Transducción electromecánica, fundamentos, tecnologías y aplicaciones en sensores y actuadores ultrasónicos

Tomás E. Gómez Álvarez-Arenas.
Departamento de Sensores y Tecnologías Ultrasónicas.
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI).
CSIC.

Tomás E. Gómez Álvarez-Arenas.
Jefe del Departamento de Sensores y Sistemas Ultrasónicos
Departamento de Sensores y Tecnologías Ultrasónicas.
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI), CSIC.

CSIC: www.csic.e

ITEFI: www.itefi.csic.es

USBIOMAT: web: www.us-biomat.com
twitter: @usbiomat
github: usbiomat

Google Scholar: Tomas E. Gomez Alvarez-Arenas
LinkedIn: Tomas Gomez Alvarez-Arenas
Mendeley: tomas-gomez
GitHub: Tomas Gomez Alvarez-Arenas (TomasEGAA)
ResearchGate: t e gomez alvarez-arenas
Loop Frontiers: Tomas E. Gomez Alvarez-Arenas Tomas E. Gomez Alvarez-Arenas

https://us-biomat.com/group/tomas-ga/

Material adicional.

Transparencias y python notebook:

https://github.com/TomasGAA/Seminario_UMH_2016
https://us-biomat.com/resources/

Referencias citadas en el grupo de Mendeley (transduccion-em-umh-2016)[1]

https://www.mendeley.com/groups/9688711/transduccion-em-umh-2016/

[1]Solo referencias, solicitar al ponente acceso al grupo de Mendeley con los textos completos

Programa:

Transducción electromecánica I: Introducción.

Transducción electromecánica II: Materiales, tecnologías y aplicaciones.

Transducción electromecánica III: Laboratorio.

Take aways:

1. Conocer los fundamentos de los principales mecanismos físicos que permiten la transducción electromecánica: Electrostricción, piezoelectricidad, ferroelectricidad, y fuerzas entre cargas electrostáticas

2. Conocer los principales materiales piezoelectricos/ferroelectricos, propiedades y caracteristicas

3. Conocer las principales aplicaciones en ultrasonidos, actuadores, transformadores, etc.

5. Conocer las principales técnicas de fabricación de transductores ultrasonicos y sus aplicaciones.

Transducción electromecánica I: Introducción.

Tomás E. Gómez Álvarez-Arenas.
Departamento de Sensores y Tecnologías Ultrasónicas.
Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI).
CSIC.

Transducción electromecánica I: Introducción.

I. Termodinámica de sistemas acoplados.
- I.a Introducción termodinámica de la piezoelectricidad

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica.
- II.a. Electrostricción.
- II.b. Fuerzas entre cargas electrostáticas
- II.c Piezoelectricidad.

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad.
- III.a. Piezoelectricidad en monocristales.
- III.b. Ferroelectricidad: definición y principales propiedades.

IV. Materiales piezoeléctricos

CSIC

USBIOMAT

Sistema "general"

Variación energía interna: $dU = Q + W$

Calor

Trabajo

Magnitud intensiva: Fuerza generalizada

$$dU = \boldsymbol{\theta}\, d\boldsymbol{S} + \boldsymbol{F}\, d\boldsymbol{\delta}$$

Magnitud extensiva: Desplazamiento generalizado

Definiciones termodinámicas:

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{\delta}, F = \left[\frac{\partial U}{\partial \delta}\right]_{S}$$

Magnitudes intensivas

Sistema lineal:

Forma cuadrática

$$U = \frac{1}{2}\left(S\frac{\partial}{\partial S} + \delta\frac{\partial}{\partial \delta}\right)\left(S\frac{\partial}{\partial S} + T\frac{\partial}{\partial \delta}\right)U \qquad U = \frac{1}{2}\left(S\frac{\partial}{\partial S} + \delta\frac{\partial}{\partial \delta}\right)\left(S\frac{\partial}{\partial S} + T\frac{\partial}{\partial \delta}\right)U$$

Definiciones termodinámicas:

$$k^S = \left[\frac{\partial^2 U}{\partial^2 \delta}\right]_S = \left[\frac{\partial F}{\partial \delta}\right]_S \qquad C^\delta = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial^2 S}\right]_\delta = \left[\frac{\partial S}{\partial S}\right]_\delta \quad A = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial \delta}\right] = \left[\frac{\partial F}{\partial S}\right] = \left[\frac{\partial S}{\partial \delta}\right]$$

Energía interna:

$$\boxed{U(S,\delta) = \frac{1}{2}\left(C^\delta S^2 + k^S \delta^2 + 2A\delta S\right)}$$

Forma cuadrática

CSIC

USBIOMAT

Sistema “general”

Energía interna (lineal)
Forma cuadrática

$$U(S,\delta) = \frac{1}{2}\left(C^{\delta}S^{2} + k^{S}\delta^{2} + 2A\delta S\right)$$

Definiciones termodinámicas (generales):

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{\delta}, F = \left[\frac{\partial U}{\partial \delta}\right]_{S}$$

Ecuaciones constitutivas (S, $\boldsymbol{\delta}$):

$$\left.\begin{aligned}\theta &= C^{\delta}S + \boldsymbol{A}\,\delta \\ F &= \boldsymbol{A}\,S + k^{S}\,\delta\end{aligned}\right\}$$

Ecuaciones constitutivas (θ, δ):

$$\left.\begin{aligned}S &= \frac{1}{C^{\delta}}\theta - \frac{A}{C^{\delta}}\,\delta \\ F &= \frac{A}{C^{\delta}}\,\theta + \left(k^{S} - \frac{A^{2}}{C^{\delta}}\right)\delta\end{aligned}\right\} \qquad \begin{aligned}S &= \kappa^{\delta}\theta - A'\,\delta \\ F &= A'\,\theta + k^{\theta}\,\delta\end{aligned}$$

Si A = 0
Sistema desacoplado

$$\left.\begin{aligned}\theta &= C\quad S \\ F &= k\quad \delta\end{aligned}\right\}$$

Ley de Hook (generalizada)

$$\boxed{k^{S}, \qquad k^{\theta} = \left(k^{S} - \frac{A^{2}}{C^{\delta}}\right)}$$

Sistema dieléctrico

Variación energía interna: $dU = Q + W$

Calor

Trabajo

$$dU = \theta\, dS + E_n\, dD_n$$

Magnitud intensiva: Campo eléctrico (vector)

Magnitud extensiva: Desplazamiento eléctrico (vector)

Definiciones termodinámicas:

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_D, E_n = \left[\frac{\partial U}{\partial D_n}\right]_S$$

Magnitud intensiva

Sistema lineal:

$$U = \frac{1}{2}\left(S\frac{\partial}{\partial S} + D_n\frac{\partial}{\partial D_n}\right)\left(S\frac{\partial}{\partial S} + D_m\frac{\partial}{\partial D_m}\right)U \qquad U = \frac{1}{2}\left[D_m D_n\frac{\partial^2}{\partial D_m \partial D_n} + S^2\frac{\partial^2}{\partial S^2} + 2D_m S\frac{\partial^2}{\partial D_m \partial S}\right]U$$

Forma cuadrática

Definiciones termodinámicas:

$$\beta^S_{mn} = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial D_m \partial D_n}\right]_S = \left[\frac{\partial E_m}{\partial D_n}\right]_S \quad C^D = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial^2 S}\right]_D = \left[\frac{\partial \theta}{\partial S}\right]_D \quad A_m = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial D_m}\right] = \left[\frac{\partial E_m}{\partial S}\right] = \left[\frac{\partial \theta}{\partial D_m}\right]$$

Energía interna:

$$\boxed{U(S, D) = \frac{1}{2}\left(C^D S^2 + \beta^S_{mn} D_m D_n + 2A_m D_m S\right)}$$

Forma cuadrática

Sistema dieléctrico

Energía interna (lineal)
Forma cuadrática

$$U(S,D) = \frac{1}{2}\left(C^D S^2 + \beta^S_{mn}\, D_m D_n + 2A_m D_m S\right)$$

Definiciones termodinámicas (generales):

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_D, E_n = \left[\frac{\partial U}{\partial D_n}\right]_S$$

Ecuaciones constitutivas (*S, D*):

$$\left.\begin{aligned} \theta &= C^D S + A_m\, D_m \\ E_m &= A_m\, S + \beta^S_{mn}\, D_n \end{aligned}\right\}$$

Ecuaciones constitutivas (*θ, D*):

$$\left.\begin{aligned} S &= \frac{1}{C^D}\theta - \frac{A_m}{C^D}\, D_m \\ E_m &= \frac{A_m}{C^D}\,\theta + \left(\beta^S_{mn} - \frac{A_m A_n}{C^D}\right) D_n \end{aligned}\right\}$$

$$S = \kappa^D \theta - A_m{}'\, D_m$$

$$E_m = A_m{}'\,\theta + \beta^\theta_{mn}\, D_m$$

Si A = 0
Sistemas desacoplados

$$\left.\begin{aligned} \theta &= C^D S \\ E_m &= \beta^S_{mn}\, D_n \end{aligned}\right\}$$

$$\beta^S_{mn},\quad \beta^\theta_{mn} = \left(\beta^S_{mn} - \frac{A_m A_n}{C^D}\right)$$

Sistema elástico (mecánico).

Variación energía interna: $dU = Q + W$

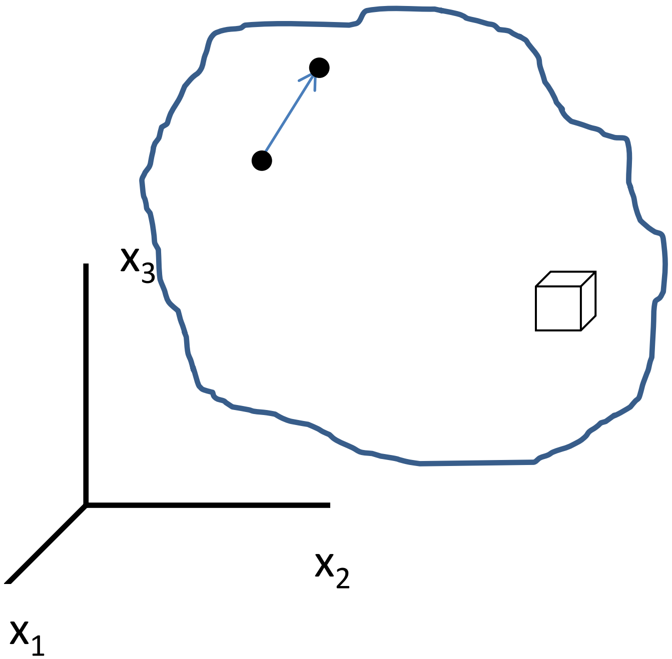
Calor

Trabajo

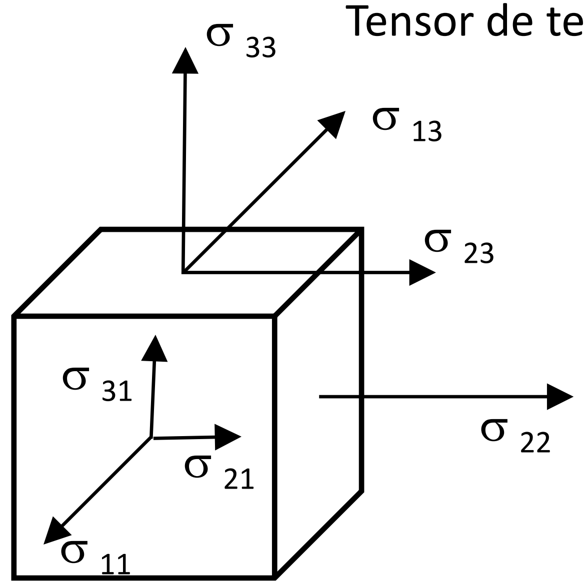
$$dU = \theta \, dS + \sigma \, d\varepsilon$$

Magnitud intensiva: Tensión

Magnitud extensiva: Deformación



Tensor de tensiones: σ_{ij}



Sistema elástico (mecánico).

Variación energía interna: $dU = Q + W$

Calor

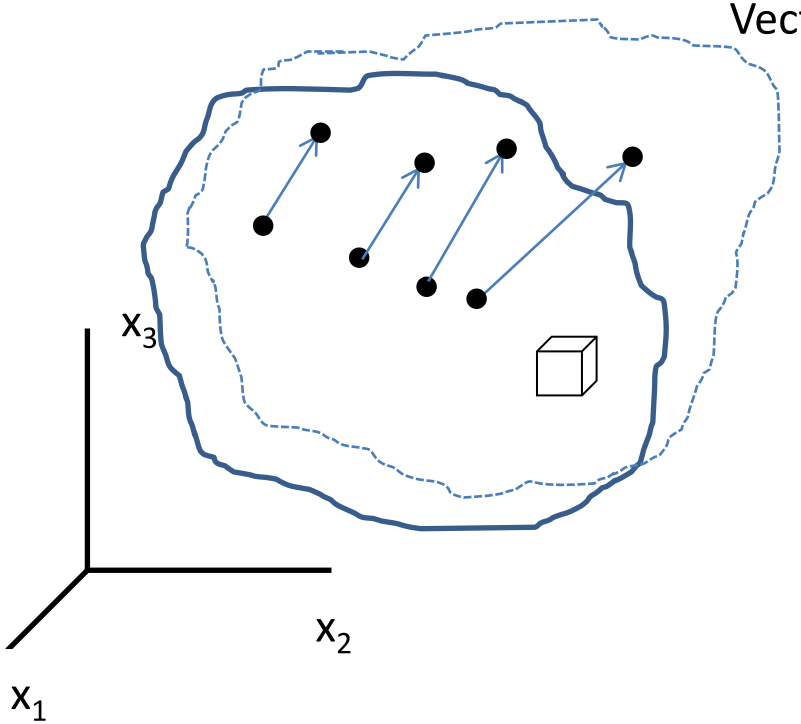
Trabajo

$dU = \theta\, dS + \sigma\, d\varepsilon$

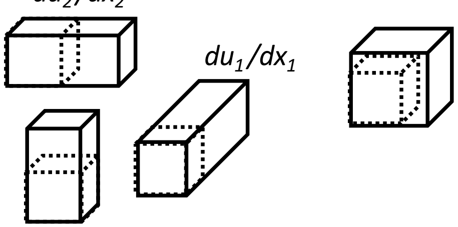
Magnitud intensiva: Tensión

Magnitud extensiva: Deformación

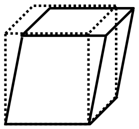
Vector desplazamiento: u_i



Tensor deformación: ε_{ij} $\qquad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$



Estiramiento /compresión
cambio de volumen



Cizalla
Volumen constante

Sistema elástico (mecánico).

Variación energía interna: $dU = Q + W$

Calor

Trabajo

$$dU = \theta\, dS + \sigma_{ij}\, d\varepsilon_{ij}$$

Magnitud intensiva: Tensión

Magnitud extensiva: Deformación

Definiciones termodinámicas:

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{\varepsilon}, \sigma_{ij} = \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]_{S}$$

Magnitud intensiva

Forma cuadrática

Sistema lineal:

$$U = \frac{1}{2}\left(S\frac{\partial}{\partial S} + \varepsilon_{ij}\frac{\partial}{\partial \varepsilon_{ij}}\right)\left(S\frac{\partial}{\partial S} + \varepsilon_{kl}\frac{\partial}{\partial \varepsilon_{kl}}\right)U; \quad U = \frac{1}{2}\left[S^2\frac{\partial^2}{\partial S^2} + \varepsilon_{ij}\,\varepsilon_{kl}\frac{\partial^2}{\partial \varepsilon_{ij}\,\partial \varepsilon_{kl}} + 2S\varepsilon_{ij}\frac{\partial^2}{\partial \varepsilon_{ij}\,\partial \delta}\right]U$$

Definiciones termodinámicas:

$$c_{ijkl}^{S} = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial \varepsilon_{ij}\,\partial \varepsilon_{kl}}\right]_S = \left[\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \varepsilon_{kl}}\right]_S \quad C^{\varepsilon} = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial^2 S}\right]_{\varepsilon} = \left[\frac{\partial S}{\partial S}\right]_{\varepsilon} \quad A_{ij} = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial \varepsilon_{ij}}\right] = \left[\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial S}\right] = \left[\frac{\partial S}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]$$

Energía interna:

$$\boxed{U(S,\varepsilon) = \frac{1}{2}\left(C^{\varepsilon}\,S^2 + c_{ijkl}^{S}\,\varepsilon_{ij}\,\varepsilon_{kl} + 2A_{ij}\,\varepsilon_{ij}\,S\right)}$$

Forma cuadrática

Sistema elástico

Energía interna (lineal)
Forma cuadrática

$$U(S,\varepsilon) = \frac{1}{2}\left(C^{\varepsilon}\, S^2 + c^{S}_{ijkl}\, \varepsilon_{ij}\, \varepsilon_{kl} + 2A_{ij}\, \varepsilon_{ij}\, S\right)$$

Definiciones termodinámicas (generales):

$$\theta = \left[\frac{\partial U}{\partial S}\right]_{\varepsilon}, \sigma_{ij} = \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]_{S}$$

Ecuaciones constitutivas (S,ε)

$$\left.\begin{aligned} \theta &= C^{\varepsilon} S + A_{ij}\ \varepsilon_{ij} \\ \sigma_{ij} &= A_{ij}\ S + c^{S}_{ijkl}\, \varepsilon_{kl} \end{aligned}\right\}$$

Ecuaciones constitutivas (θ,ε)

$$\left.\begin{aligned} S &= \frac{1}{C^{\varepsilon}}\theta - \frac{A_{ij}}{C^{\varepsilon}}\ \varepsilon_{ij} \\ \sigma_{ij} &= \frac{A_{ij}}{C^{\varepsilon}}\ \theta + \left(c^{S}_{ijkl} - \frac{A_{ik}\, A_{jl}}{C^{D}}\right) \varepsilon_{kl} \end{aligned}\right\}$$

$$S = \kappa^{\varepsilon}\theta - A_{ik}{}'\, A_{jl}{}'\ \varepsilon_{kl}$$

$$\sigma_{ij} = A_{ij}{}'\ \theta + c^{\theta}_{ijkl}\ \ \varepsilon_{kl}$$

Si A = 0
Sistemas desacoplados

$$\left.\begin{aligned} \theta &= C^{\varepsilon} S \\ \sigma_{ij} &= c^{S}_{ijkl}\, \varepsilon_{kl} \end{aligned}\right\}$$

$$c^{S}_{ijkl}, \qquad c^{\theta}_{ijkl} = \left(c^{S}_{ijkl} - \frac{A_{ij}\, A_{kl}}{C^{\varepsilon}}\right)$$

Sistema acoplados

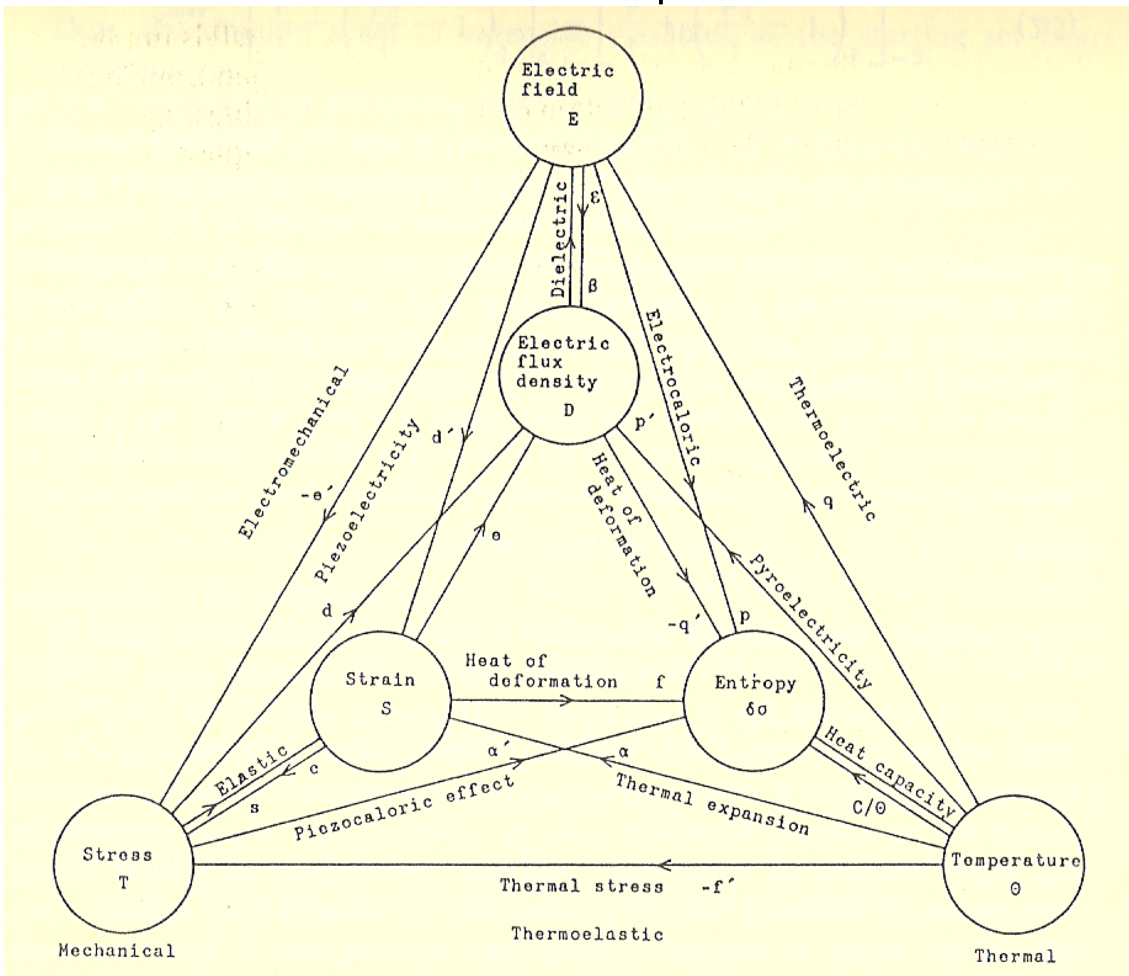


Fig. 1.1 Interaction processes between the electrical, mechanical, and thermal systems.

Takuro Ikeda, Fundamentals of Piezoelecgricity, Oxford University Press, 1990

Sistema acoplado dieléctrico-elástico

Calor

Trabajo

Variación energía interna: $dU = Q + W$

$$dU = \theta dS + E_n dD_n + \sigma_{ij}\, d\varepsilon_{ij}$$

Definiciones termodinámicas:

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]_{D,S}, E_n = \left[\frac{\partial U}{\partial D_n}\right]_{\varepsilon,S}$$

Magnitud intensiva

Forma cuadrática

Sistema lineal:

$$U = \frac{1}{2}\left(D_n \frac{\partial}{\partial D_n} + \varepsilon_{ij} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{ij}}\right)\left(D_m \frac{\partial}{\partial D_m} + \varepsilon_{kl} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{kl}}\right) U \qquad U = \frac{1}{2}\left[S^2 \frac{\partial^2}{\partial D_m \partial D_n} + \varepsilon_{ij}\, \varepsilon_{kl} \frac{\partial^2}{\partial \varepsilon_{ij}\, \partial \varepsilon_{kl}} + 2 D_m \varepsilon_{ij} \frac{\partial^2}{\partial \varepsilon_{ij}\, \partial D_m}\right] U$$

Definiciones termodinámicas:

$$\beta_{mn}^{\varepsilon} = \left[\frac{\partial^2 U}{\partial D_m \partial D_n}\right]_{\varepsilon} = \left[\frac{\partial E_m}{\partial D_n}\right]_{\varepsilon} \qquad c_{ijkl}^{D} = \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \varepsilon_{ij}\, \partial \varepsilon_{kl}}\right]_{D} = \left[\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \varepsilon_{kl}}\right]_{D} \qquad h_{ijk} = -\left[\frac{\partial^2 U}{\partial \varepsilon_{ij}\, \partial D_k}\right] = -\left[\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial D_k}\right] = -\left[\frac{\partial E_k}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]$$

Energía interna:

$$U(S, \varepsilon) = \frac{1}{2}\left(\beta_{mn}^{\varepsilon}\, D_m D_n + c_{ijkl}^{D}\, \varepsilon_{ij}\, \varepsilon_{kl} - 2 h_{ijk}\, \varepsilon_{ij}\, D_k\right)$$

Forma cuadrática

Sistema acoplado dieléctrico-elástico

Energía interna (lineal)
Forma cuadrática

$$U(S,\varepsilon) = \frac{1}{2}\left(\beta^{\varepsilon}_{mn}\, D_m D_n + c^{D}_{ijkl}\,\varepsilon_{ij}\,\varepsilon_{kl} - 2h_{ijk}\,\varepsilon_{ij}\,D_k\right)$$

Definiciones termodinámicas (generales):

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}}\right]_{D,S},\ E_n = \left[\frac{\partial U}{\partial D_n}\right]_{\varepsilon,S}$$

Ecuaciones constitutivas (*ε, D*)

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{ij} &= c^{D}_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} - h_{ijl}\ D_l \\ E_k &= -h_{ijk}\ \varepsilon_{ij} + \beta^{\varepsilon}_{kl} D_l \end{aligned}\right\}$$

Ecuaciones constitutivas (*ε, E*)

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{h_{ijl}}{\beta^{\varepsilon}_{kl}} E_k + \left(c^{D}_{ijmn} - \frac{h_{ijl}\,h_{mnk}}{\beta^{\varepsilon}_{kl}}\right)\varepsilon_{mn} \\ D_l &= -\frac{h_{ijm}}{\beta^{\varepsilon}_{kl}}\ \varepsilon_{ij} + \frac{1}{\beta^{\varepsilon}_{kl}} E_k \end{aligned}\right\}$$

$$\sigma_{ij} = c^{E}_{ijmn}\ \varepsilon_{mn} - e_{ijk}\,E_k$$

$$D_l = e_{ijk}\ \varepsilon_{ij} + \epsilon^{\varepsilon}_{kl} E_k$$

Si $h_{ijk} = 0$:

Sistema desacoplado

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{ij} &= c^{D}_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} \\ E_k &= \beta^{\varepsilon}_{kl} D_l \end{aligned}\right\}$$

$$c^{D}_{ijmn}\,, \qquad c^{E}_{ijmn} = \left(c^{D}_{ijmn} + \frac{h_{ijl}\,h_{mnk}}{\beta^{\varepsilon}_{kl}}\right)$$

Sistema acoplado dieléctrico-elástico
PIEZOELECTRICIDAD

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{ij} &= c^{D}_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} - h_{ijl}\,D_l \\ E_k &= -h_{ijk}\,\varepsilon_{ij} + \beta^{\varepsilon}_{kl} D_l\end{aligned}\right\}$$

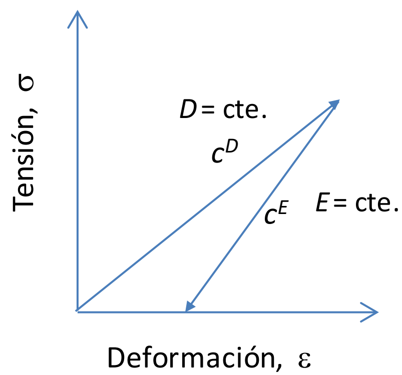
Ecuaciones constitutivas (*ε*, *D*)

$$c^{D}_{ijmn}\,, \qquad c^{E}_{ijmn} = \left(c^{D}_{ijmn} + \frac{h_{ijl}\,h_{mnk}}{\beta^{\varepsilon}_{kl}}\right)$$

Constante de acoplamiento electromecánico

Características de la piezoelectricidad:

Fenómeno lineal
Recíproco D $\rightarrow$ σ; ε $\rightarrow$ E



$$k^2 = \frac{W_1}{W}$$

$$k^2 = \frac{h^2}{c^D \beta^{\varepsilon}}$$

Paso de notación tensorial a notación matricial

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\,\varepsilon_{kl}$$

σ_{ij}, ε_{kl} : Tensores de segundo orden.
c_{ijkl}: Tensor de cuarto orden

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}; \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \qquad \sigma_{ij} = \sigma_{ji}\,; \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \qquad c_{ijkl}\ ??$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \sigma_{4} \\ \sigma_{5} \\ \sigma_{6} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \varepsilon_{4} \\ \varepsilon_{5} \\ \varepsilon_{6} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 11 \\ 22 \\ 33 \\ 32 \\ 13 \\ 12 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}$$

$$c_{ijkl} \rightarrow c_{mn}$$
$$ij \rightarrow m$$
$$kl \rightarrow n$$

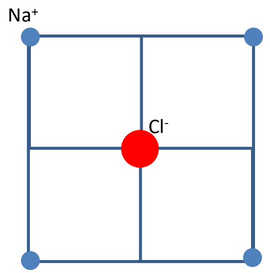
$$c_{ijkl} \rightarrow \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}$$

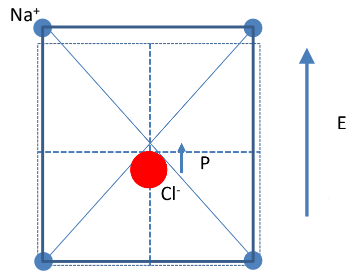
$$\sigma_i = c_{ij}^{D}\,\varepsilon_j - h_{ij}\,D_j$$

$$E_i = -h_{ij}\,\varepsilon_j + \beta_{ij}^{\varepsilon}\,D_j$$

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.a Electrostricción

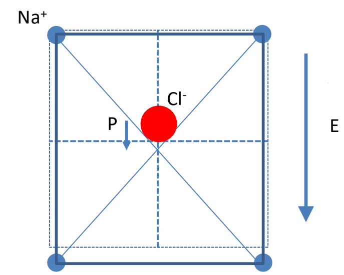
Ejemplo: NaCl
Celda unidad: cúbica centrada en el cuerpo
Estructura con centro de simetría





$\sigma_{33}, \sigma_{22}, \sigma_{11}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{11}$

Expansión en la dirección del campo
Contracción en la dirección normal



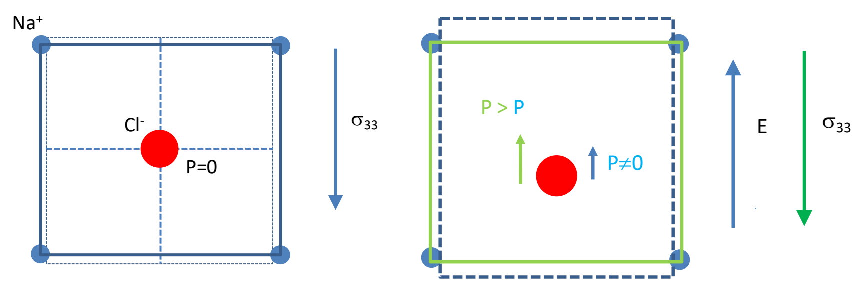
$\sigma_{33}, \sigma_{22}, \sigma_{11}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{11}$

Expansión en la dirección del campo
Contracción en la dirección normal

$$\varepsilon_{ij} = s^{E}_{ijkl}\,\sigma_{kl} + d_{ijl}\,E_l$$

$$D_k = d_{ijk}\,\sigma_{ij} + \epsilon^{\sigma}_{kl}E_l$$

?



Una tensión (deformación) sólo produce una variación del campo eléctrico (polarización) si el material ya estaba polarizado (ya poseía un campo eléctrico aplicado previamente

Electrostricción $\neq$ Piezoelectricidad

CSIC

USBIOMAT

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica

II.a Electrostricción

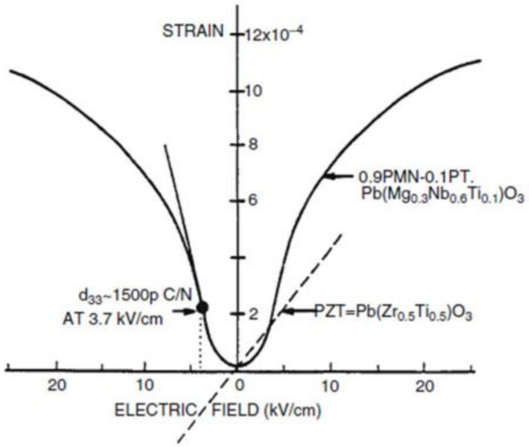
Piezoelectricidad

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{ij} &= c^{D}_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} - h_{ijl}\,D_l \\ E_k &= -h_{ijk}\,\varepsilon_{ij} + \beta^{\varepsilon}_{kl} D_l \end{aligned}\right\}$$

Electrostricción

Siempre se produce una expansión (mecánica) en la dirección del eléctrico aplicado y una contracción en la dirección normal

La tensión (deformación), es cuadrática (no lineal) con la polarización



Una tensión (deformación) sólo produce una variación del campo eléctrico (polarización) si el material ya estaba polarizado (ya poseía un campo eléctrico aplicado previamente

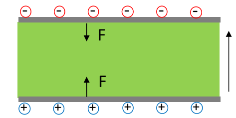
$$\left.\begin{aligned} \sigma_{ij} &= c^{P}_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} + \delta_{ijmn}\,P_m P_n \\ E_n &= \chi^{\varepsilon}_{nm} P_m + 2\delta_{klmn}\,\varepsilon_{kl} P_m \end{aligned}\right\}$$

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.b Fuerzas entre cargas electrostáticas

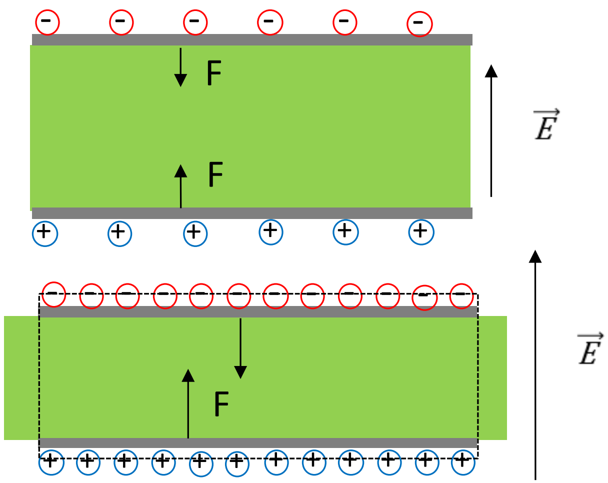
$$C = \frac{Q}{V}\ , \qquad q = \sigma S$$

Tensión/deformación mecánica en un condensador

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}, \qquad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \qquad F = \frac{q^2}{S\varepsilon_0}$$



Sólido entre dos placas cargadas

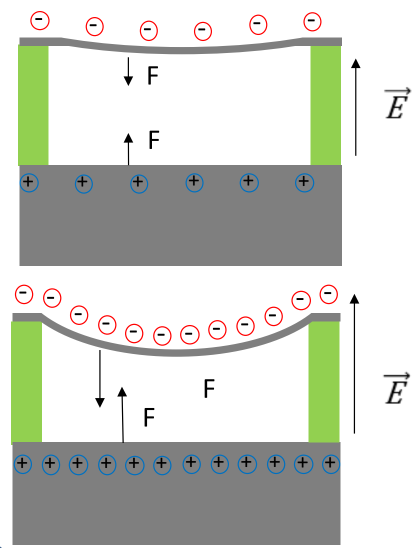


σ_{33}, ε_{33}, ε_{31}, ε_{32}

Si c_{iiii} es pequeño: maximizamos ε_{ii}.
Si Poisson ratio ≈ 0.5: maximizamos ε_{ik}.

ElectroActive Polymer (EAP) Actuator

Vacío entre una membrana cargada y un sólido



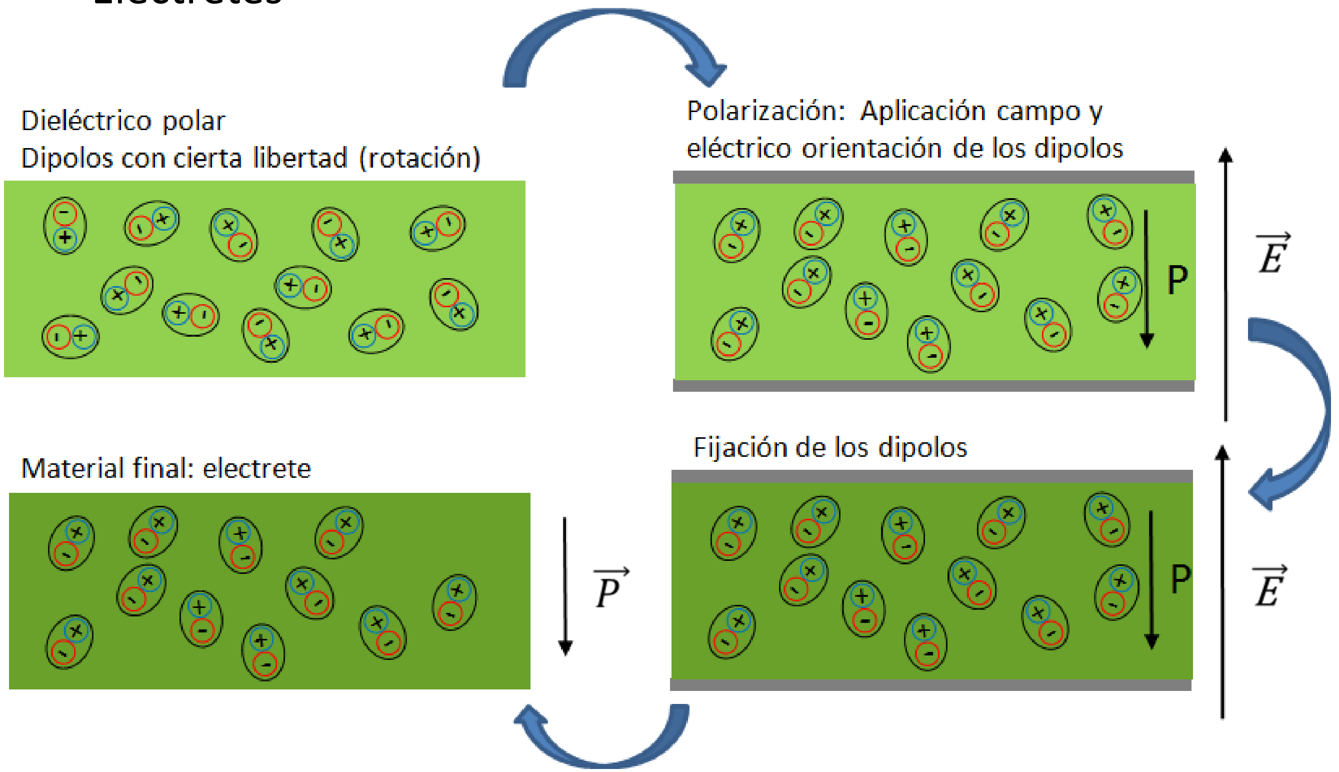
Micrófonos de condensador

Transductores capacitivos

Trans. capacitivos micromecanizados CMUT

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.b Fuerzas entre cargas electrostáticas

Electretes



Micrófonos
Filtros
Energy harvesting

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.b Fuerzas entre cargas electrostáticas

Electretes

Electret materials

Polymers

Fluoropolymers (PTFE, FEP)
Polyethylene (HDPE, LDPE, XLPE)
Polypropylene (PP)
Polyethylene terephtalate (PET)
Polyimid (PI)
Polymethylmethacrylate (PMMA)
Polyvinylidenefluoride (PVDF)
Ethylene vinyl acetate (EVA)
•
•

Cellular and porous polymers

Cellular PP
Porous PTFE

Anorganic materials

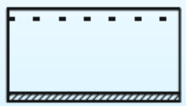
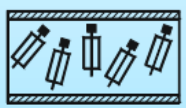
Silicon oxide (SiO_2)
Silicon nitride (Si_3N_4)
Aluminum oxide (Al_2O_3)
Glas (SiO_2 + Na, S, Se, B, ...)
Photorefractive materials
•
•
•

Introduction to electrets: Principles, equations, experimental techniques Gerhard M. Sessler

II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.b Fuerzas entre cargas electrostáticas

Electretes

Charged or polarized dielectrics

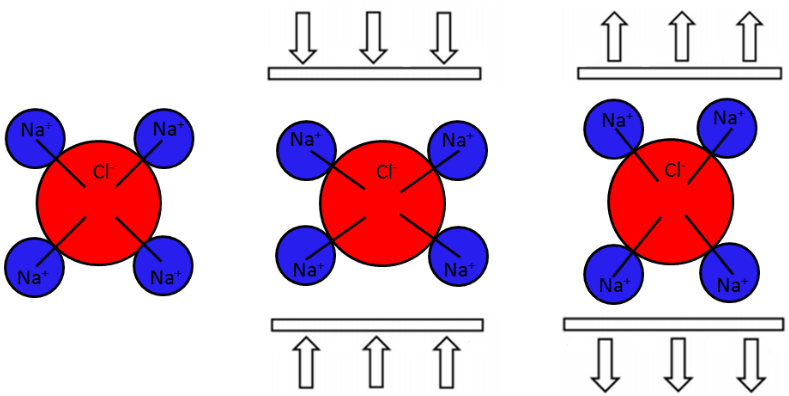
Category	Materials	Charge or polarization		Properties	Applications
		Geometry	Density $[mC/m^2]$		
Real-charge electrets	FEP, SiO_2		0.1 - 1	External electric field and force	Electret microphones, head-phones, air filters, dosimeters, advanced engineering material.
NLO materials	PMMA / DR1, glasses		0.1 - 10	Electrooptic and NLO effects	EO switch, modulator, polarization converter, SHG - devices.
Ferroelectric materials	PVDF, PZT		10 - 100	Piezo- and pyroelectricity	Microphones, Hydrophones, accelerometers, infrared detectors, pyroelectric sensors, night-vision devices, actuators.
porous or cellular electrets	PP, PTFE		1	strong longitudinal piezoelectric effect	Loudspeakers, ultrasonic transducers, electromechanical transducers, hydrophones.

Introduction to electrets: Principles, equations, experimental techniques Gerhard M. Sessler

CSIC

USBIOMAT

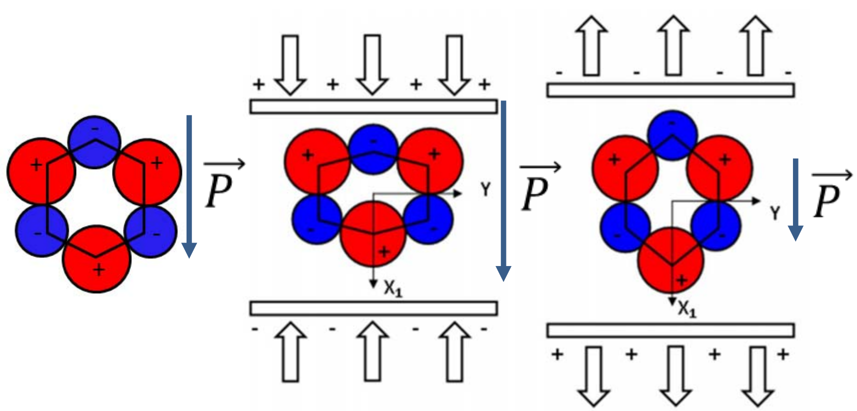
II. Origen microscópico de la transducción electromecánica
II.c Piezoelectricidad



$$\vec{P} = 0$$

NaCl (cúbico centrado en el cuerpo):

Estructura con centro de simetría → no polar
Electrostrictivo
No piezoelectrico



Cuarzo (hexagonal 32):

Estructura sin centro de simetría → Polar
Electrostrictivo
Piezoelectrico

Existen 32 clases cristalinas (grupos de simetría).

11 son centrosimétrícas

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad
III.a Piezoelectricidad en monocristales

Influencia de la simetría cristalina

Sistemas cristalinos (7)

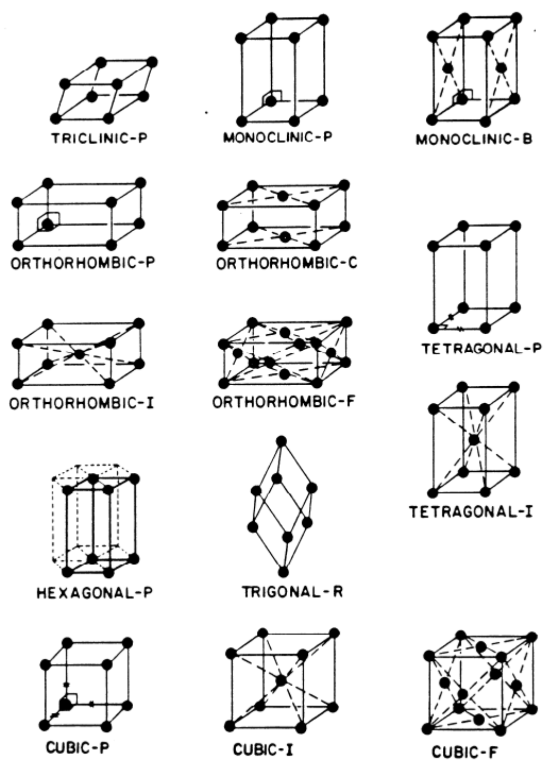


Figure 6. The 14 Bravais lattices.

Grupos cristalográficos

Crystal System	**32 Crystallographic Point Groups**						
Triclinic	**1**	-1					
Monoclinic	**2**	***m***	2/*m*				
Orthorhombic	222	***mm*2**	*mmm*				
Tetragonal	**4**	-4	4/*m*	422	**4*mm***	-42*m*	4/*mmm*
Trigonal	**3**	-3	32	**3*m***	-3*m*		
Hexagonal	**6**	-6	6/*m*	622	**6*mm***	-62*m*	6/*mmm*
Cubic	23	*m*-3	432	-43*m*	*m*-3*m*		

Magenta: Centrosimétricos (Laue groups)
Negrita: Polar
http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/symm2/group32.htm

http://xrayweb.chem.ou.edu/notes/symmetry.html

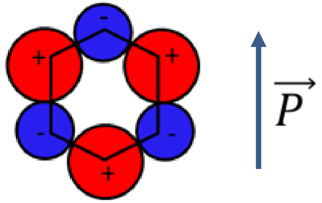
CSIC

USBIOMAT

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad
III.a Piezoelectricidad en monocristales

32 clases cristalinas

20 clases piezoeléctricas (no centrosimétricas)



Pyroelectricidad

(material polar con dipolos orientados en la misma dirección:
a) Polarización macroscópica espontánea; b) Carga superficial)

Ferroelectricidad

(material polar con varias orientaciones posibles y reversibles para los dipolos:
a) Polarizable; b) Dominios ferroeléctricos.

It is those materials having large piezoelectric coefficients by virtue of their reversible electrical domains, or with nonpolar–polar structural instability which are to be considered here. This is the group of materials known as ferroelectrics,

H. F. Kay, "Electrostriction," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 18, pp. 230–249, 1955.

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad

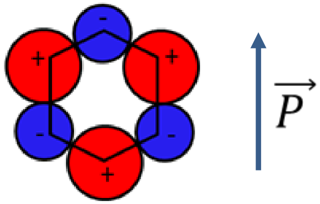
III.b Ferroelectricidad: definición y principales propiedades

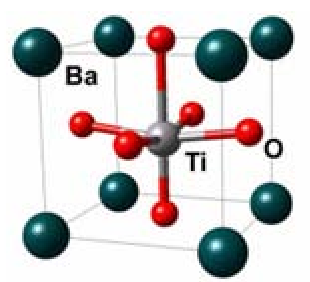
Piezoelectricidad y ferroelectricidad

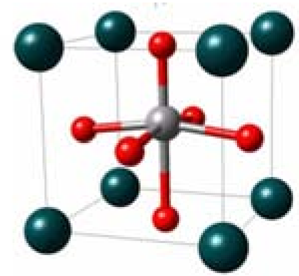
Piezoelectricidad (cuarzo),

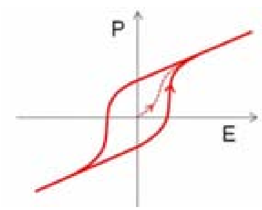
Ferroelectricidad ($BaTiO_3$)

(Perovskita)









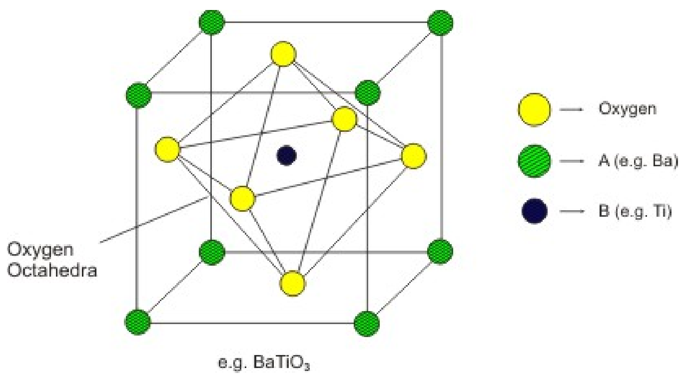
Electrostriction is the origin of piezoelectricity in ferroelectric materials, in both conventional ceramic ferroelectrics such as $BaTiO_3$ as well as in organic polymer ferroelectrics such as PVDF copolymers [Furukawa

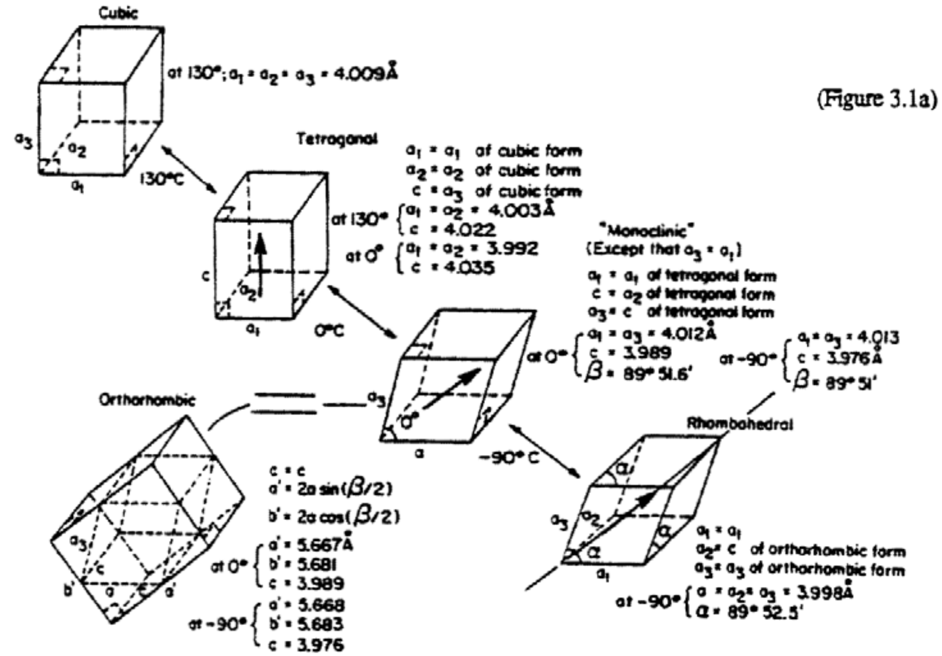
V. Sundar and R. E. Newnham, "'Electrostriction,'" in *The electrical engineering handbook*, R. C. Dorf, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad

III.b Ferroelectricidad: definición y principales propiedades

Estructura perovskita





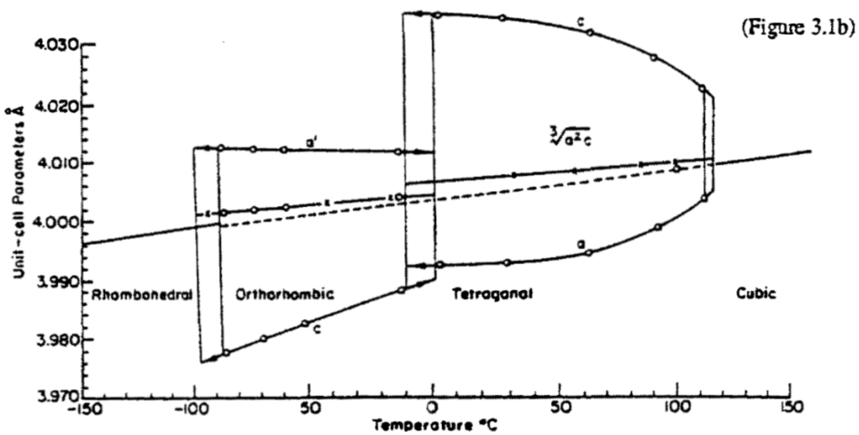
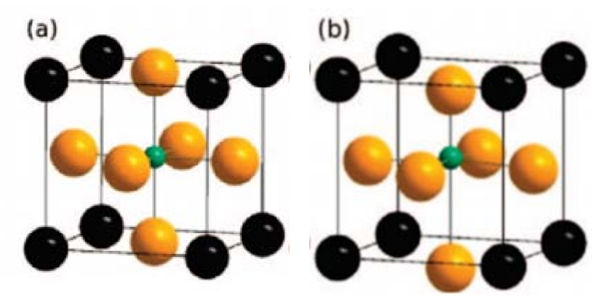


Figure 3.1: Sequence of phases which occur on cooling a BaTiO3 crystal from high temperature. (Figure 3.1a) Unit cell dimensions and orientation of Ps vector in each



$T > T_C$ $T < T_C$

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad

III.b Ferroelectricidad: definición y principales propiedades

Dominios reversibles

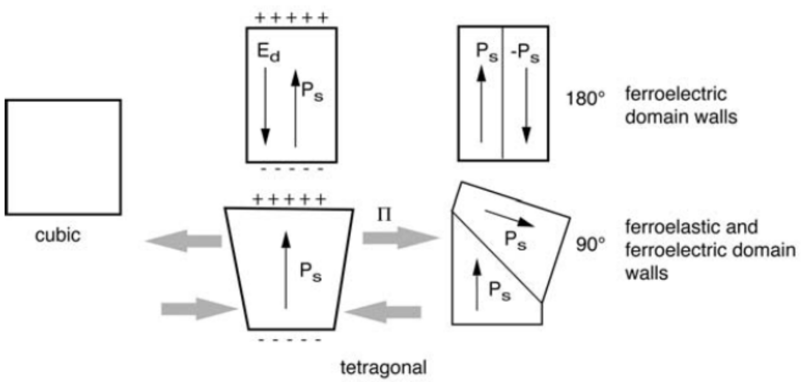


FIGURE 4.5 Illustration of the formation of 180° and 90° ferroelectric domain walls in a tetragonal perovskite ferroelectric. Tetragonal distortion is exaggerated. Effects of the depolarizing field, E_d, and the stresses, Π are minimized by the creation of domain walls.

Histéresis

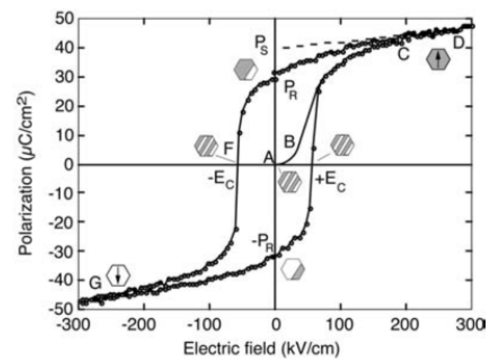


FIGURE 4.6 Ferroelectric (P–E) hysteresis loop. The hexagons with gray and white regions represent schematically repartition of two polarization states in the material (e.g. in grains of a ceramic) at different fields. The symbols are explained in the text. The loop shown is measured on a (111)-oriented 1.3 μm thick sol-gel $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O_3$ film. (Courtesy of David V. Taylor).

D. Damjanovic, “Hysteresis in piezoelectric and ferroelectric materials,” in *The Science of Hysteresis. Vol. 3*, vol. 3, G. B. I. Mayergoyz, Ed. Elsevier, 2005, pp. 337–465.

III. Origen microscópico de la piezoelectricidad

III.b Ferroelectricidad: definición y principales propiedades

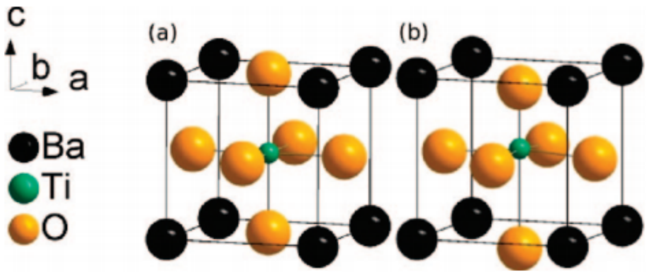
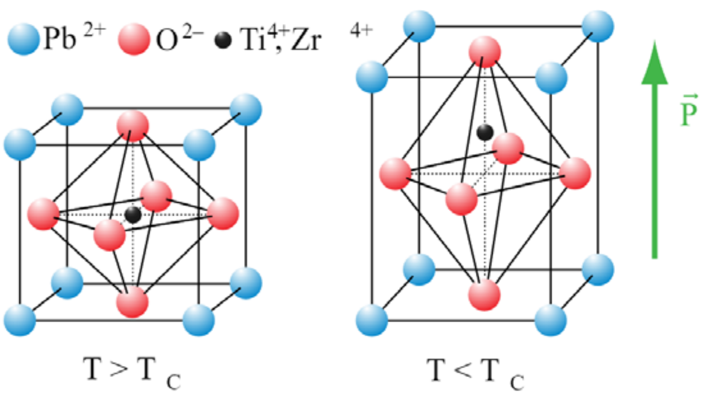
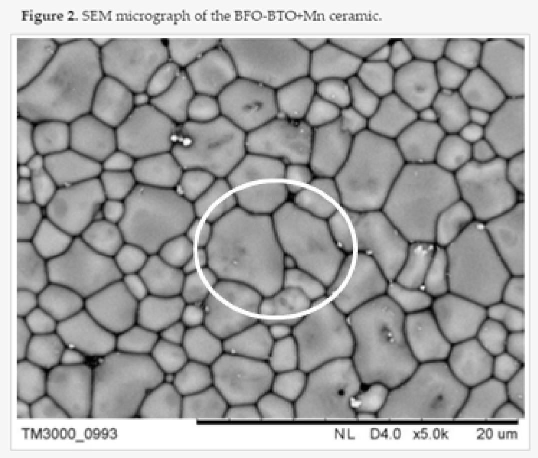


Figure 1. Unit cell of $BaTiO_3$ in both the (a) cubic *Pm*-3*m* structure and (b) tetragonal *P*4*mm* structure. In the tetragonal unit cell, atoms are displaced in the *z*-direction, and the cell is elongated along the *c*-axis. Atom positions: Ba at (0, 0, 0); Ti at (1/2, 1/2, *z*); O1 at (1/2, 1/2, *z*); and O2 at (1/2, 0, *z*). Displacements have been exaggerated for clarity.

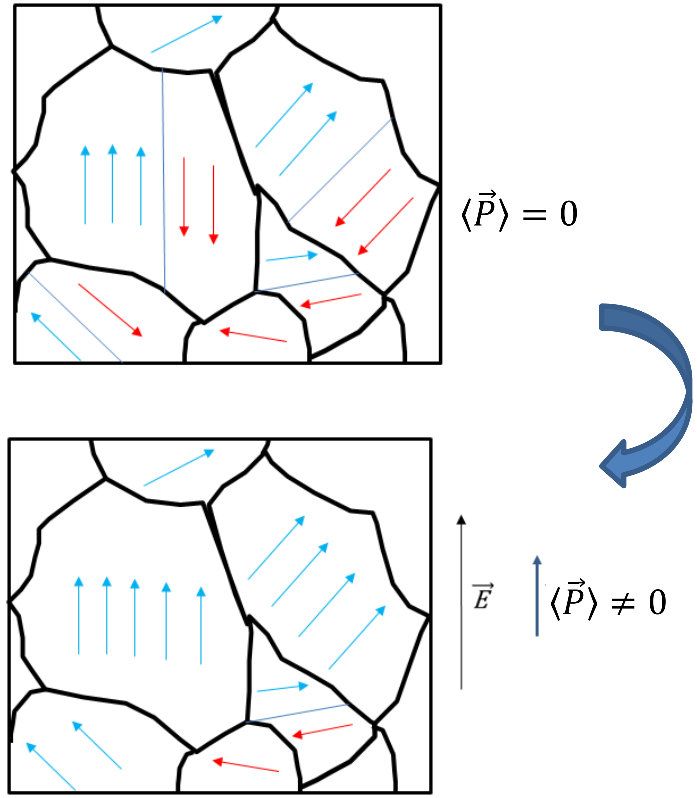


III. Origen microscópico de la piezoelectricidad
III.b Ferroelectricidad: definición y principales propiedades

Materiales cerámicos



Y. Chen, K. Mei, C.-M. Wong, D. Lin, H. Chan, and J. Dai, "Ultrasonic Transducer Fabricated Using Lead-Free BFO-BTO+Mn Piezoelectric 1-3 Composite," *Actuators*, vol. 4, no. 2, pp. 127–134, 2015.



Mecanismos para la transducción electromecánica.

Piezoelectricidad.

Electrostricción.

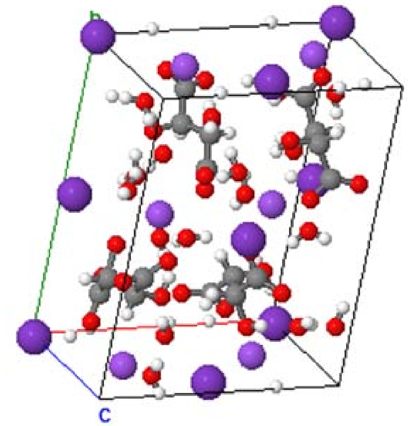
Ferroelectricidad.

"Electretes"

Fuerzas electrostáticas (Condensador)

Dieléctrico.
Electrodo (membrana)

IV. Materiales piezoeléctricos



Sal de Rochelle

1655-1935 Sal de Rochelle ($NaKC_4H_4O_6.4H_2O$)

1935: KDP (KH_2PO_4)

1940 Perovskitas:

- 1940. $TiBaO_3$.
- 1946. $PbTiO_3$.
- 1947. Cerámicas de $TiBaO_3$.
- 1950. Cerámicas de $PbTiO_3$.
- 1954. PZT ($PbTiO_3$: $PbZrO_3$).

1969: PVDF

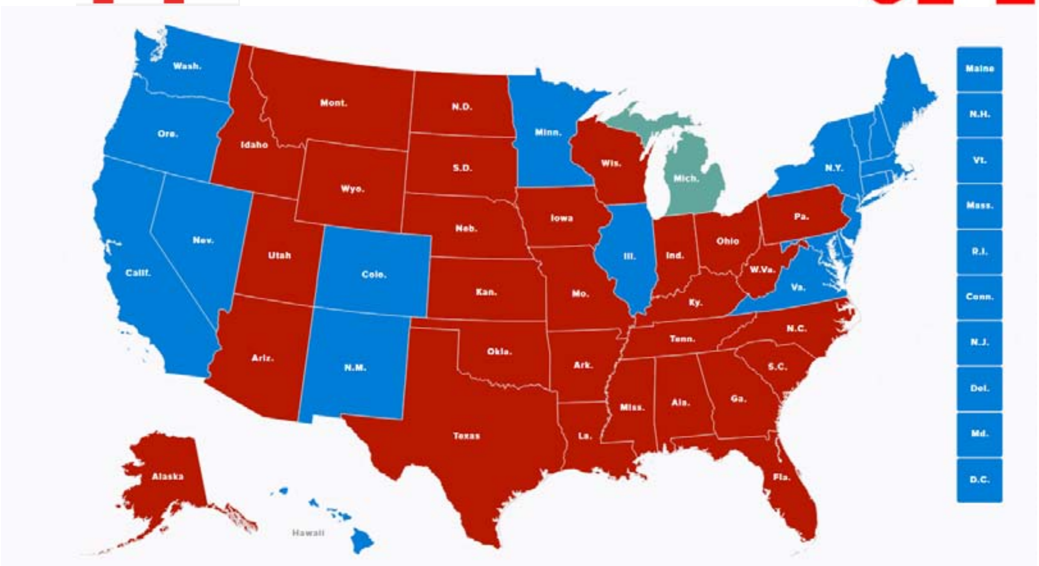
1978: Composites polímero/cerámica (PZT)

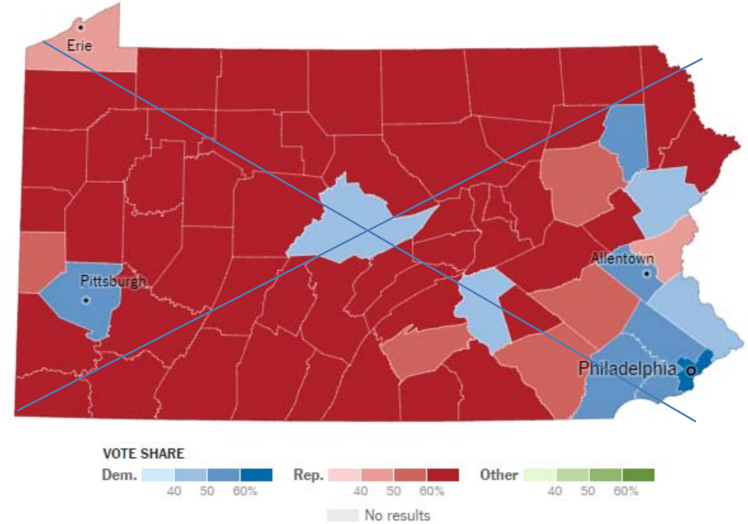
1987: Ferroelectretos

1997: Relaxor-Ferroelectrico (PMN-PT), monocristales

2000: Compuestos libres de plomo $TiBaO_3$. KNN (1954), BNT (1961),

USA ELECTIONS 2016





IV. Materiales piezoeléctricos

PZT

Hard: Alta potencia, resisten campos y tensiones elevadas: Actuadores

Soft: Alta sensibilidad y permitividad: Sensores

Navy Type I: Medium-high power. High resistance to depoling (deep submersion). Nano positioning, therapeutics. PZT-4. (Hard)

Navy Type II: Modified to yield higher charge sensitivity, not suistable to high electrical drive (heating). Suitable for passive devices (hydrophone), flow sensing medical Doppler. PZT-5, PZT-5A. (Soft)

Navy Type III. Similar to I, but lower losses. High power applications . Cleaning, cell disruption, high power ultrasonics. PZT-8 (Hard).

Navy Type IV: PZT-5H. (Soft)

Navy Type V: Between II and VI. PZT-5J (Soft)

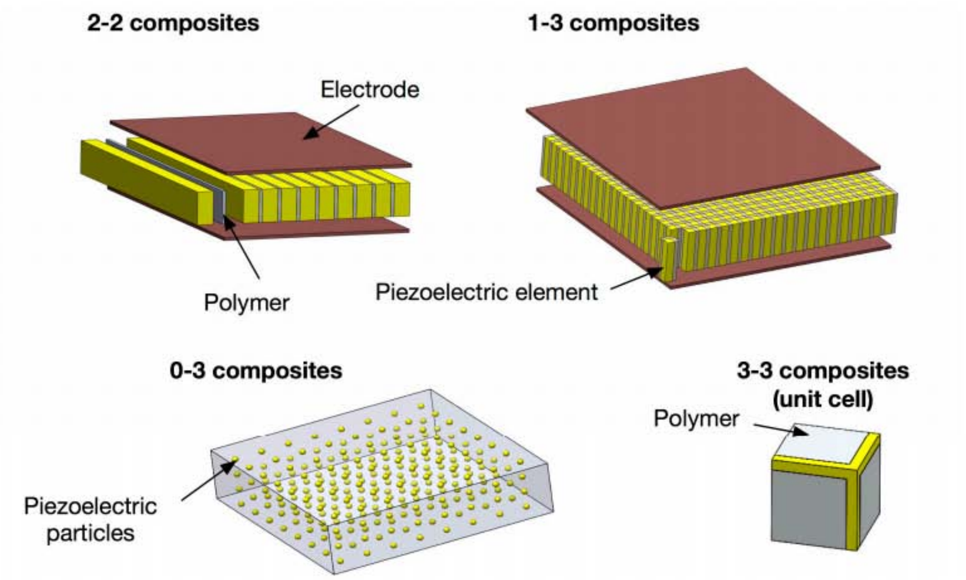
Navy Type VI: Similar to II, higher sensitivity, and dielectric constant, reduced Curie Temp. Medical diagnostics, industrial NDT, STM/AFM, nano-positioning. PZT-5H2. (Soft)

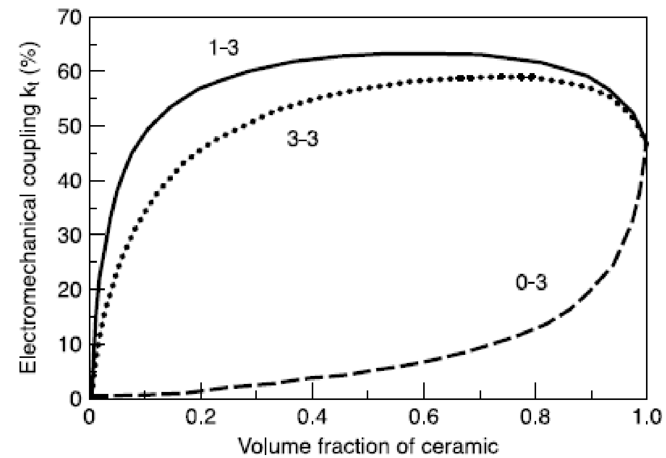
IV. Materiales piezoeléctricos

Materiales compuestos polímero cerámica:
M-N connectivity piezocomposites
(Newnham, Skinner y Cross, PennState 1978)

M: polímero
N: piezocerámica

Figure 2. Schematic representations of piezocomposites with 2-2, 1-3, 0-3 and 3-3 connectivities.



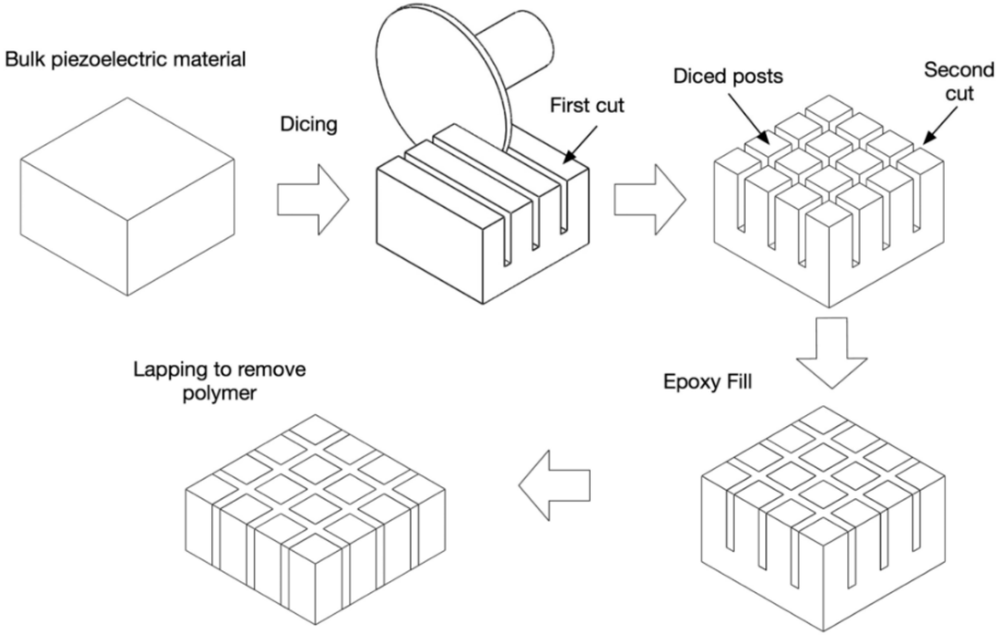


H. J. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, "High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers.," *Sensors* , vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, 2014.

IV. Materiales piezoeléctricos

Materiales compuestos polímero cerámica: Composites 1-3, métodos de fabricación.

Dice and fill

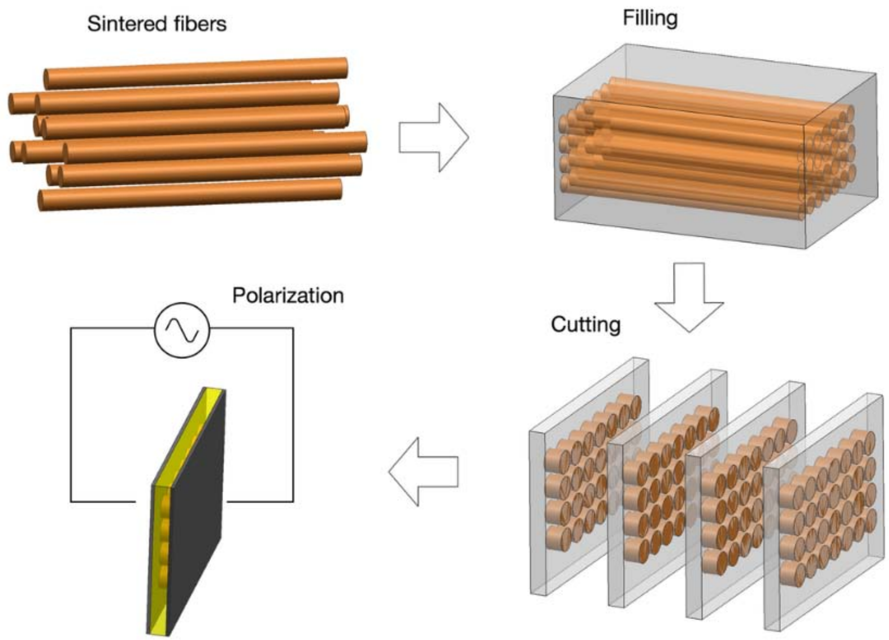


H. J. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, “High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers.,” *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, 2014.

IV. Materiales piezoeléctricos

Materiales compuestos polímero cerámica: Composites 1-3, métodos de fabricación.

Arrange and fill

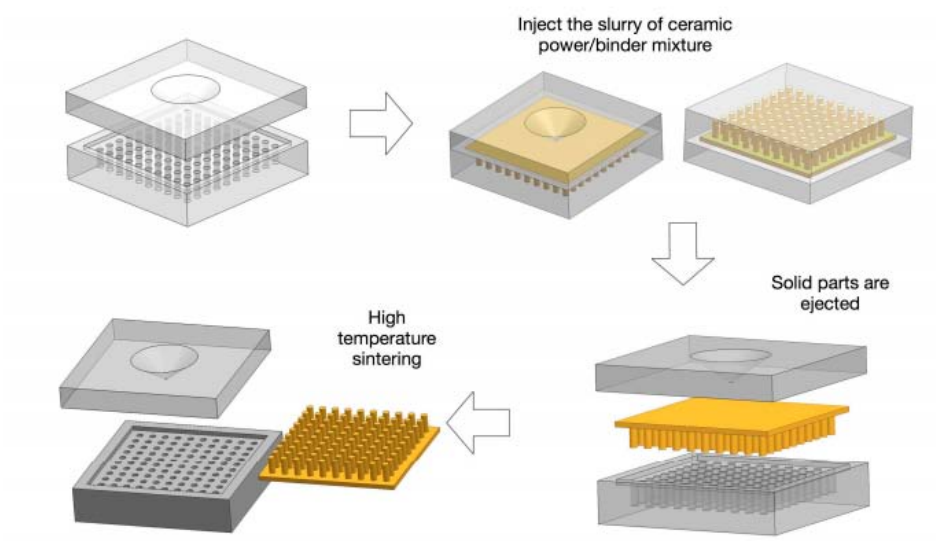


H. J. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, "High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers.," *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, 2014.

IV. Materiales piezoeléctricos

Materiales compuestos polímero cerámica: Composites 1-3, métodos de fabricación.

Injection molding



H. J. Lee, S. Zhang, Y. Bar-Cohen, and S. Sherrit, “High Temperature, High Power Piezoelectric Composite Transducers.,” *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 14526–14552, 2014.