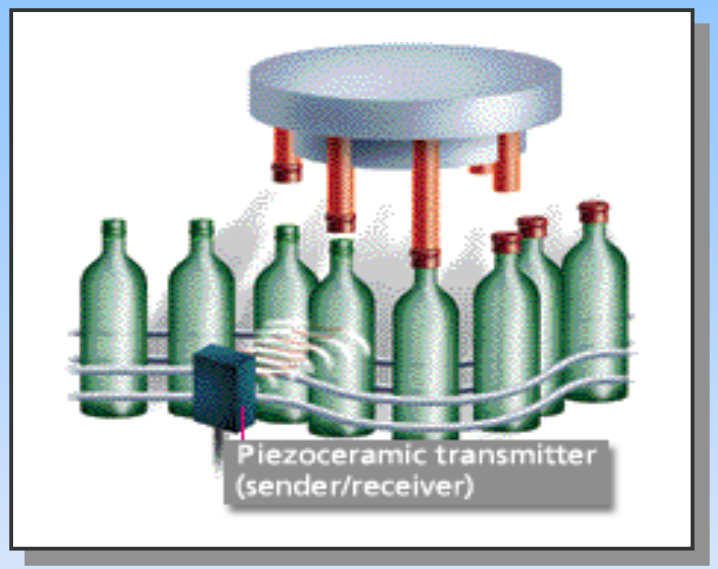
Gli ultrasuoni sono generati dall'applicazione di una tensione alternata con una certa frequenza, che fa vibrare il trasduttore piezoelettrico alla stessa frequenza.

SONAR **(sound navigation and ranging)**

La distanza di un oggetto è calcolata a partire dal tempo intercorso tra l'invio e la ricezione di un fascio ultrasonoro che è riflesso dall'oggetto di cui si vuol misurare la distanza.



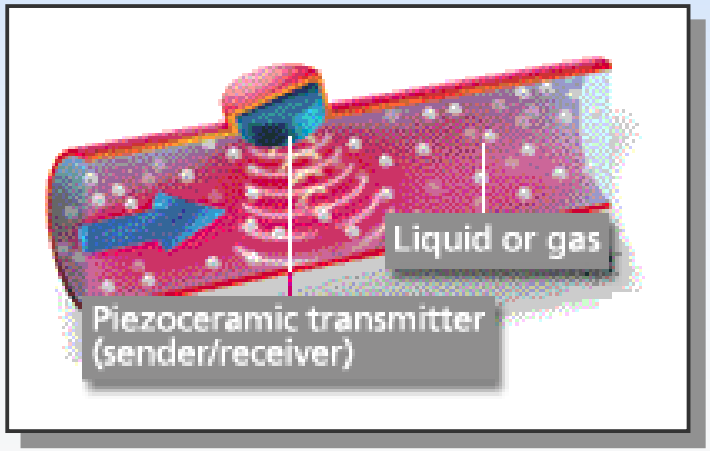
Applicazioni industriali



SENSORI DI DISTANZA IN ARIA

Distanze tra 0.25 e 10 m.

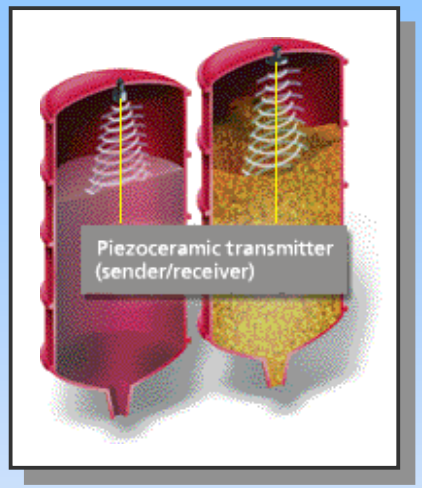
Possono essere usati anche come contatori nelle catene di montaggio.



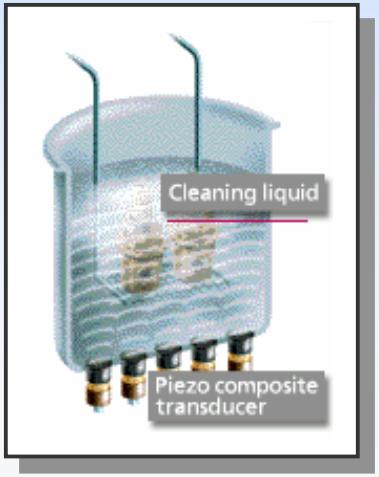
MISURATORI DI FLUSSO

Sfruttando l'effetto Doppler, misurano la frequenza di spostamento delle onde ultrasonore riflesse dalle particelle del liquido.

Applicazioni industriali



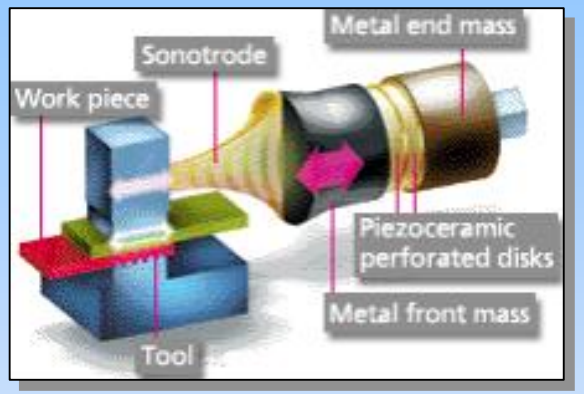
SENSORI DI LIVELLO



PULITORI ULTRASONORI

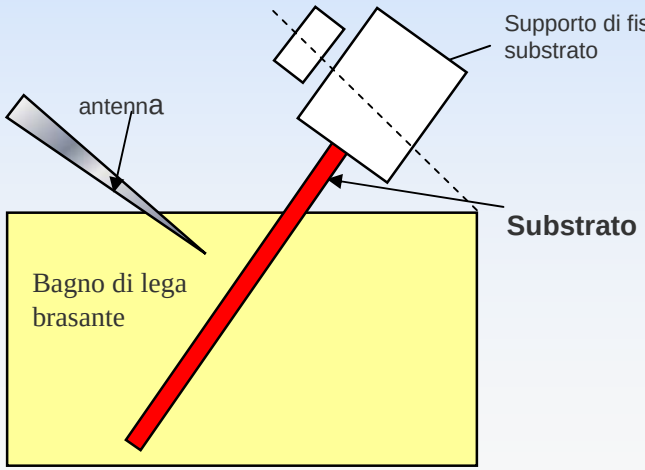
Sfruttando la potenza ultrasonora, generano cavitazione nel liquido, che assicura la pulitura di superfici anche complesse.

Applicazioni industriali



SALDATURA ULTRASONORA

Applicando una forte potenza ultrasonora su due parti in contatto, esse iniziano a vibrare riscaldandosi per attrito e fondendo.
Il sonotrodo amplifica gli ultrasuoni generati dal trasduttore piezoceramico e fornisce l'energia alle parti da unire.
Imballaggi termoplastici, attrezzature biomedicali.



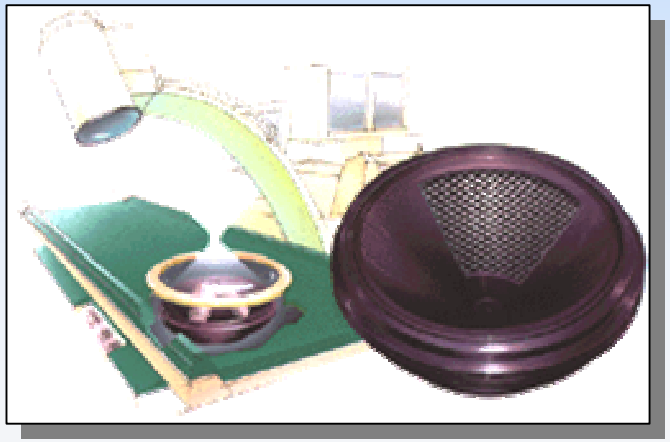
BRASATURA ULTRASONORA

Una sonda o antenna propaga energia acustica attraverso un "bagno" di lega brasante, promuovendo la bagnabilità della lega brasante stessa sul substrato e favorendo la formazione della giunzione.

Applicazioni biomedicali

ESWT (Extracorporeal Shock Waves Therapy)

Applicazione di onde d'urto con effetti terapeutici sui tessuti molli (azione antinfiammatoria, antalgica e di rivascolarizzante) e sulle ossa (osteogenesi e riparazione delle fratture non consolidate).



LITOTRITORI

Moltissimi elementi piezoceramici, disposti in un'apparecchiatura concava, sono fatti vibrare simultaneamente da un impulso elettrico ad alta frequenza. L'onda ultrasonora risultante è concentrata e ad alta energia riuscendo a frantumare i calcoli renali.

Applicazioni biomedicali

NEBULIZZATORI ULTRASONORI

Un disco piezoceramico è incorporato nel fondo di un contenitore riempito di liquido. L'onda ultrasonora, impattando sul liquido, causa delle onde capillari sulla superficie.

Se l'intensità dell'onda sonora è sufficiente, si producono gocce di liquido con diametro dipendente dalla frequenza di disinnesto delle onde ultrasonore.

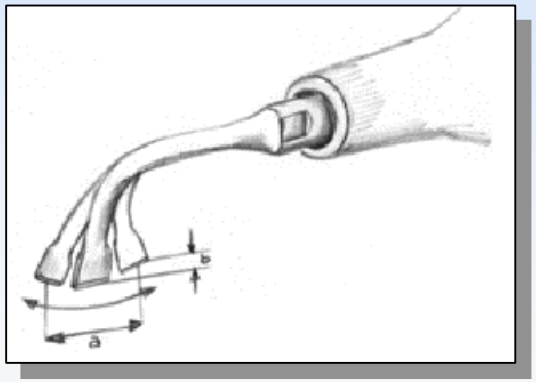
ABLATORI DI TARTARO ULTRASONORI

L'alta frequenza oscillante (20-80 KHz) dell'attrezzo ad ampiezze molto piccole (nella gamma del µm) permette di rimuovere completamente la placca senza danneggiare il dente.

Applicazioni biomedicali

LAME CHIRURIGICHE

Strumenti chirurgici attivi che percepiscono e compensano i piccoli tremiti del chirurgo. Sensori di movimento molto piccoli sulla punta di ogni strumento ne rintracciano la posizione e trasmettono le informazioni ad un calcolatore. Il software distingue i movimenti intenzionali della mano dai tremiti a più alta frequenza. Il calcolatore trasmette un segnale agli azionatori piezoelettrici all'interno dell'impugnatura degli strumenti, che annullano i movimento indesiderati.



Il trasduttore consiste di parecchi piccoli anelli piezoceramici oscillanti alla frequenza di risonanza (20-80 kHz), che inducono la lamierina del bisturi a vibrare consentendo tagli piccoli e molto precisi con minor forza di taglio e senza danneggiare il tessuto circostante.

Applicazioni biomedicali

SENSORI PIEZOELETTRICI PER PROTESI

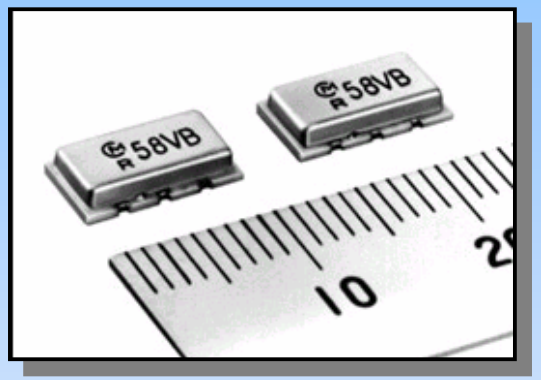
Un sottopiede piezoelettrico potrebbe rilevare quale parte del piede e' effettivamente in appoggio.

SCHERMO TATTILE - TASTIERE BRAILLE

Dispositivo costituito da celle tattili dotate di otto elementi piezoelettrici che si sollevano (producendo un rilievo sulla cella) o si abbassano per riprodurre il carattere braille.

Sei degli otto elementi corrispondono ai sei punti dei caratteri braille, mentre altri due elementi identificano altre caratteristiche del testo, come ad esempio la posizione attuale del cursore o altre caratteristiche della lettera o del simbolo da rappresentare.

Applicazioni elettroniche

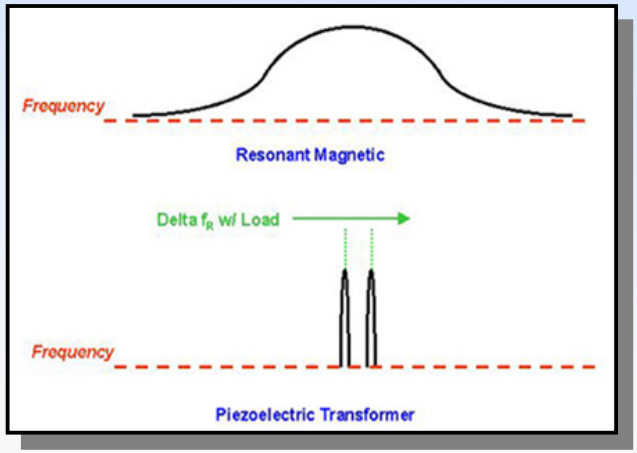


FILTRI SAW

I segnali elettrici sono prima modificati e convertiti in energia meccanica e poi riconvertiti in energia elettrica.

Filtraggio molto preciso e banda molto stretta

Applicazioni: cellulari e comunicazioni satellitari



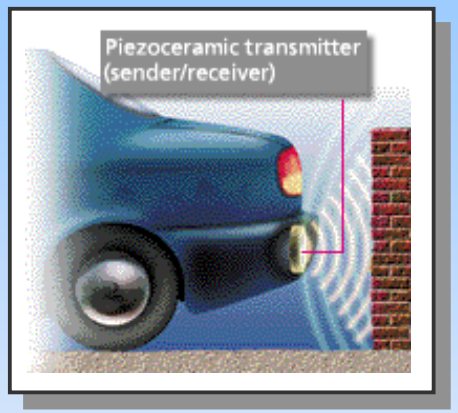
TRASFORMATORI PIEZOELETTRICI

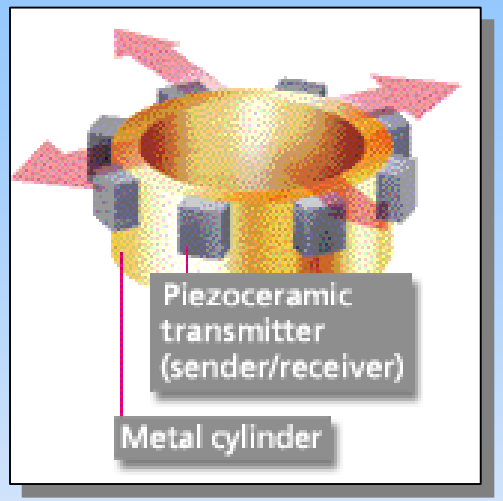
Convertitori di tensione elettrica: il segnale elettrico è prima convertito in energia meccanica e successivamente in energia elettrica.

Lavorano ad alta frequenza senza surriscaldamento.

Applicazioni automobilistiche

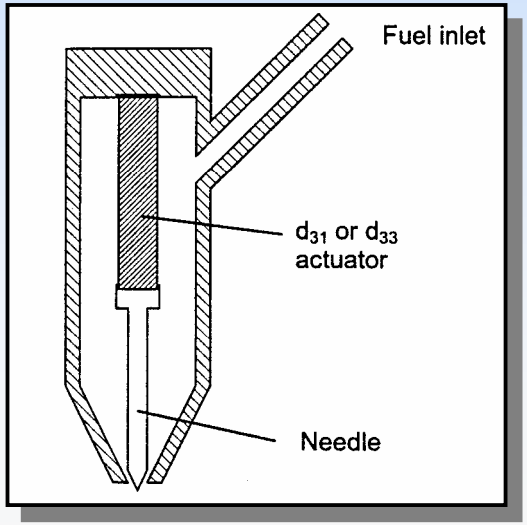
SENSORI DI RETROMARCIA





GIROSCOPI

Usati nei nei sistemi di stabilizzazione dei veicoli registrando il cambiamento di senso di marcia del veicolo.

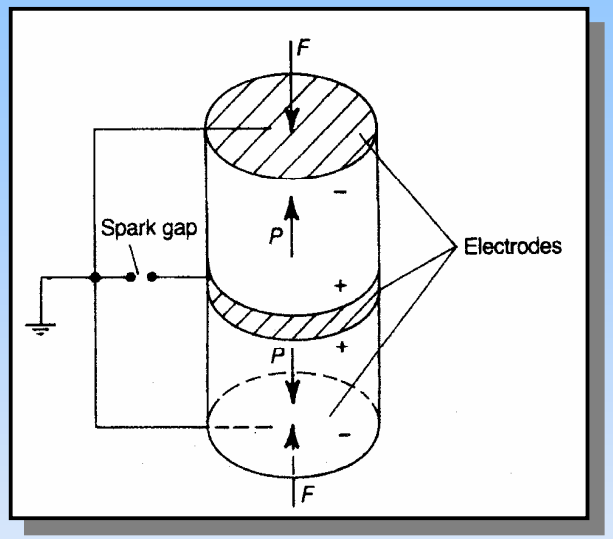


SENSORI DI CONTROLLO APERTURA VALVOLE

Presentano un minor ritardo di attuazione ed una maggiore velocità di salita dell'ago rispetto agli iniettori tradizionali.

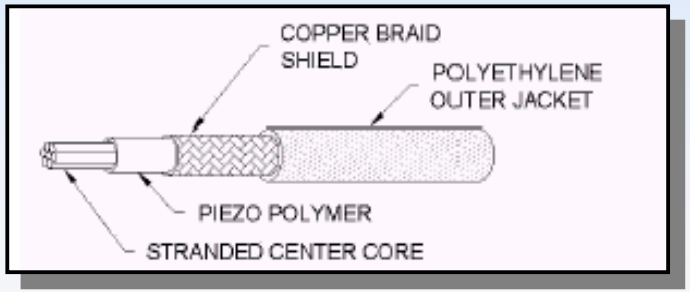
Consentono un dosaggio intelligente del ciclo di iniezione.

Applicazioni di consumo



ACCENDINI

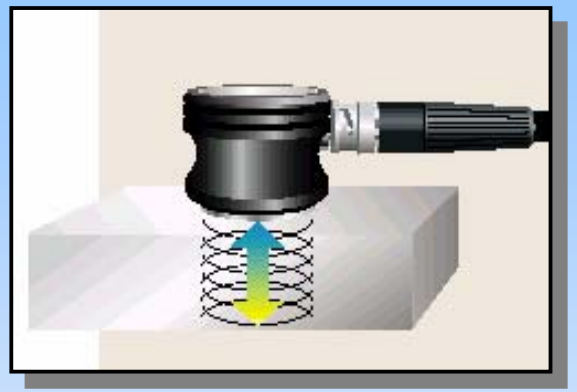
Una forte pressione meccanica sulla superficie di due cilindri piezoelettrici provoca un elevato voltaggio agli elettrodi con produzione di una scintilla nello spark gap.



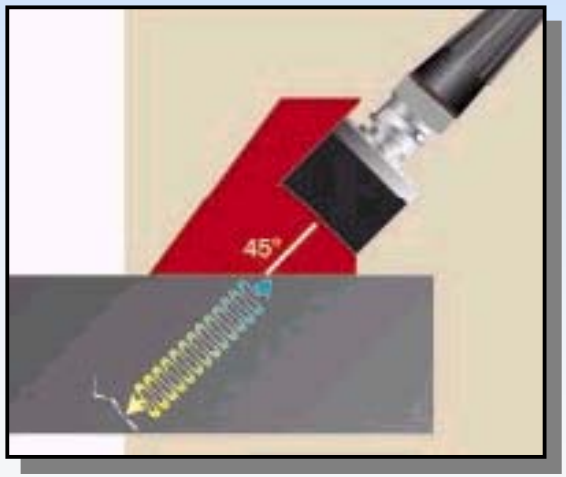
CAVI PIEZOELETTRICI

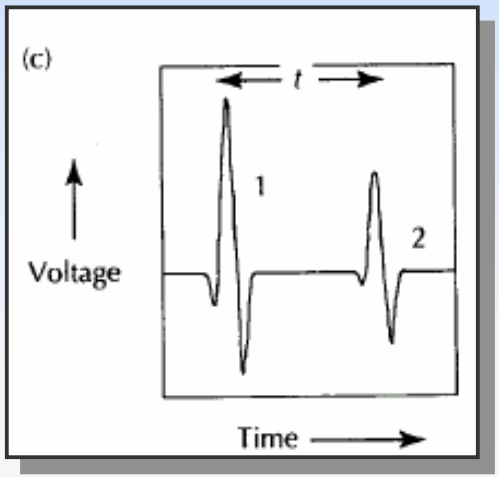
Sensori nei sistemi di sicurezza.

Controlli non distruttivi

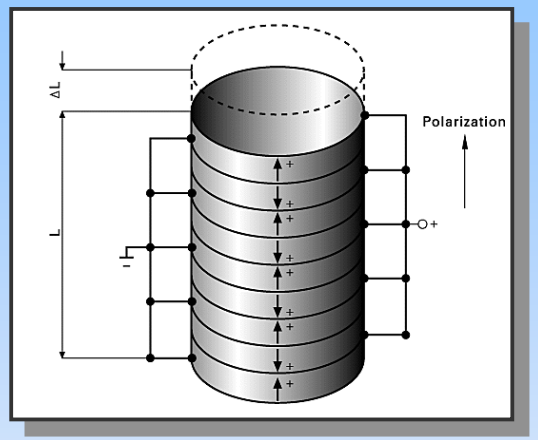


I trasduttori ultrasonori per controlli non distruttivi irradiano nel materiale un fascio ultrasonoro che viene riflesso in modo anomalo in presenza di difetti.



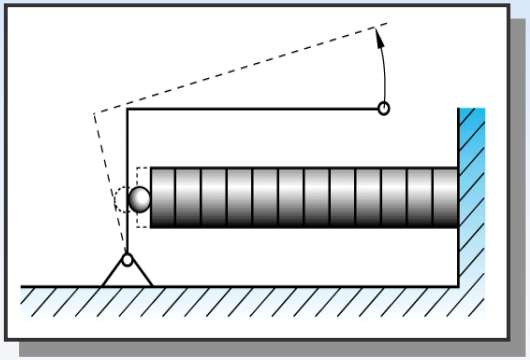


Attuatori piezoelettrici



Attuatori in grado di generare uno spostamento anche micrometrico tramite la deformazione nel senso dello spessore che essi subiscono quando sono soggetti ad un campo elettrico.

L'impilaggio di strati sottili di ceramico connessi in parallelo determina una struttura multistrato in grado di generare grandi deformazioni a tensioni relativamente basse.



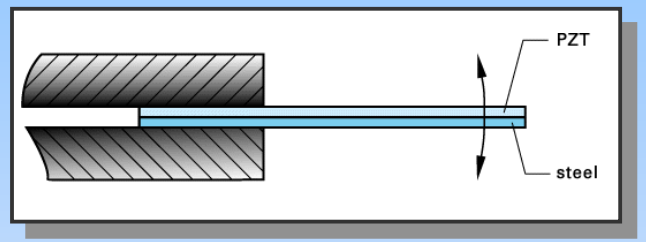
Applicazioni:

• ***ottica***: stabilizzazione di immagine, microscopia a scansione, allineamento di fibre ottiche, posizionamento di specchi, ecc;

•***meccanica di precisione***: annullamento di vibrazioni, micropompe, attuazione di valvole, videocamere, stampanti ink-jet, ecc;

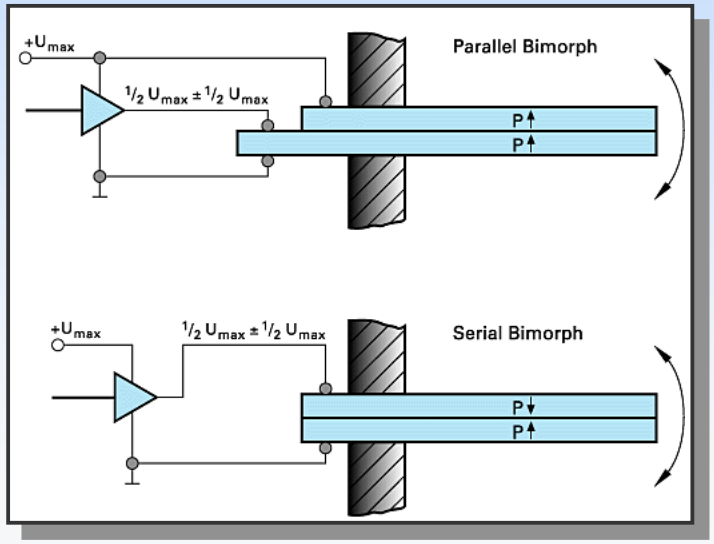
•***microelettronica***

Bender piezoelettrici

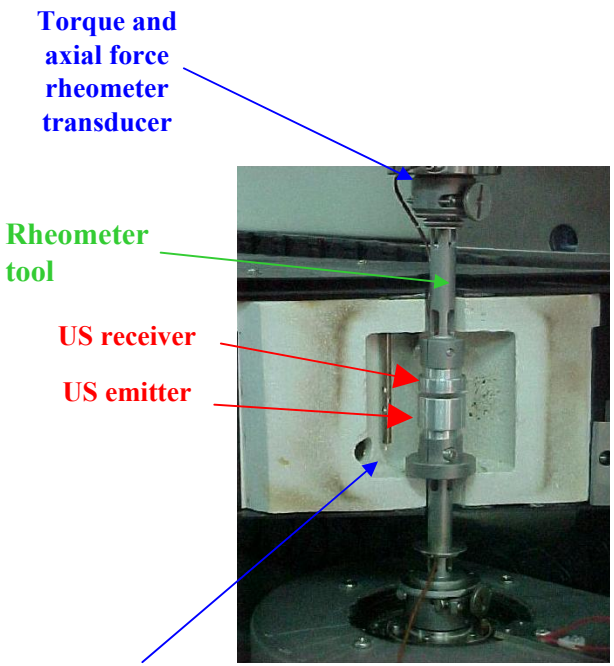
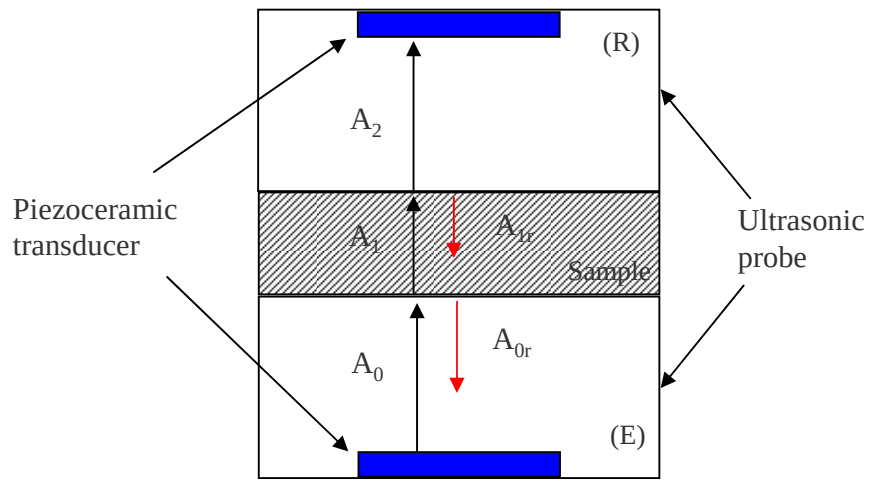


Attuatori in grado di generare una deflessione dovuta alla contrazione di uno strato e all'espansione dell'altro adiacente.

Sono usati nelle microvalcole, micropompe, stampanti, apparecchiature ottiche, ecc.



Applicazione sviluppata presso l'Università di Lecce



Sonda ultrasonora per il monitoraggio delle proprietà dinamico-meccaniche ad elevata frequenza di materiali polimerici