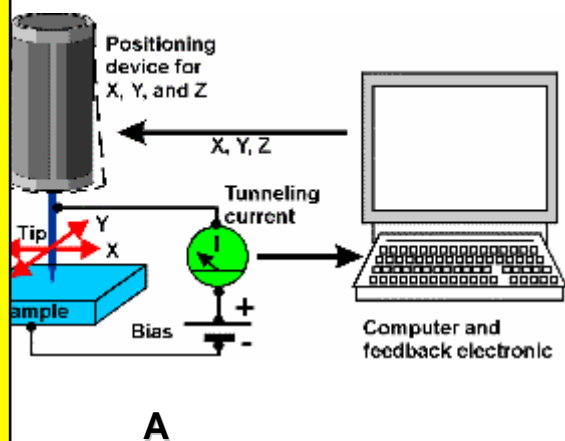


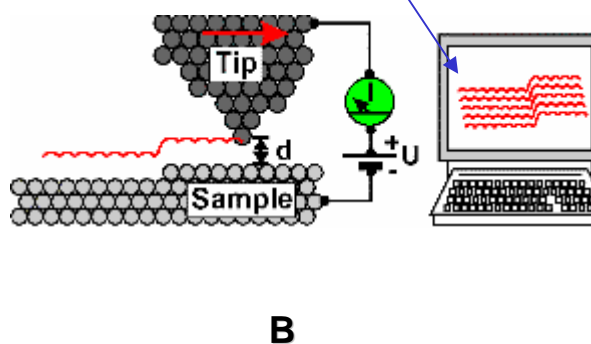
Problema 08_06_03

funcionamiento del microscopio de rastreo de túnel (**STM** o **Scanning Tunnelling**)¹ y derivados del mismo (**AFM** o **Atomic Force Microscope**) es el “barrido” línea a línea de una muestra por medio de una aguja muy fina (terminada en un único átomo, o en un nanotubo de carbono), en el plano X,Y de la figura **A**.

Mantiene a un potencial eléctrico más elevado que la muestra. Cuando la punta de rastreo se acerca suficientemente a la superficie (sin tocarla), circula una corriente eléctrica entre la punta y la muestra debido al efecto cuántico de conducción de túnel. Esta corriente de túnel depende principalmente de la separación entre punta y muestra, es decir, es muy sensible a cambios en la distancia de separación. Un circuito de realimentación mantiene constante la corriente de túnel, variando la altura de la punta respecto a la superficie (d en la figura **B**, medida en la dirección Z de la figura **A**) polarizando más o menos el posicionador piezoeléctrico (figura **A**). Cualquier variación en la topografía de la superficie (p.ej. por la presencia de átomos individuales) queda registrada como la variación de la corriente de túnel. El perfil del campo (diferencia de potencial) aplicado al posicionador.



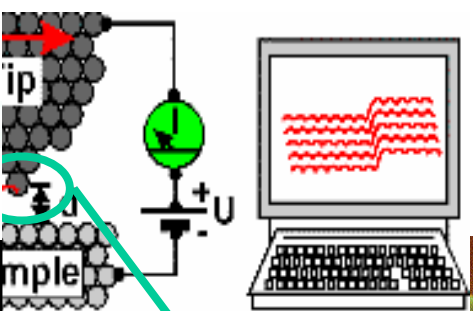
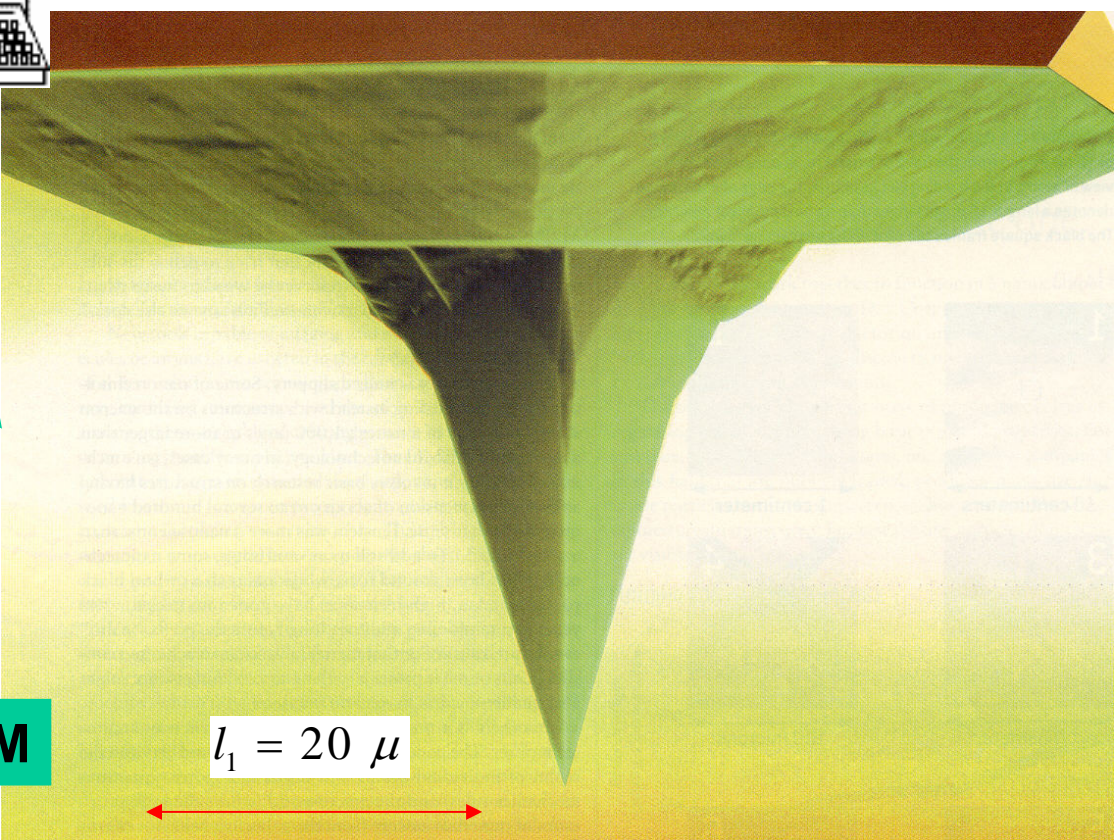
perfil de la superficie, muestreado línea a línea



Los descubridores del STM recibieron Gerd Binnig y Heinrich Rohrer el premio Nobel de física en 1986



Problema 08_06_03



B

de la punta un AFM

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



Problema 08_06_03

La siguiente transparencia da una idea del grado de control (sobre el material del que está hecho la punta y sobre el movimiento de la punta) necesario en la fabricación y manipulación de una punta terminada en un átomo

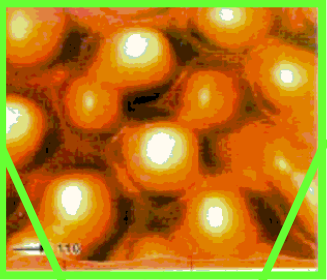
entre las imágenes de la izquierda y las de la derecha hay una relación de escala de 300 000 000



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70



x 100

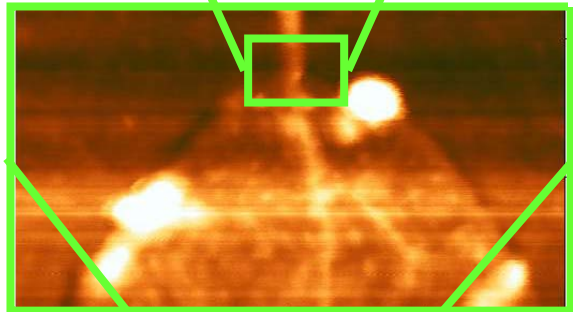


rosca del tornillo más fino fabricable por arranque de viruta (a escala)



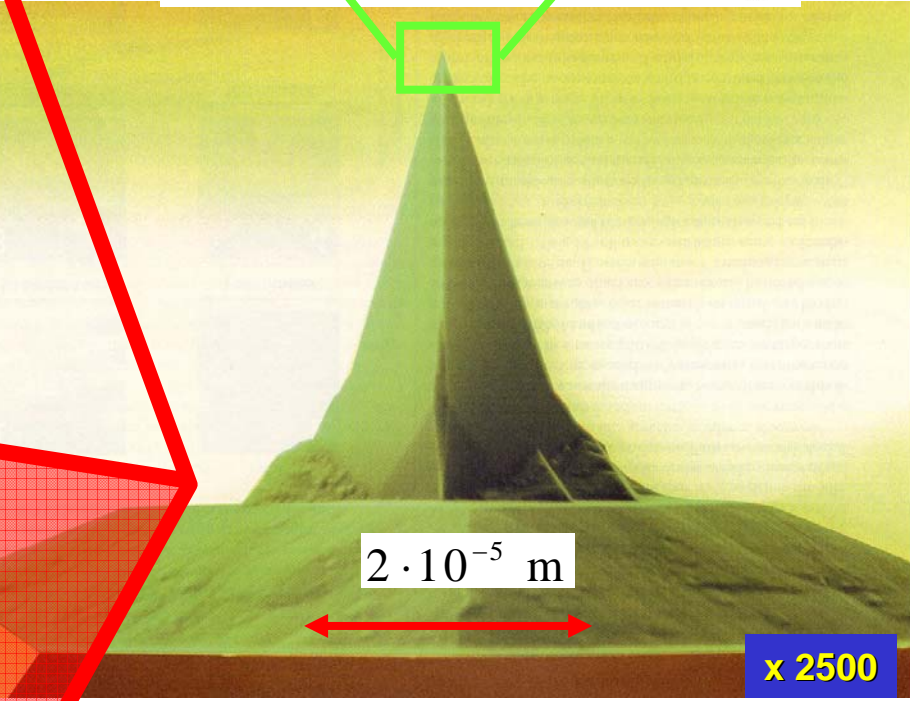
0.3 m

x 200

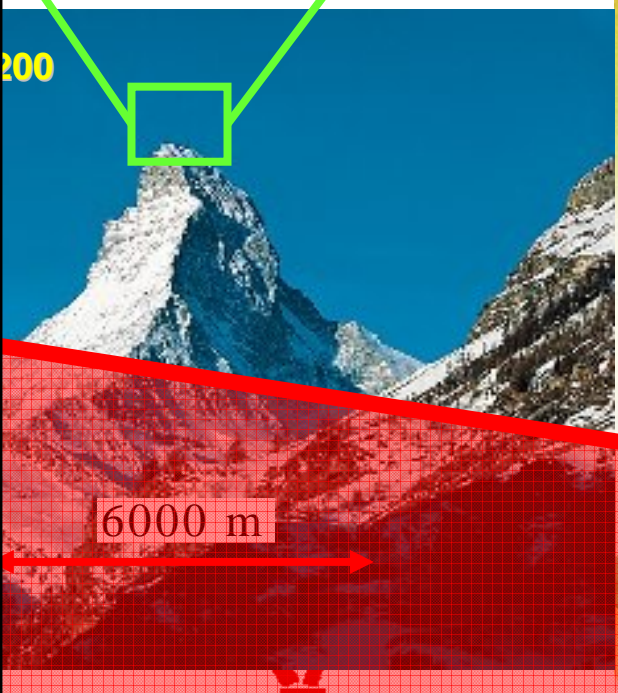


30 m

x 2500



2 · 10⁻⁵ m



6000 m

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002. Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

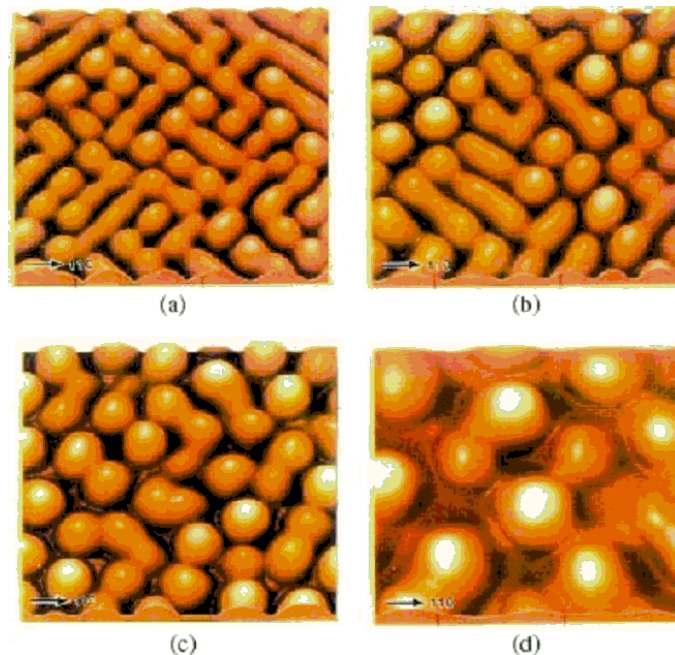
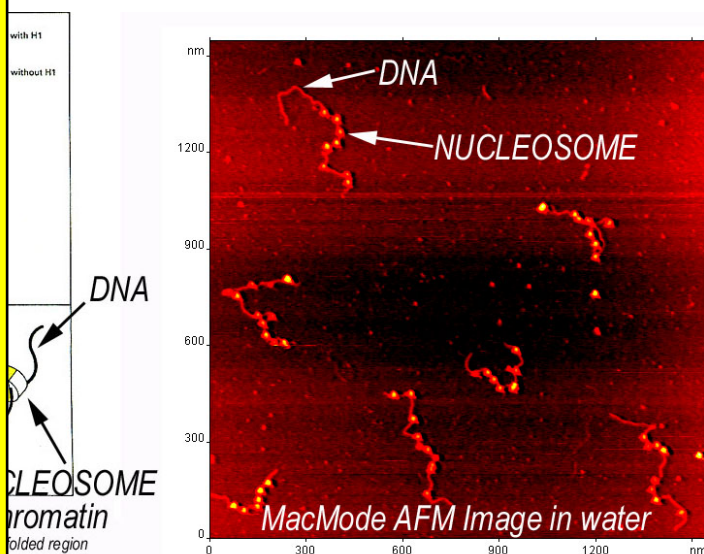
Problema 08_06_03



le:

la corriente de túnel está muy localizada, por pasar a través del átomo final de la punta, es posible controlar la posición de la punta con gran precisión en las tres dimensiones espaciales,

imágenes con resolución lateral mejor que 0.1 nm:



fragmentos individuales de DNA

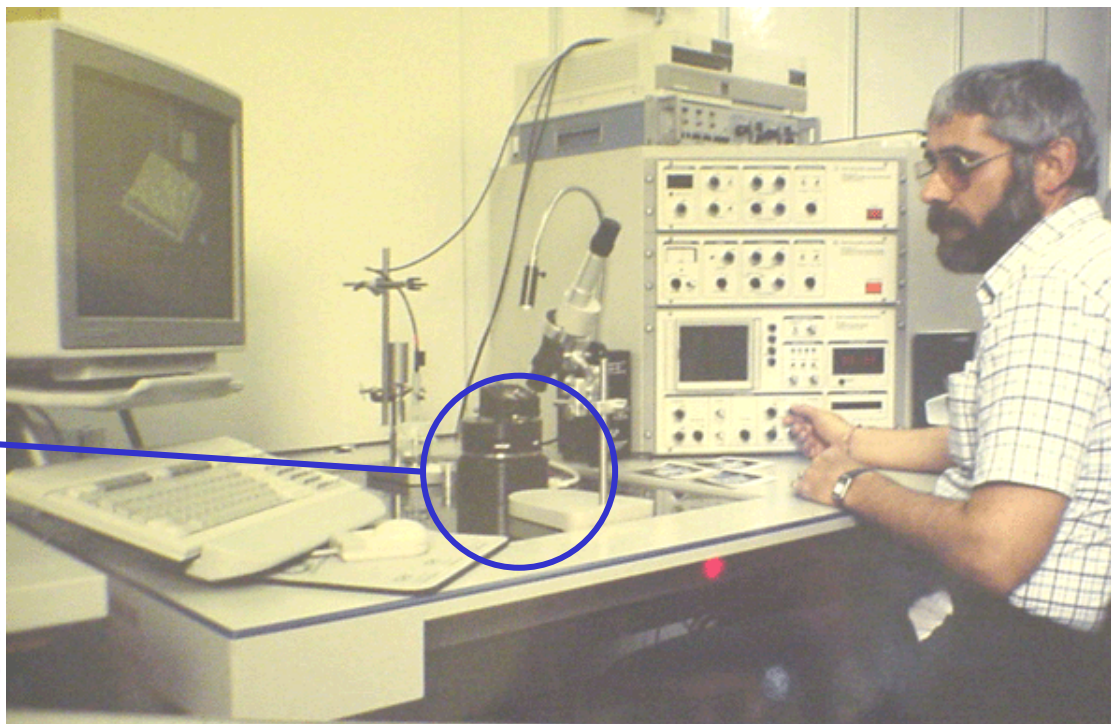
superficie (110) del silicio

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03

tipo de bajo costo, bajo mantenimiento y poco exigente en cuanto a infraestructura:



AFM de 2ª generación

(aprox. 60.000 Euros;

comparativo de un microscopio electrónico de transmisión con resolución de 1 nm: 1.3 millones de Euros)

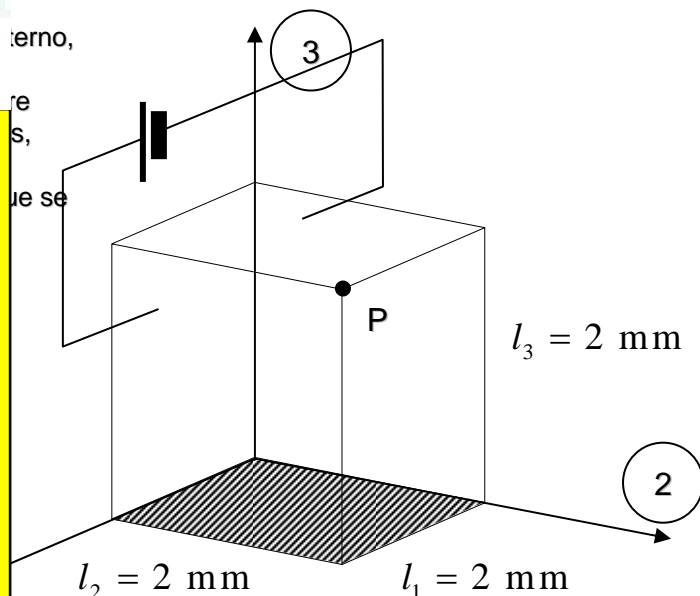
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
-- --
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03

ma estudiamos las bases del funcionamiento del posicionador piezoeléctrico, suponiendo que está o de un monocristal de ZnS cúbico (blenda de cinc o esfalerita) del siguiente modo:



Los módulos piezoeléctricos del ZnS cúbico son¹:

$$d_{14} = 6.48 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

La punta del microscopio va unida solidariamente al vértice P del cristal y el actuador está fijado rígidamente a la estructura por la cara rayada (en el plano 1-2). Determinar:

- si el ZnS cúbico es adecuado como materiales para el posicionador piezoeléctrico,
- qué caras hay que polarizar para conseguir qué tipo de desplazamientos de la punta
- qué voltaje hay que aplicar para conseguir un desplazamiento de 0.1 nm en las direcciones 1 y 2.

gar aplicamos la simetría del tensor de módulos piezoeléctricos respecto a los dos últimos índices obtener los restantes módulos no nulos:

$$d_{123} = d_{132} = d_{231} = d_{213} = d_{312} = d_{321} = 3.24 \times 10^{-12} \text{ C/N}$$

a del material piezoeléctrico a un campo eléctrico es una deformación que se expresa ativamente como:

$$\epsilon_{jk} = E_i d_{ijk}$$

P. Zheludev, N.I. *Encyclopedia of Material Tensors*, John Wiley (1998)

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03



$$\left[\underline{\nabla u} + (\underline{\nabla u})^T \right]$$

y: $\underline{u}(x_1, x_2, x_3)$ es el campo de desplazamiento, que indica qué desplazamiento sufre un punto del material de coordenadas x_1, x_2, x_3 (antes del desplazamiento) debido a la deformación del material piezoeléctrico por la acción del campo.

En un lugar que se aplica un voltaje (y por tanto un campo eléctrico) entre las caras 1. El campo tiene

una: $\underline{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ y según $\varepsilon_{jk} = E_i d_{ijk}$ el gradiente de desplazamiento es: $\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_1 d_{123} \\ 0 & E_1 d_{123} & 0 \end{bmatrix}$

de la diagonal, p.ej. 2,2 y 3,3 se obtiene¹: $\frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0 \Rightarrow u_2(x_2, x_3) = f_2(x_3)$

$\frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \Rightarrow u_3(x_2, x_3) = f_3(x_2)$

fuera de la diagonal, por ejemplo de la 2,3 se obtiene: $\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 2E_1 d_{123}$

Como el primer miembro es una constante, y los desplazamientos son funciones de variables diferentes, el único caso posible es que las funciones sean lineales en sus variables y que la suma de sus derivadas sea: $2E_1 d_{123}$

Entonces, considerando el supuesto de que las dos derivadas son iguales, es decir: $\frac{\partial u_3}{\partial x_2} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = E_1 d_{123}$

Para los componentes para facilitar la representación de los resultados que se van a obtener, es decir, trabajamos en un plano de coordenadas 2, 3. La argumentación para cualquier otro par de ejes o para 3 dimensiones es análoga.

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03

$$u_2(x_2, x_3) = f_2(x_3) = \epsilon_{23}x_3 + C_2$$

$$u_3(x_2, x_3) = f_3(x_2) = \epsilon_{23}x_2 + C_3$$

integración se pueden determinar imponiendo las coordenadas de un punto; por ejemplo en este caso el

o, es decir, su desplazamiento es nulo:

$$u_2(0, 0) = f_2(0) = C_2 = 0$$

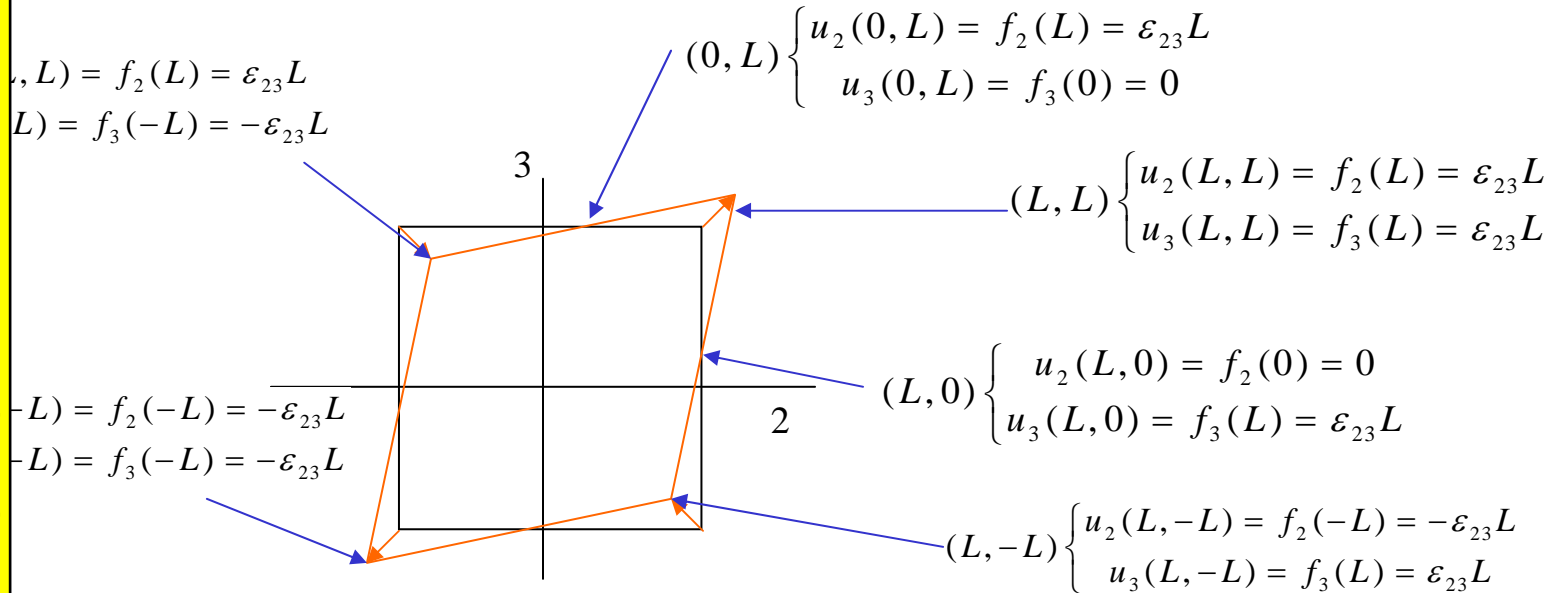
$$u_3(0, 0) = f_3(0) = C_3 = 0$$

$$u_2(x_2, x_3) = f_2(x_3) = \epsilon_{23}x_3$$

$$u_3(x_2, x_3) = f_3(x_2) = \epsilon_{23}x_2$$

el campo de desplazamiento que produce la aplicación de un campo eléctrico en dirección 1 al

o. Su significado geométrico es sencillo: para visualizarlo, representemos los desplazamientos que sufren los escogidos de una figura geométrica simple (un cuadrado, por ejemplo):



ponentes para facilitar la representación de los resultados que se van a obtener, es decir, trabajamos en un plano cartesiano de ejes coordenados

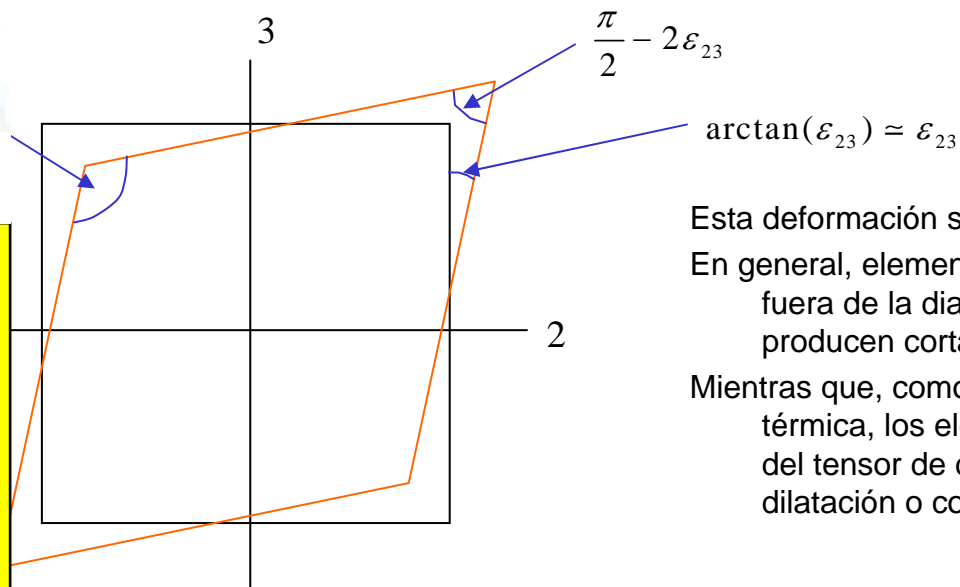
en para cualquier otro par de ejes o para 3 dimensiones es análoga.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Problema 08_06_03

drado se distorsiona y adquiere la forma de un paralelogramo cuyos ángulos son:



Esta deformación se denomina de **cortadura pura**.

En general, elementos que se encuentran en la posición i,j fuera de la diagonal del tensor de deformación producen cortadura en el plano $i-j$.

Mientras que, como se muestra en el prob. de expansión térmica, los elementos en la posición i,i de la diagonal del tensor de deformación corresponden a una dilatación o contracción en la dirección del eje i .

... es adecuado para producir desplazamientos del piezoeléctrico. En particular,

polarizando (sometiendo a un campo eléctrico) en dirección 1, se produce cortadura en el plano 2-3

polarizando (sometiendo a un campo eléctrico) en dirección 2, se produce cortadura en el plano 1-3

polarizando (sometiendo a un campo eléctrico) en dirección 3, se produce cortadura en el plano 1-2

...egración de $\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 2E_1 d_{123}$ podemos ahora repartir asimétricamente las derivadas, es decir en el caso más general:

$$\frac{\partial u_3}{\partial x_2} = E_1 d_{123} + C \quad \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = E_1 d_{123} - C$$

$$u_2(x_2, x_3) = f_2(x_3) = \varepsilon_{23} x_3 - C x_3 + C_2$$

$$u_3(x_2, x_3) = f_3(x_2) = \varepsilon_{23} x_2 + C x_2 + C_3$$

La integración conduce en este caso a:

Cartagena99
 CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03

azamiento es ahora una suma (vectorial) de:

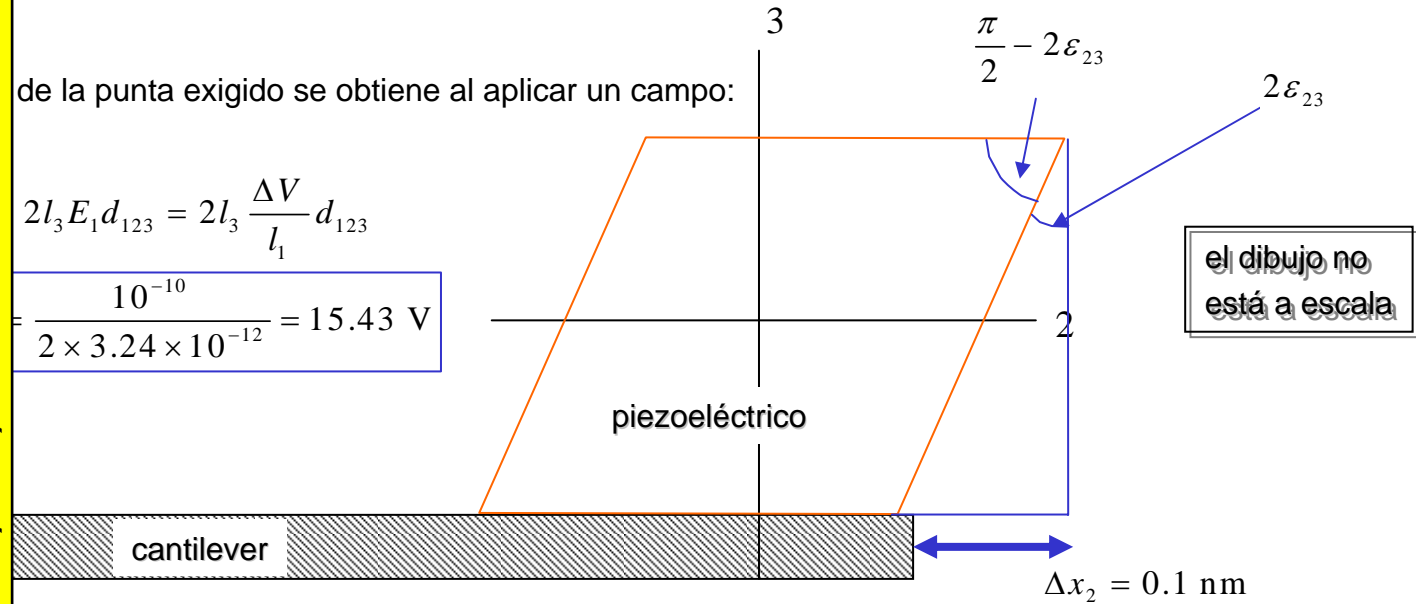
- 1 mismo campo de cortadura pura anterior
 - 1 campo arbitrario de rotación rígida (la parte correspondiente a C)
 - 1 campo arbitrario de translación rígida (correspondiente a las dos constantes de integración C_1 y C_2).
- Componentes (rotación rígida y translación) no corresponden a un cambio de forma del piezoeléctrico y cualquier valor, siempre que sea consistente con las condiciones de contorno.

Particular, las condiciones de contorno están determinadas por el hecho de que la cara 1-2 está fija. Es decir, al aplicar el campo en la dirección 1, la distorsión es la ilustrada en la página anterior, pero el lado del elemento en la dirección 2 queda fijo:

de la punta exigido se obtiene al aplicar un campo:

$$2l_3 E_1 d_{123} = 2l_3 \frac{\Delta V}{l_1} d_{123}$$

$$\frac{10^{-10}}{2 \times 3.24 \times 10^{-12}} = 15.43 \text{ V}$$



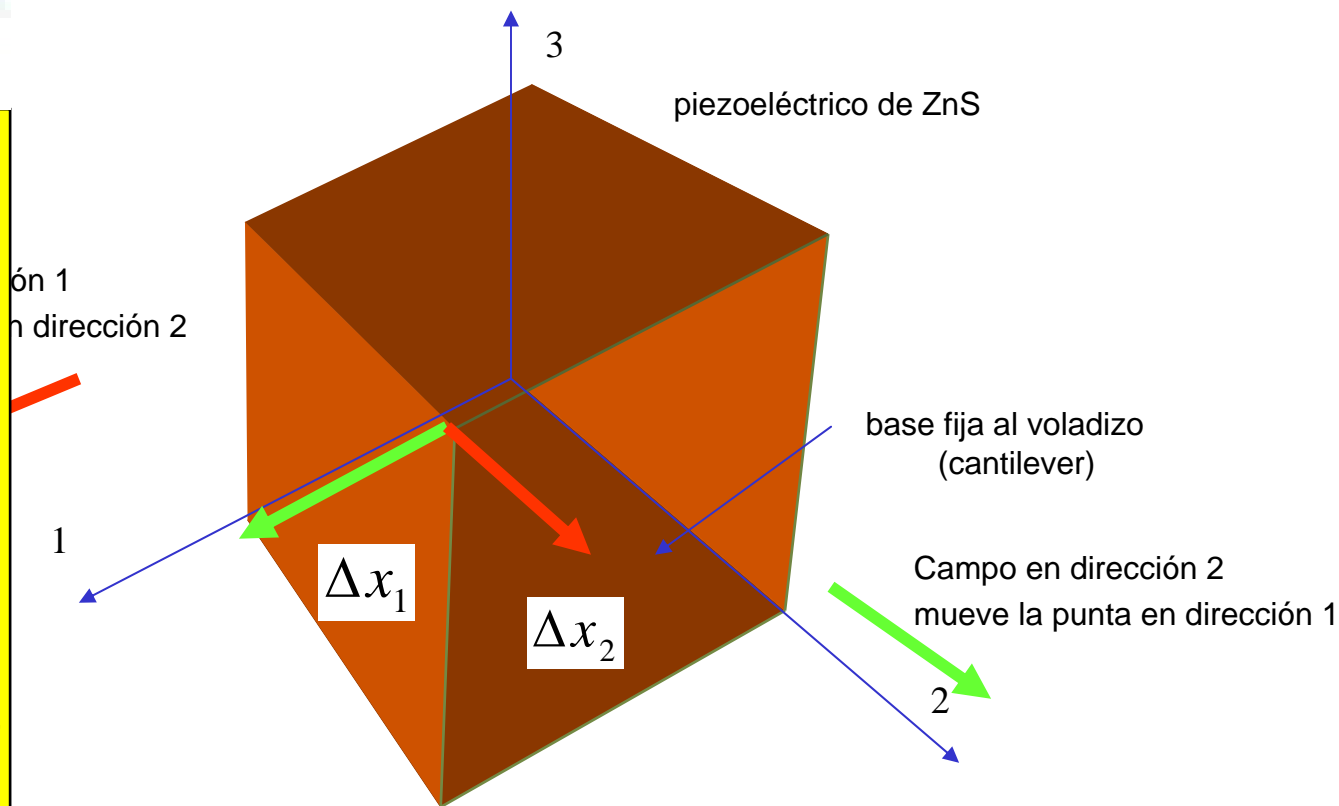
deformación + giro de modo que un lado quede fijo se denomina de **cortadura simple**.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03

en la dirección 1 se obtiene aplicando un campo en la dirección 2, y puesto que el módulo piezoeléctrico ante esta deformación tiene el mismo valor numérico, la diferencia de potencial necesaria es la misma.

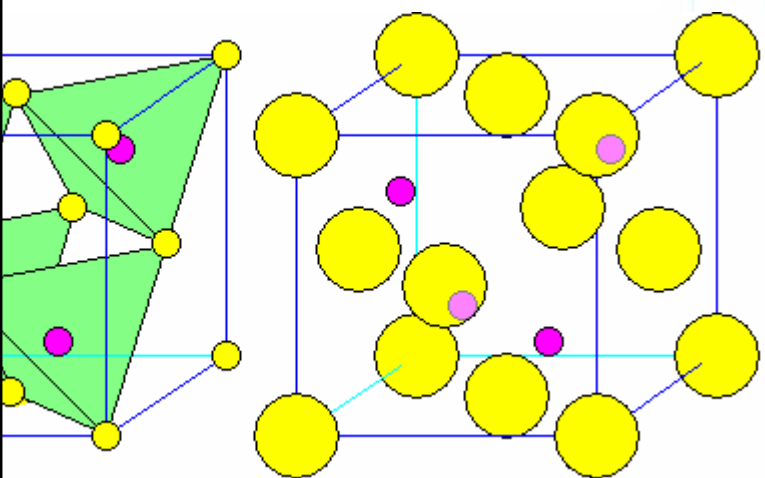
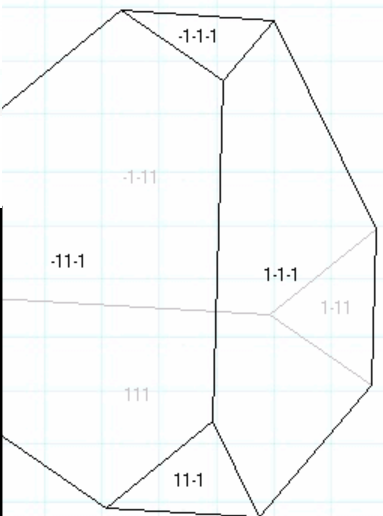
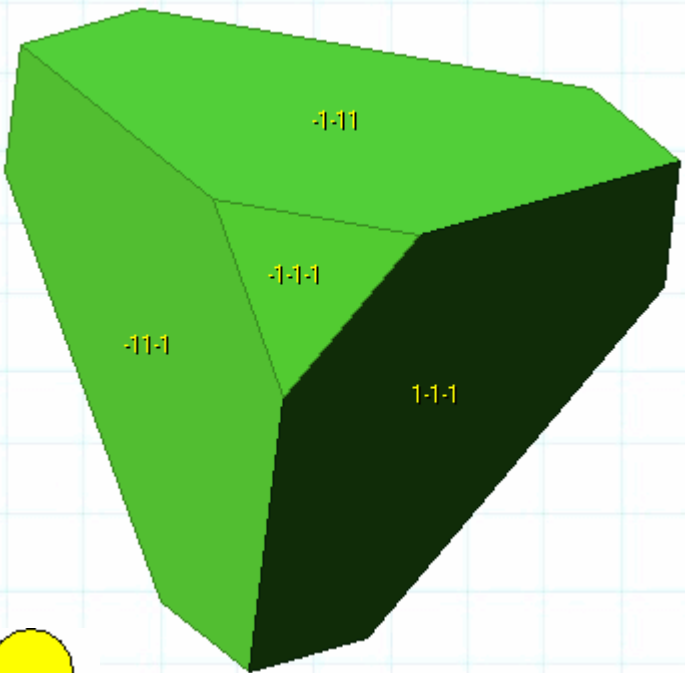


Comprimir en dirección 3 produce cortadura en el plano 1-2. Sin embargo, al estar fijada rígidamente la cara superior en el plano 1-2, ésta no se puede deformar. ¿Qué efecto crees que tendrá en este caso particular un campo en la dirección 3?

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



Problema 08_06_03



Cristales típicos y estructura cristalina de la esfalerita
¿A qué clase cristalográfica pertenece?
¿Son consistentes con los datos del problema?

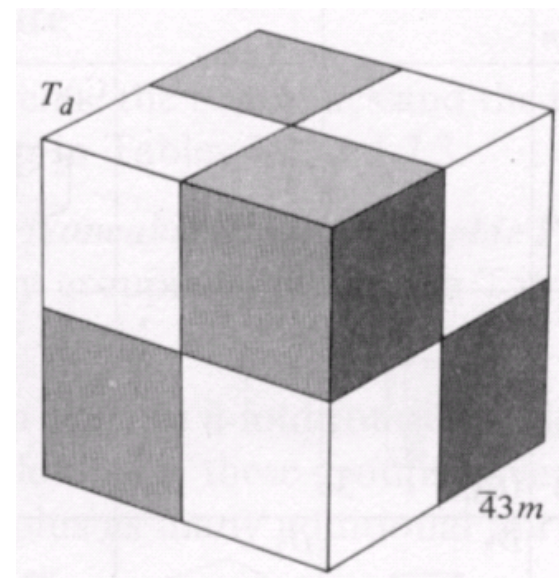


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
--
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Problema 08_06_03

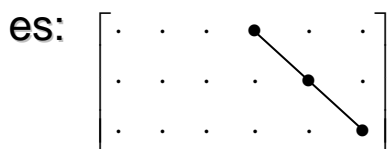


les típicos y en la estructura
 la esfalerita se identifican los elementos
 de la clase $\overline{43m}$



a la que también pertenece el objeto:
 (la Tabla II en 03_01_01) y que también
 aedro.

base, la estructura de cualquier propiedad



o tiene un módulo piezoeléctrico independiente, los otros dos son iguales. Lo
 consistente con los datos del problema:

$$d_{25} = d_{36} \Rightarrow d_{123} = d_{132} = d_{231} = d_{213} = d_{312} = d_{321}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

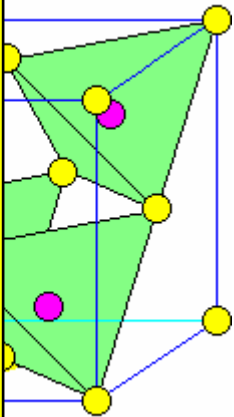


Problema 08_06_03

La estructura de los módulos piezoeléctricos se deduce que este material sólo responde a esfuerzos cortantes, o bien, que bajo polarización eléctrica se deforma a

acortamiento y esta estructura de la propiedad son consecuencia de la estructura del material. En ausencia de deformación, el cristal no presenta momento dipolar porque los iones tienen carga parcial positiva (Zn^{++}) y negativa (S^{-}), cada uno de los tetraedros regulares (en verde en la figura) tienen momento dipolar nulo.

Por lo tanto, un **esfuerzo de compresión** (componente σ_{33} del esfuerzo) tiene como consecuencia a nivel molecular un acortamiento de la celda en la dirección vertical. Los tetraedros se deforman proporcionalmente y, aunque dejan de ser regulares, sin embargo el momento dipolar sigue siendo nulo por simetría.

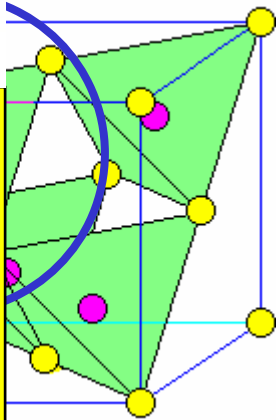


Un **esfuerzo a cortadura** produce sin embargo una distorsión de los tetraedros que modifica las distancias entre iones y las cargas parciales. Por tanto aparece un momento dipolar molecular y macroscópico. Esta variación del momento dipolar es la causa de que la esfalerita presente props. piezoeléctricas. Y en este caso particular, sólo a cortadura.

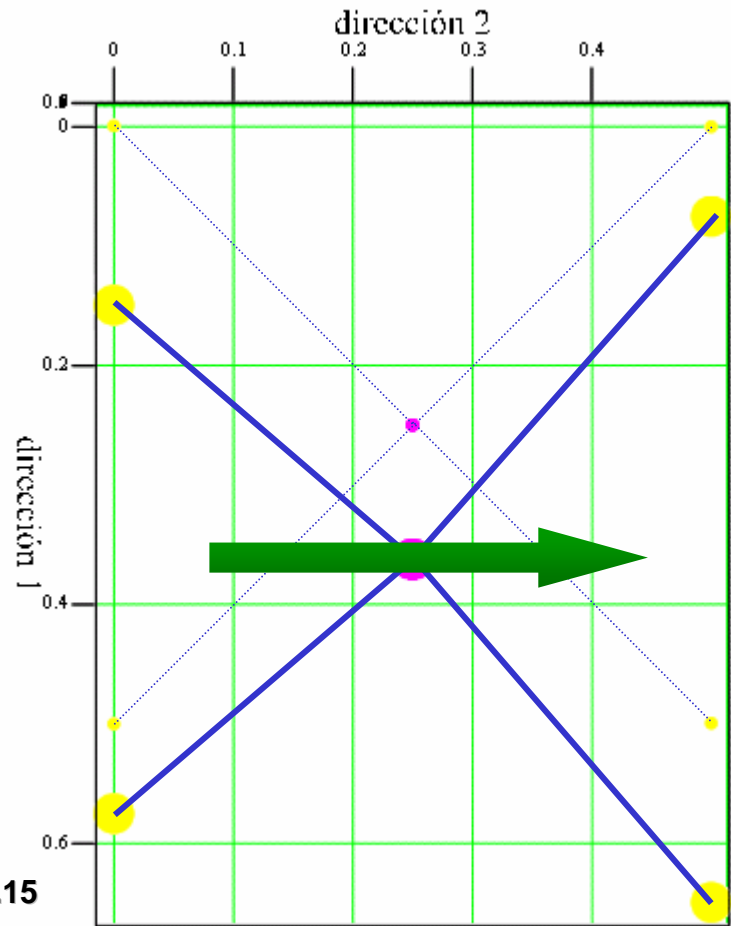


Problema 08_06_03

la derecha muestra la proyección sobre el plano 1-2 del tetraedro marcado con el antes (círculos pequeños) y después (círculos grandes) de una deformación a en el plano 1-3 de valor $\epsilon_{13}=0.15$ (el mismo efecto ocurre en los otros tres tetraedros de la celda)



Para la deformación a cortadura, se pierde la simetría con respecto a un plano perpendicular a ② y como consecuencia de la redistribución de cargas parciales, aparece un dipolo en dirección ②.



amiento a nivel microscópico se refleja en e la matriz de módulos piezoeléctricos:

$$d_{25} \neq 0 \Rightarrow \text{cortadura en } \textcircled{1}\textcircled{3} \text{ (5 en notación de Voigt) produce polarización en } \textcircled{2}$$

- iones $S^{=}$ en la estructura sin deformar
- ion Zn^{++} en la estructura sin deformar
- iones $S^{=}$ en la estructura deformada con $\epsilon_{13} = 0.15$
- ion Zn^{++} en la estructura deformada con $\epsilon_{13} = 0.15$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



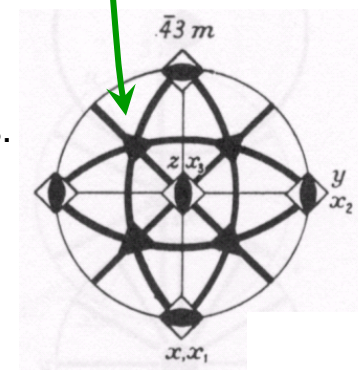
Problema 08_06_03



vidente que el anterior mecanismo es igualmente válido para cortadura en como debe ocurrir en un material cúbico en el que las tres direcciones son equivalentes. De hecho, la geometría empleada en el razonamiento para la cortadura en ①③, puede someterse a un giro de 120° en torno a uno de los ejes ternarios (diagonales de la celda) y se obtiene la situación correspondiente a cortadura en ③②.

Este mecanismo de giro (alrededor del eje ternario indicado a la derecha) es una de las 24 del grupo de simetría de la clase cristalográfica de la esfalerita, es decir, bajo las que la estructura es invariante. Esta simetría o invarianza es consecuencia de la estructura cúbica del material e implica la igualdad de los tres módulos piezoeléctricos no nulos.

Este es un ejemplo adecuado para entender cómo están relacionadas la estructura geométrica de un material con su mecanismo molecular que explica sus propiedades (p.ej. piezoelectricidad) y la estructura de la matriz que representa (en notación de Voigt) dicha propiedad, ya que una simetría de ellas implica automáticamente las otras.



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

