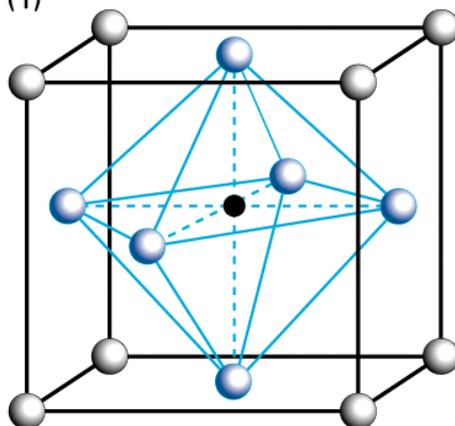


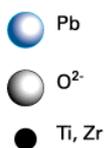
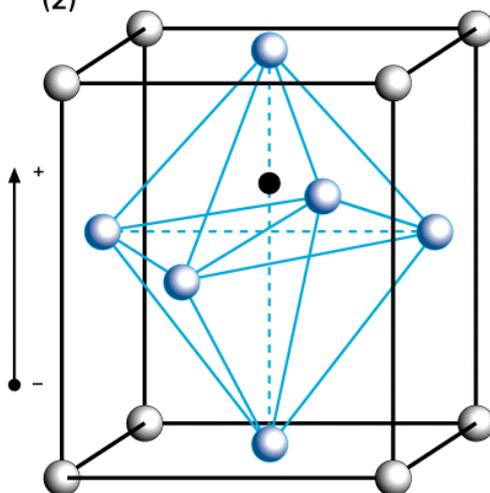
## L'effetto piezoelettrico

L'effetto piezoelettrico, ossia la capacità di un materiale di fornire una differenza di potenziale quando sollecitato meccanicamente ovvero di deformarsi se sottoposto ad un campo elettrico, presente in natura in alcuni quarzi, è un fenomeno inducibile artificialmente in materiali ceramici come il titanato di bario  $\text{BaTiO}_3$  o i molto diffusi PLZT<sup>1</sup> (Piezo Lead Zirconate Titanate) ed è spiegabile a livello cristallografico con distorsioni del

(1)



(2)



<sup>1</sup> I materiali piezoelettrici sono in genere indicati con l'acronimo PZT

reticolo cristallino simili, per certi versi, ai noti meccanismi martensitici che regolano le tempre dell'acciaio.

Il reticolo dei cristalli piezoelettrici è un CFC con ai vertici atomi metallici, al centro delle facce gli atomi di ossigeno e nel centro un atomo più pesante confinato in uno spazio angusto con sopra e sotto degli spazi ottaedrici, posizioni di minore energia, ma nei quali non può spostarsi senza distorcere il reticolo.

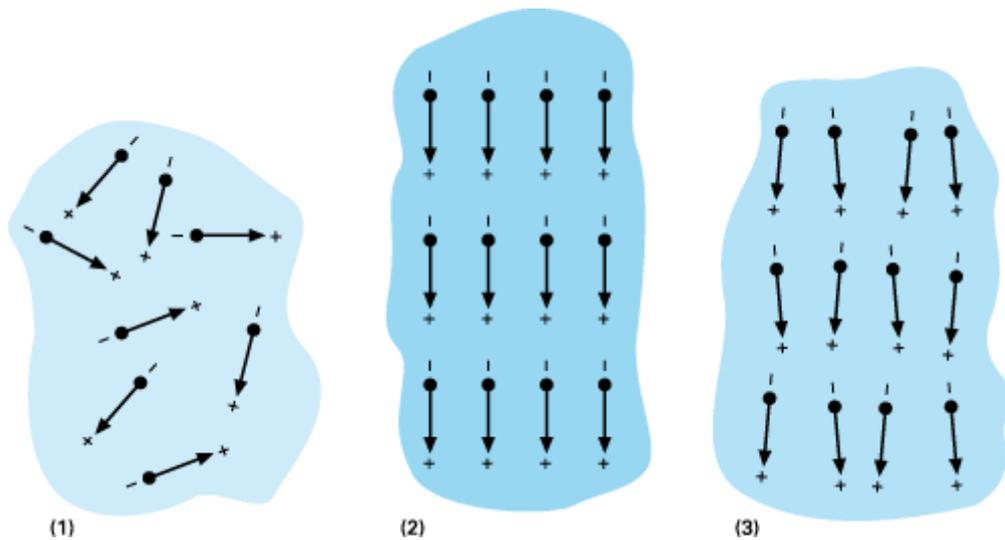
Si tratta dunque di una struttura metastabile

Sotto l'azione del campo elettrico, l'atomo centrale supera la soglia di potenziale e si sposta in uno dei due spazi ottaedrici realizzando una configurazione di energia minore ma causando uno squilibrio nelle cariche che si estrinseca nella formazione di un dipolo elettrico.

Tale comportamento è verificabile al di sotto di una determinata temperatura, detta di Curie, dal nome dei famosi scienziati ai quali si deve la scoperta di tali proprietà. Oltre tale temperatura l'effetto piezoelettrico scompare a causa della minore rigidità del reticolo dovuta alla maggiore agitazione atomica.

Questa evenienza viene comunemente utilizzata per ottenere materiali piezoelettrici di elevata anisotropia. È ovvio, infatti, che materiali naturalmente piezoelettrici non avranno grani disposti con direzioni preferenziali di polarizzazione, con conseguenti ridotte capacità di deformazioni macroscopiche. I PZT artificiali vengono portati oltre la loro temperatura di Curie e sottoposti, durante il raffreddamento, ad un intenso campo elettrico che ne orienta i dipoli come desiderato e provoca una polarizzazione stabile nei limiti di sollecitazione meccanica, termica od elettrica del materiale.

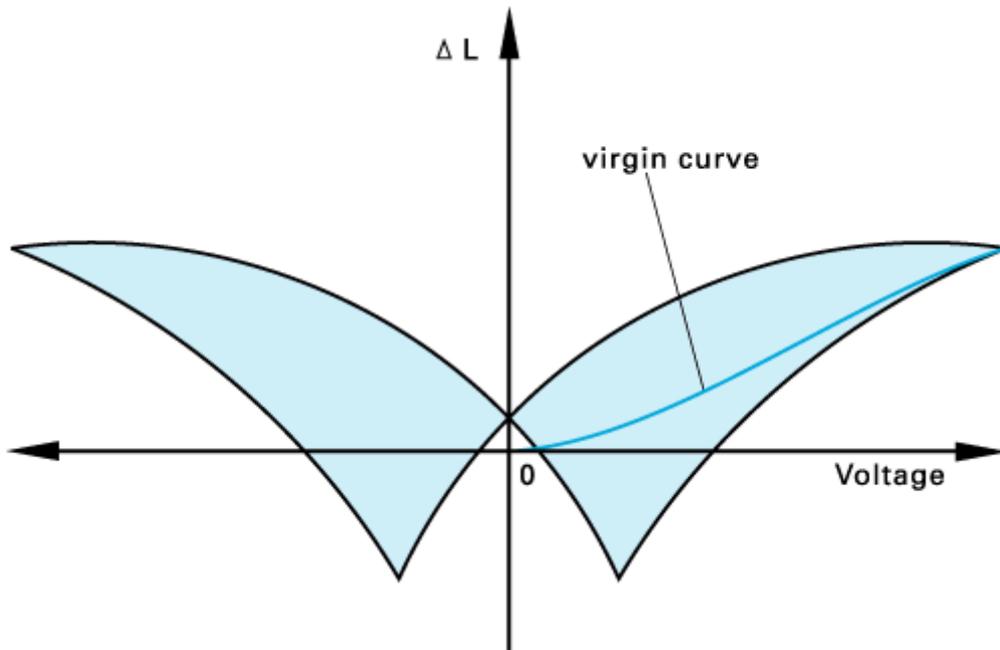
Al termine del processo di polarizzazione il materiale è dunque distorto nel suo reticolo e reagisce a sollecitazioni, meccaniche od elettriche, col medesimo meccanismo di spostamento di massa e di carica.



A livello dei grani si può osservare, nel materiale polarizzato, un'orientazione preferenziale nei vari domini, quale più quale meno accentuata, e che, nel complesso, ha variato la forma del piezoelettrico allungandola lievemente nel senso della polarizzazione.

All'applicare un campo elettrico nel senso della polarizzazione si osserva un primo contrarsi del materiale giacché il campo contrasta la direzione di polarizzazione. Infatti, in un reticolo ordinato con tutti i dipoli equiversi, ad ogni polo positivo si affaccia un polo negativo che forza l'atomo centrale nella sommità dello spazio intercristallino. Quando il campo elettrico sopravviene, l'atomo si centra nello spazio ottaedrico con conseguente rilassamento del reticolo che tenderà a contrarsi, prima di riprendere la strizione a causa del nuovo forzamento verso la direzione opposta.

Aumentando d'intensità il campo, le deformazioni aumentano proporzionalmente fino ad un valore limite del campo indicato con  $E_c$  (coercive field). Oltre tale limite il materiale inizia ad espandere e i dipoli prendono a cambiare direzione perché l'atomo spostato nel vuoto ottaedrico (superiore, ad esempio) viene spinto in quello opposto variando il verso del dipolo. Ciò richiede un campo pari ad  $E_{max}$  in corrispondenza del quale tutti i dipoli risulteranno invertiti.

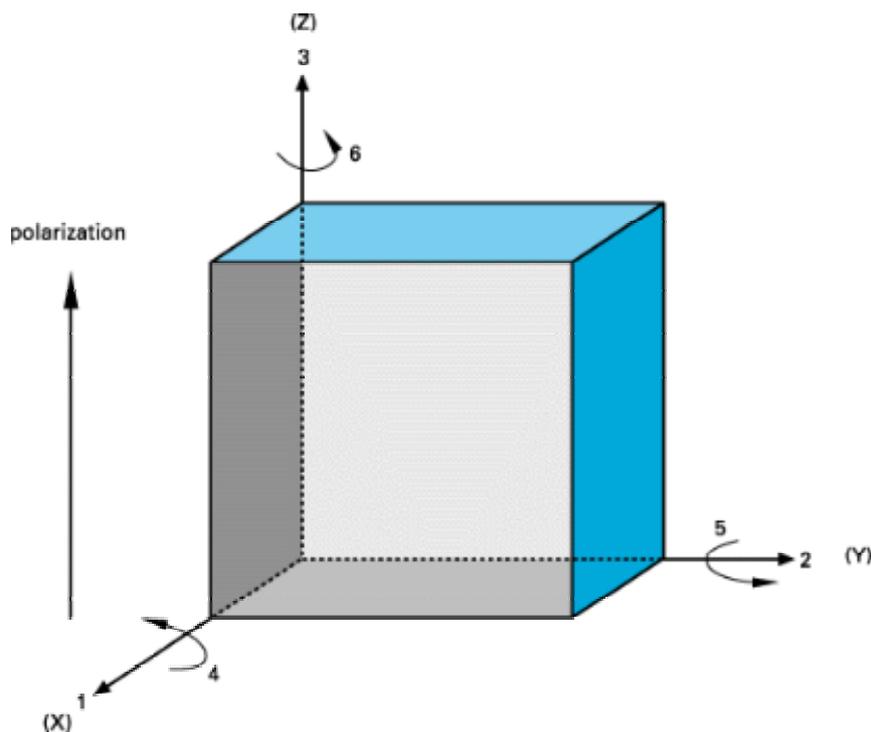


Un campo elettrico d'intensità ancora superiore potrebbe danneggiare il materiale portando ad esempio a rompere il dielettrico.

#### 4.6.1 I materiali piezoelettrici: coefficienti e direzioni

A causa dell'anisotropia indotta nel materiale, l'effetto piezoelettrico dipende dalla direzione.

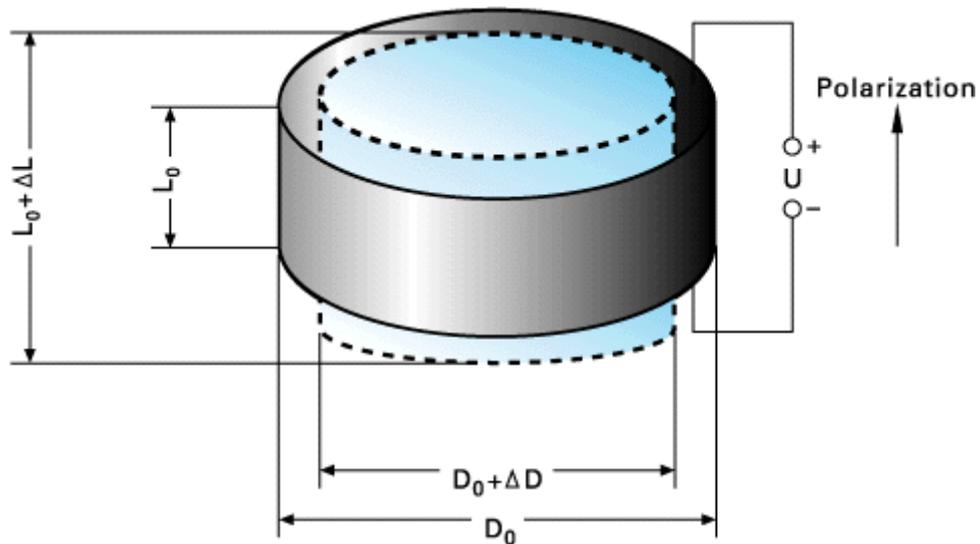
Convenzionalmente sono state definite delle direzioni, indicate con i numeri 1,2,3 (coincidenti con gli assi coordinati x, y, z) e le rotazioni corrispondenti: 4,5,6 (a volte indicate con le lettere U, V, W).



La direzione di polarizzazione è indicata con 3.

Per caratterizzare i PZT si usano dei coefficienti che fanno uso della nomenclatura suddetta. Vediamo i più importanti:

$d_{ij}$	Strain Coefficient <i>Coefficiente di deformazione</i>	[m/V]
	deformazione per unità di campo elettrico applicato ma anche: densità di carica sviluppata per una data tensione	
	es.: $d_{33}$ indica la deformazione lungo l'asse di polarizzazione quando il campo elettrico è nella direzione della polarizzazione; $d_{31}$ indica la deformazione lungo l'asse 1 (ortogonale all'asse di polarizzazione) quando il campo elettrico è nella direzione della polarizzazione;	
	N.B.: a causa della ortogonale isotropia dei PZT è $d_{31}=d_{32}$	
$g_{ij}$	Voltage Coefficient <i>Coeff. di tensione elettrica</i>	[Vm/N]
	campo elettrico sviluppato per stress unitario ma anche: stress sviluppato per unità di corrente	
$k_{ij}$	Coupling Coeff: <i>Coeff. d'accoppiamento</i>	[adimensionale]
	rapporto fra l'energia immagazzinata (meccanica o elettrica) e quella applicata (elettrica o meccanica)	



A questi coefficienti sono spesso associati degli apici che indicano le condizioni elettriche o meccaniche alle quali essi si riferiscono:

- S: strain (deformazione costante mantenuta meccanicamente)
- T: stress (tensione costante)
- E: campo elettrico costante (cortocircuito) ?
- D: corrente costante (circuito aperto) ?

#### 4.6.2 I materiali piezoelettrici: grandezze elettriche

Al di sotto della frequenza di risonanza, una lamina PZT si comporta come un condensatore e la deformazione è proporzionale alla carica.

La sua capacità è:

$$C = \epsilon_{33} A/b$$

dove

$\epsilon_{33}$  è la costante dielettrica

A la superficie della lamina (*delle armature*)

b lo spessore della lamina (*distanza fra le armature*)

Equazioni costitutive

$$\epsilon = \sigma/Y - d_{ij}E$$

$$D = - d_{ij}\sigma + \epsilon_d E$$

dove  $\epsilon$  e  $\sigma$  indicano strain e stress

Y è il modulo di Young

E il campo elettrico

D lo spostamento di carica

#### 4.6.3 I materiali piezoelettrici: ripetibilità della prestazione

I PZT non sono soggetti a creep nelle applicazioni in cui sono utilizzati in funzionamento periodico alternato.

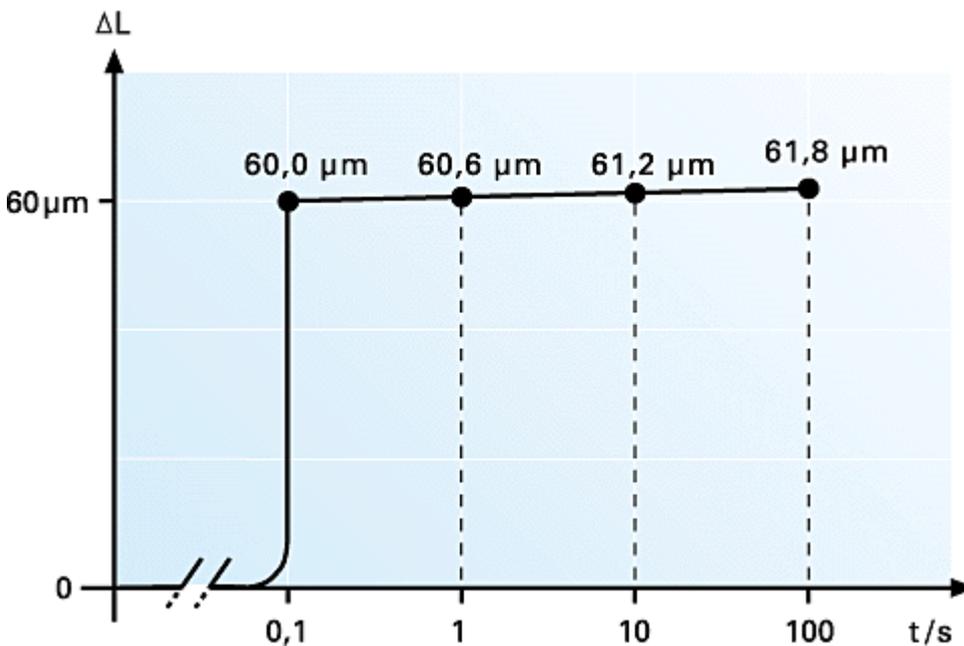
Il creep nei pzt si manifesta, come l'isteresi, come effetto sulla polarizzazione residua di un campo elettrico stabile: se viene aumentata la tensione quando il piezoelettrico è già deformato, la polarizzazione residua manifesterà gli effetti di uno scorrimento viscoelastico una volta che si cambi il segno della tensione.

Dal grafico sotto riportato si vede come l'effetto del creep sia comunque molto ridotto, attestandosi, ai suoi valori massimi (raggiunti dopo poche ore), su deformazioni differenti dell'1% dall'ultimo movimento comandato.

Tale effetto è descritto dall'equazione seguente:

$$\Delta L(t) = \Delta L \left( 1 + \gamma \cdot \log \left( \frac{t}{0.1} \right) \right)$$

dove  $\Delta L$  è lo spostamento 0.1s dopo che si è variato il campo elettrico e  $\gamma$  è il fattore di creep ( $\sim 0.01 \div 0.02$ )



Oltre a fenomeni di creep, le prestazioni dei pzt nel tempo possono variare come conseguenza di processi di depolarizzazione dovuti allo stesso funzionamento del materiale. Tali danni da invecchiamento riguardano tipicamente i sensori pzt e sono

trascurabili per gli attuatori, giacché ogni volta che il materiale è attuato, è sottoposto ad un campo elettrico nella direzione di polarizzazione.