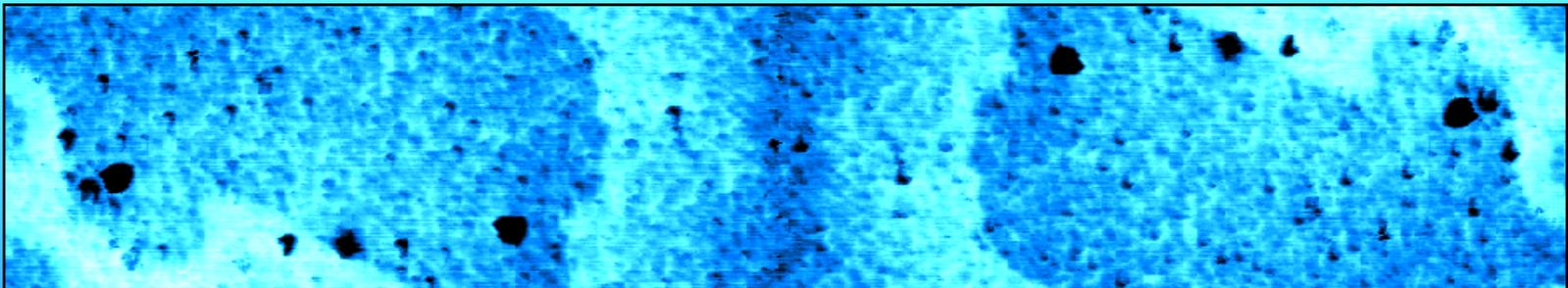


STM – Scanning Tunneling Microscopy Microscopia de efecto túnel

Taisia Gorkhover y Daniela Rupp



Sevilla, con el Grupo de Física No Lineal, 22 de enero
de 2007

Estructura

- Historia de la microscopía electrónica
- Principios básicos y magnitudes
- Teoría de STM
- Construcción y preparaciones del experimento
- Grabación y análisis de imágenes con STM
- STM – posibilidades y fronteras
- SEM – principios y comparación con STM

Historia de la microscopía electrónica

- **1931** primer microscopio electrónico de Ruska
- **1933** emisión efecto fotoeléctrico
- **1935** emisión termoiónica
- **1936** emisión de campo
- **1972** emisión de campo con escáner
- **1982** STM de Binnig/Rohrer, premio Nobel en **1986**



Principios básicos y magnitudes

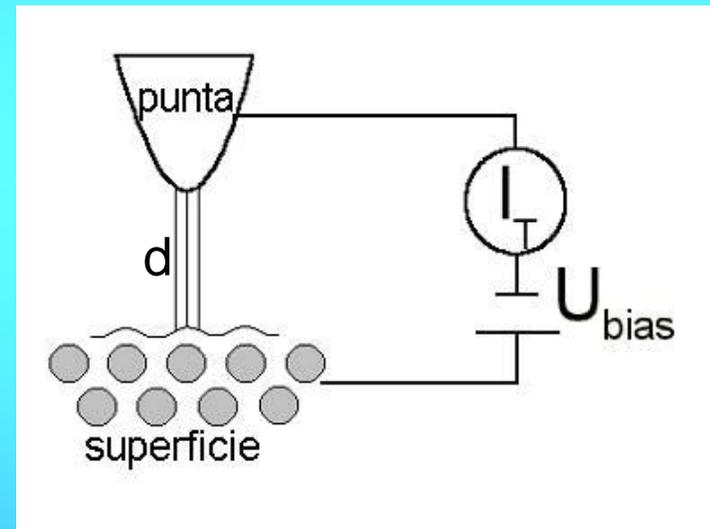
● la corriente túnel depende de d y U_{bias}

● distancia d entre punta y superficie

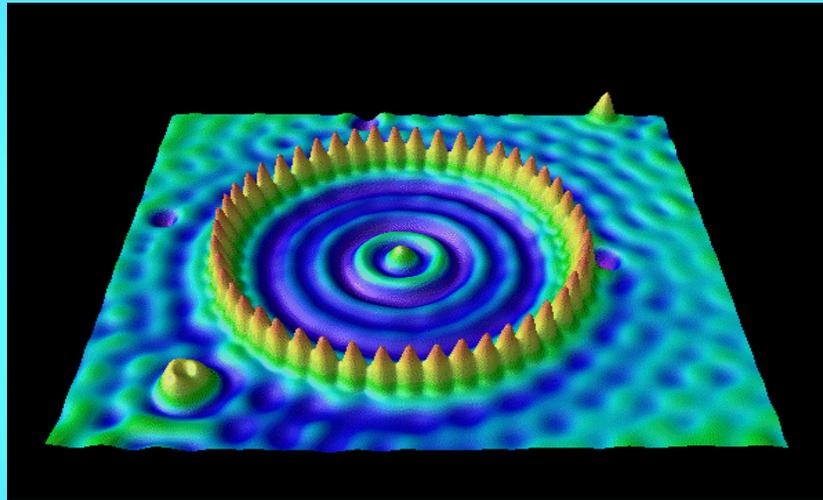
$\approx 5\text{nm}$

● tensión aplicada

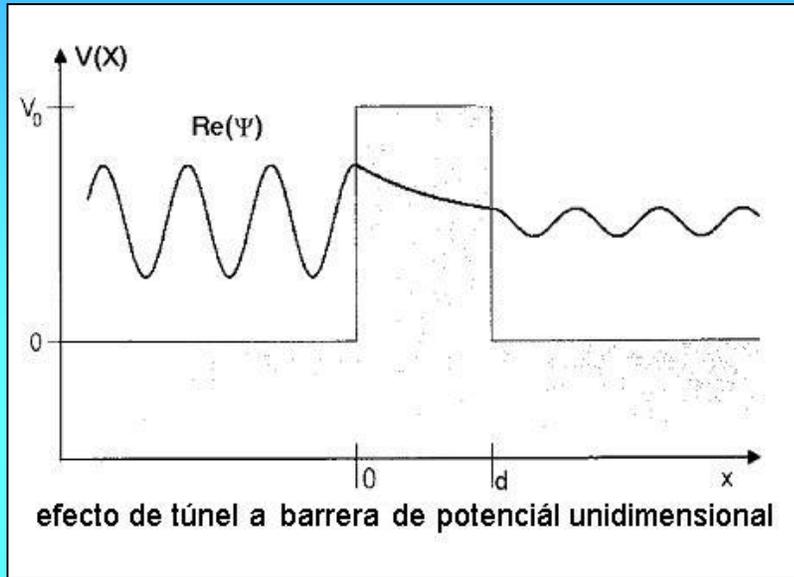
$U_{\text{bias}} \approx 1\text{V}$



Teoría de STM

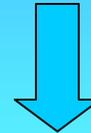


Efecto túnel

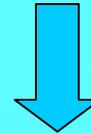


Modelo sencillo: barrera de potencial rectangular con anchura d

● Ecuación de Schrödinger



● $\Psi \sim e^{-\kappa x}$ en la barrera de potencial



● $I \sim |\Psi|^2 \sim e^{-2\kappa d} \Rightarrow$

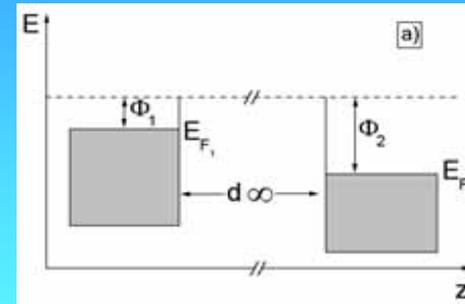


La corriente túnel depende exponencialmente de la distancia d alta resolución

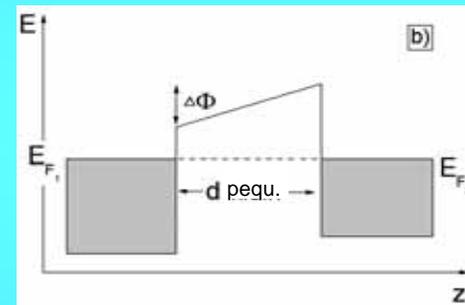


Visión esquemática

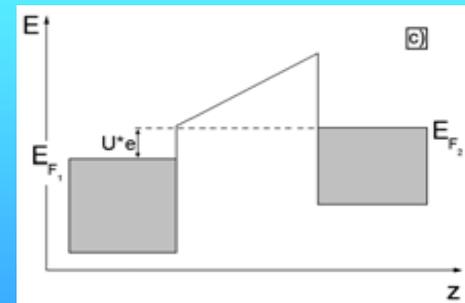
● **distancia grande:**
mismo nivel de vacío;
 Φ_i trabajo de extracción



● **distancia pequeña:**
equilibrio térmico,
mismo E_F (energía de Fermi)



● **con tensión:** E_F
empujado por U^*e



Teoría del efecto túnel de Baardeen

- interacción **punta prueba** pequeña => teoría de perturbaciones de primer orden con la punta como perturbación

$$I_T = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_0^{eU} \rho_m(E_{Fermi}^m + \varepsilon) \cdot \rho_p(E_{Fermi}^p + \varepsilon) \cdot |M|^2 d\varepsilon$$

- corriente túnel I_T : ρ 's son densidades de estados, aproximación de bajas temperaturas

Aproximación de Tersoff y Hamann

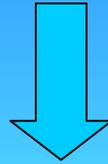
determinación de la matriz de interacción



Suposiciones:

- La **densidad de estados** en la punta ρ_p es constante.
- Sólo el **átomo „más externo“** de la punta interviene en el proceso túnel.
- La función de onda de ese átomo proporciona un **orbital tipo s**.

Aproximación de Tersoff y Hamann



Ecuación de la corriente túnel:

$$I_T \propto \rho_p \cdot \int_0^{eU} \rho_{m,local}(\bar{\mathbf{R}}, E_{Fermi}^p + \varepsilon) \cdot d\varepsilon$$

ρ_p : densidad de estados en la punta

$\rho_{m,local}$: densidad de estados local de la muestra con energía $E_F + \varepsilon$ en la coordenada \mathbf{R} del átomo externo de la punta

Dependencias de la corriente túnel

$$I_T = C \cdot U_{bias} \cdot \rho_p(E_{Fermi}^p) \cdot \rho_m(\bar{r}, E_{Fermi}^m)$$

- $I_T \sim U_{bias}$: para U pequeño, ρ independiente de U
- $I_T \sim e^{-\kappa d}$: viene de ρ_m (densidad de estado local)
- $I_T \sim \rho_m(\bar{r}, E_{Fermi}^m)$: importante para interpretación de las imágenes



Dependencias de la corriente túnel

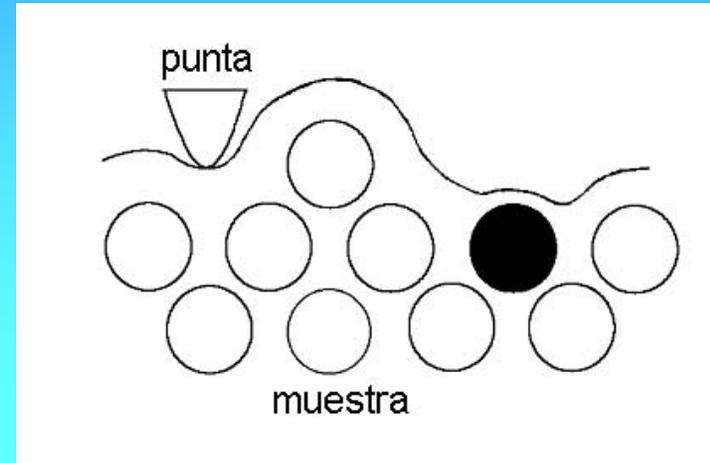
$$I_T = C \cdot U_{bias} \cdot \rho_p(E_{Fermi}^p) \cdot \rho_m(\vec{r}, E_{Fermi}^m)$$

Corriente constante significa densidades de estados locales constantes (cerca de E_F) en la superficie de la muestra

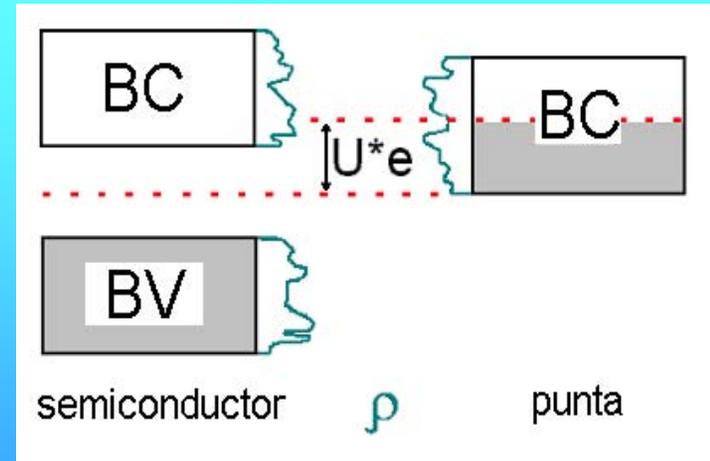
Visualización de las dependencias

- **la información topográfica es limitada**

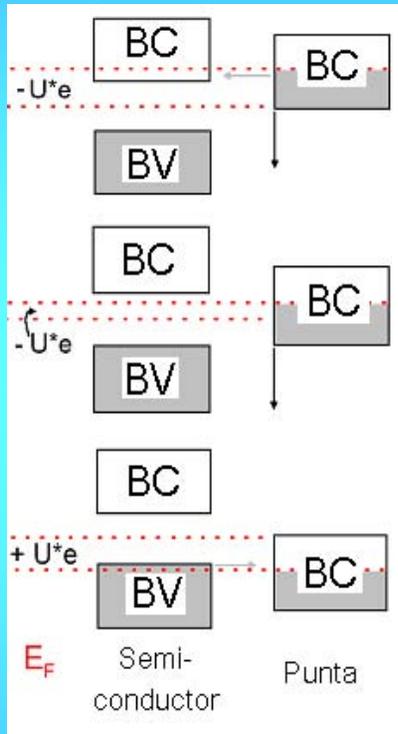
(los escalones son topográficos, los huecos de impurezas no)



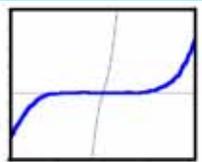
- el STM reconstruye las **densidades de estados de la muestra y de la punta**



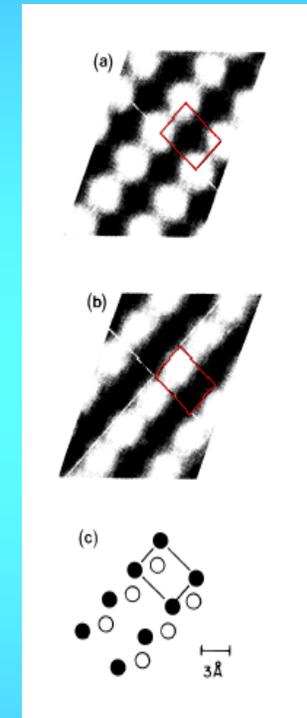
Scanning-Tunneling-Spectroscopy



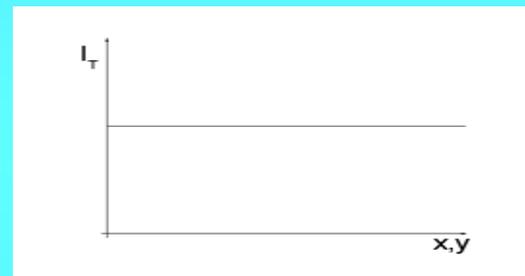
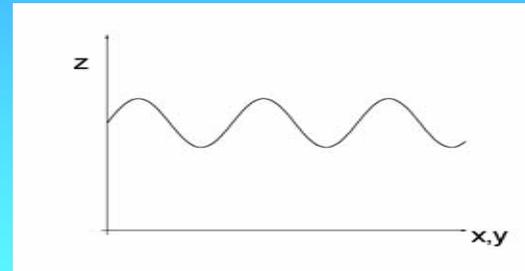
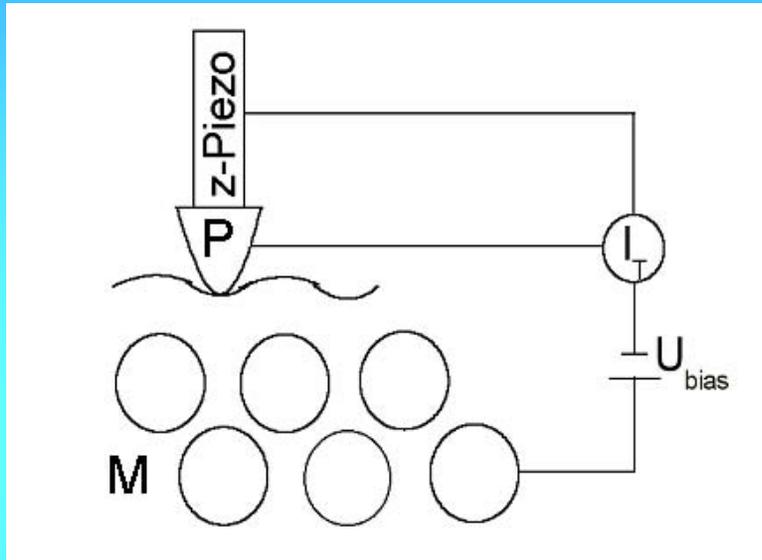
- coordenada fija (x,y,z)

- U_{bias} variando 
=> la función característica $I(U)$

- información sobre la estructura de bandas de los semiconductores



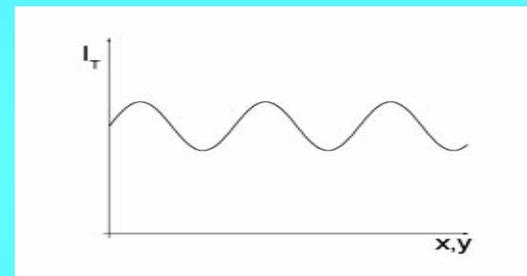
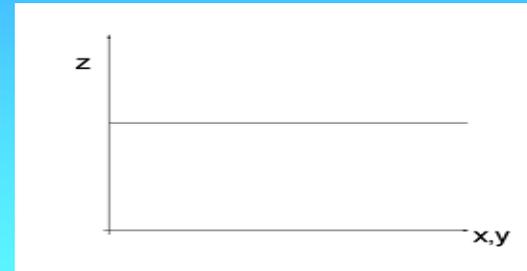
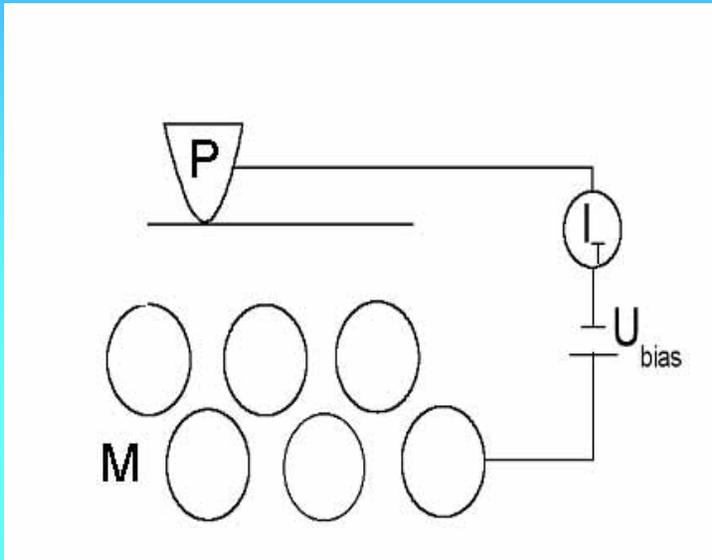
Modo de corriente constante



Ventaja: óptima para estructuras rugosas por regulacion de altura

Desventaja: barrido lento, errores a causa del piezoeléctrico que se “retarda”

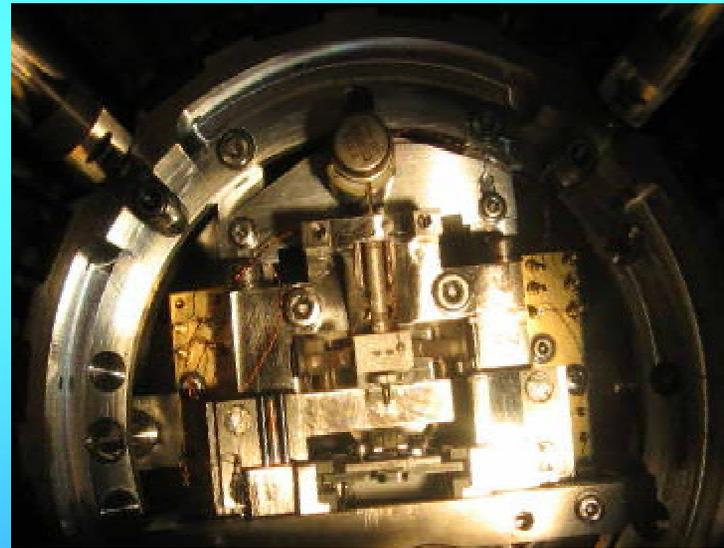
Modo de altura constante



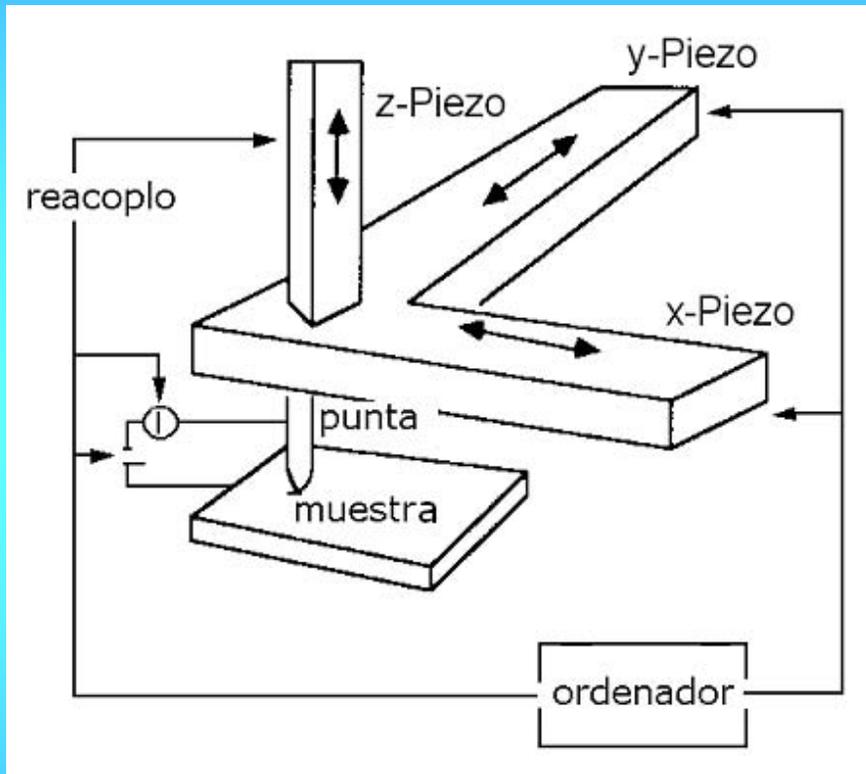
Ventaja : barrido rápido

Desventaja : sólo para superficies muy lisas ($\ll 5\text{nm}$)

Construcción y preparación del experimento



Scanner



- Modo cc: el ordenador
- arregla los piezoeléctricos de x e y
 - ajusta U_{bias} y $I_{\text{túnel}}$ requerido
 - lee la corriente de túnel I_T
 - lo reacopla al piezoeléctrico de z



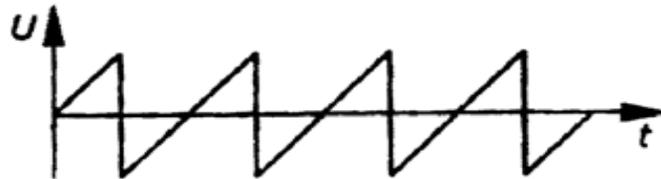
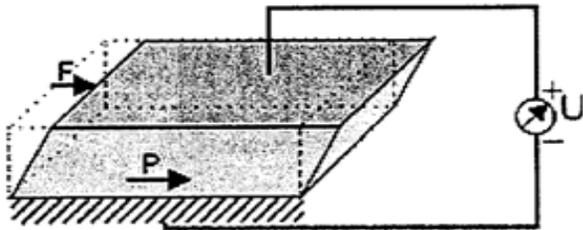
Proceso de aproximación

Problema:

- para cambiar la muestra es necesario una distancia macroscópica (\sim cm)
- contacto de túnel solo a distancia mucho más pequeña (\sim 0,5-5nm)

⇒ al principio, acercamiento hasta $< 0,1$ mm

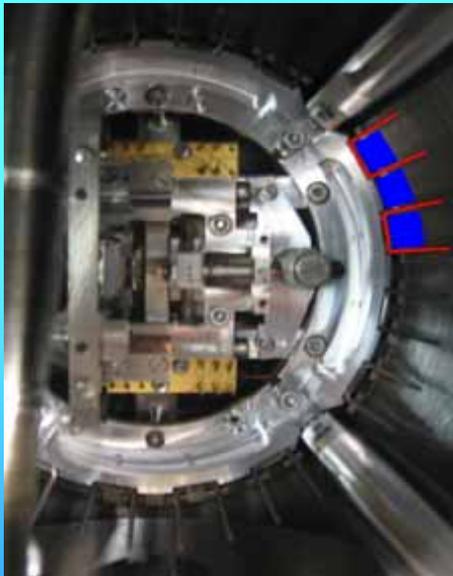
⇒ después “walker” con longitud de paso < 5 nm pero puede pasar distancia $\sim 0,1$ mm



Amortiguación de las vibraciones

Problema:

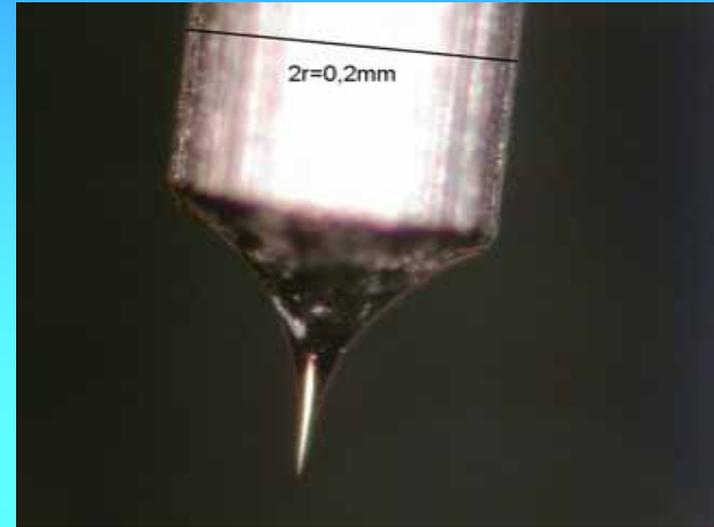
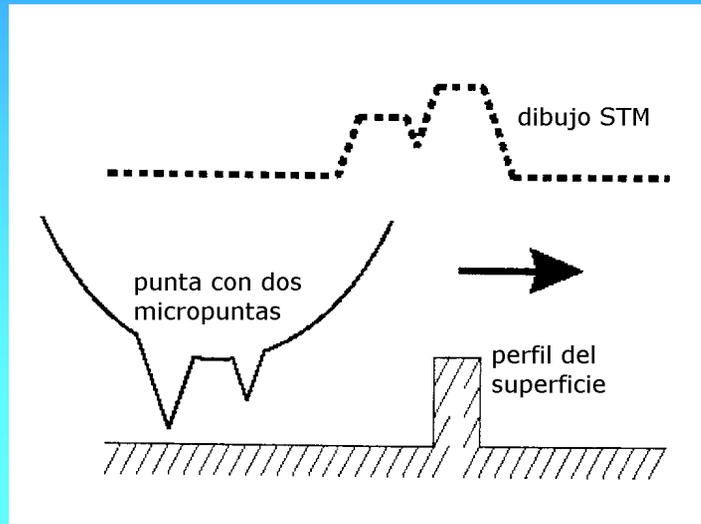
- $d < 5\text{nm}$ \Rightarrow Vibraciones pequeñas pueden romper la punta
- $I \sim e^{-2kd}$ \Rightarrow hasta elongaciones mínimas falsean el resultado



\Rightarrow la construcción entera, sobre una plataforma, está colgando de muelles

\Rightarrow imanes dentro de unas placas de aluminio amortiguan con el principio de frenado por corriente inducida

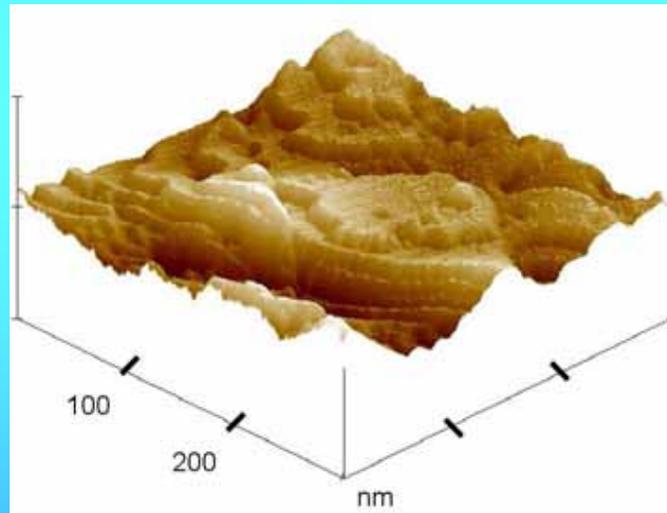
Preparación de la punta



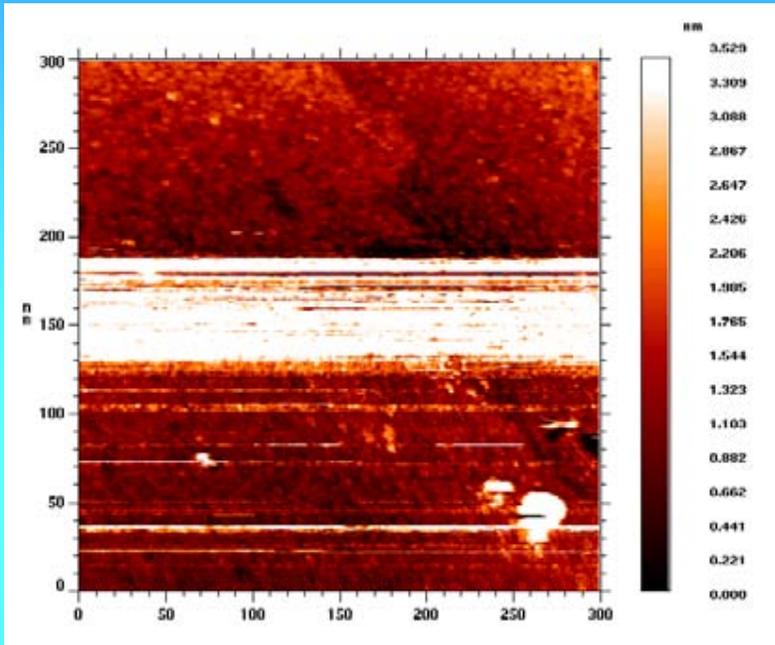
La punta monoatomica es condición necesaria para la STM!

➡ punta delgada mediante corrosión con NaOH

Grabación y análisis de imágenes con STM



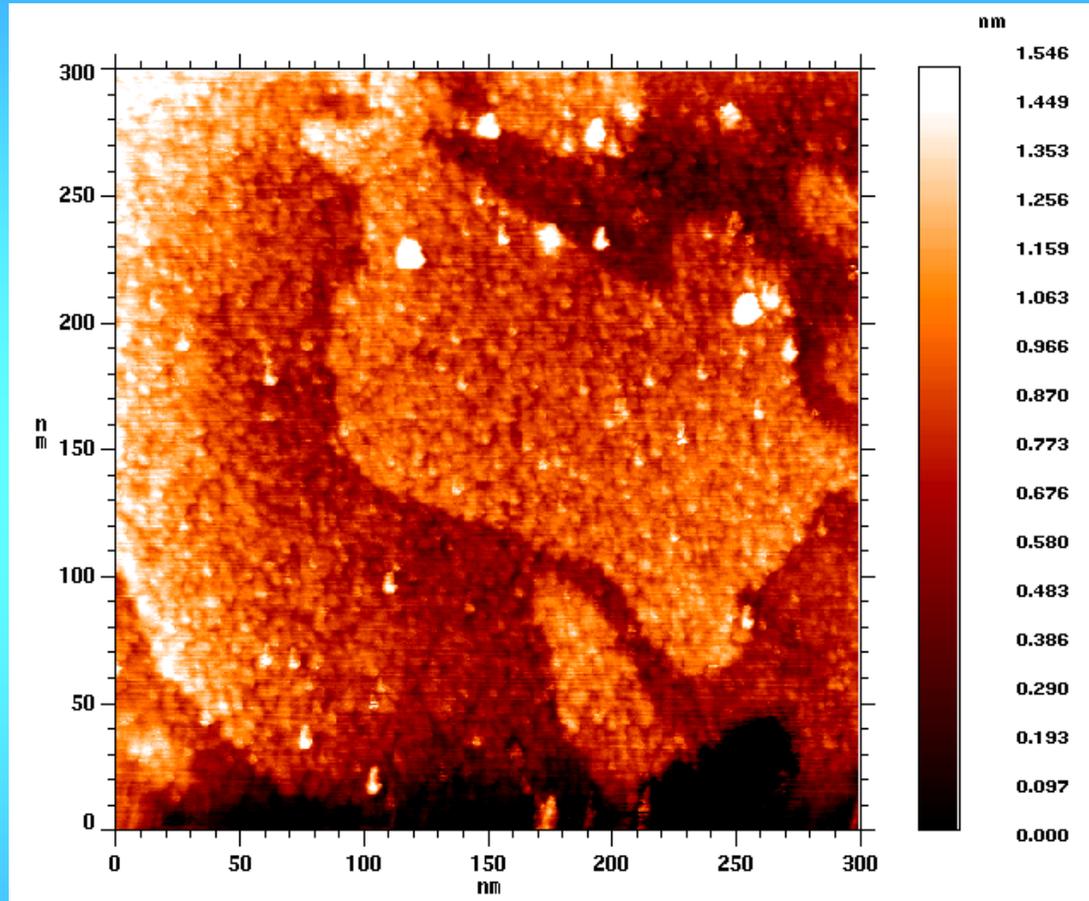
Dificultades durante la medida



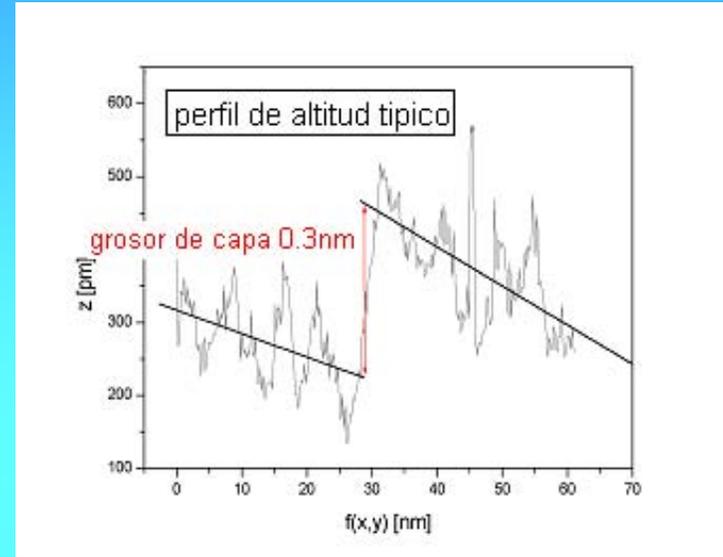
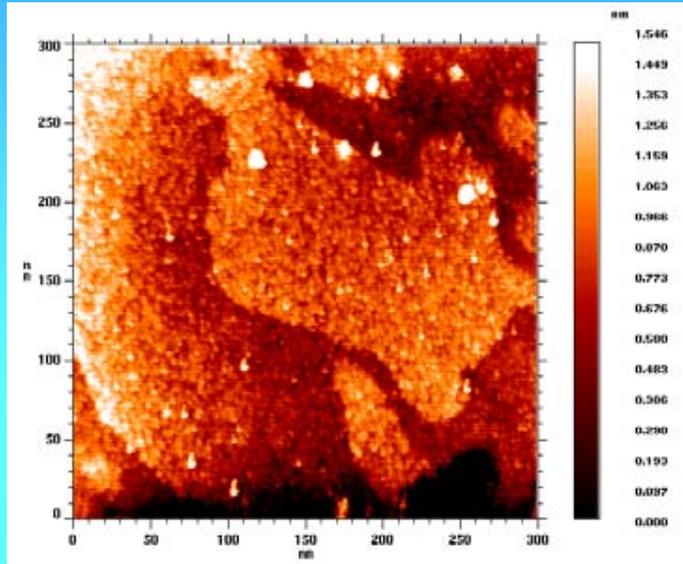
- Suciedad sobre la superficie
- Intercambio de materia entre superficie y punta
- Vibraciones del piezoeléctrico por una ganancia errónea
- Movimiento térmico

Para medidas y resultados con sentido se tiene que saber reconocer las fuentes de error!

Perfil de altura



Perfil de altura



- perfil de altura muestra el grosor de la capa de casi 0,3 nm
- La constante de celda unidad $a_{\text{GaAs}} = 0,6\text{nm} \Rightarrow 1/2$ de celda unidad (distancia entre los átomos de Ga y As)

Evaluación de STS => Energía de la banda prohibida

Se sabe que la muestra (GaAsN) contiene 3% N

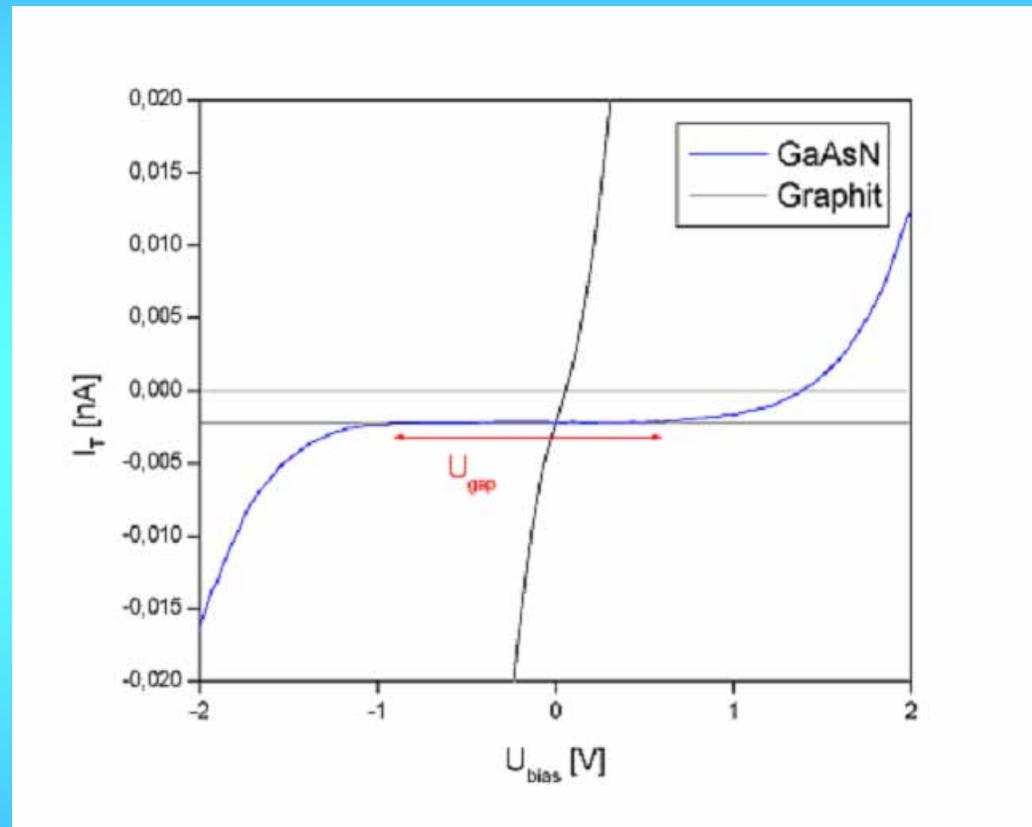
$$E_{g,\text{GaAs}} = 1,4\text{eV}$$

$$E_{g,\text{GaN}} = 3,5\text{eV}$$

Obtenemos para

$$\underline{E_{g,\text{GaAsN}} = 1,5\text{eV}}$$

Tiene sentido, es cerca de $E_{g,\text{GaAs}}$!



STM

posibilidades y fronteras

Sistema muestra-punta

IDEAL

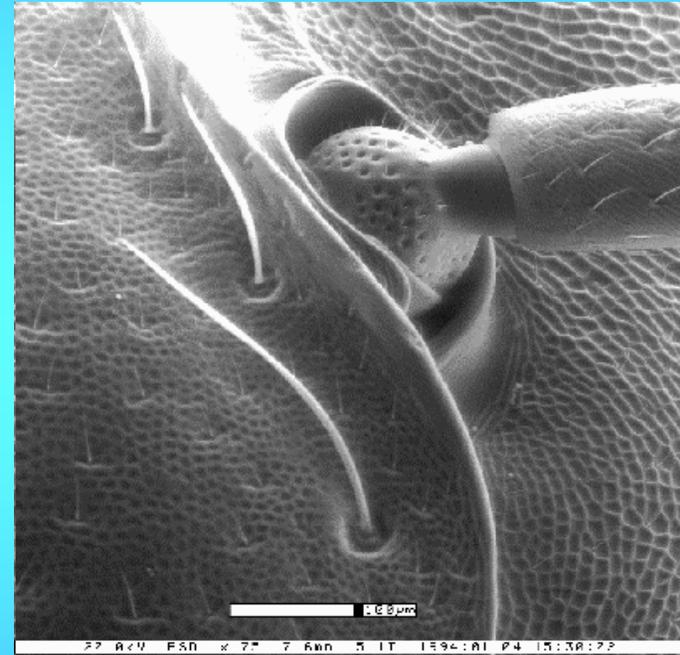
- sólo las cualidades de la muestra
- resolución atómica
- reproducible



REAL

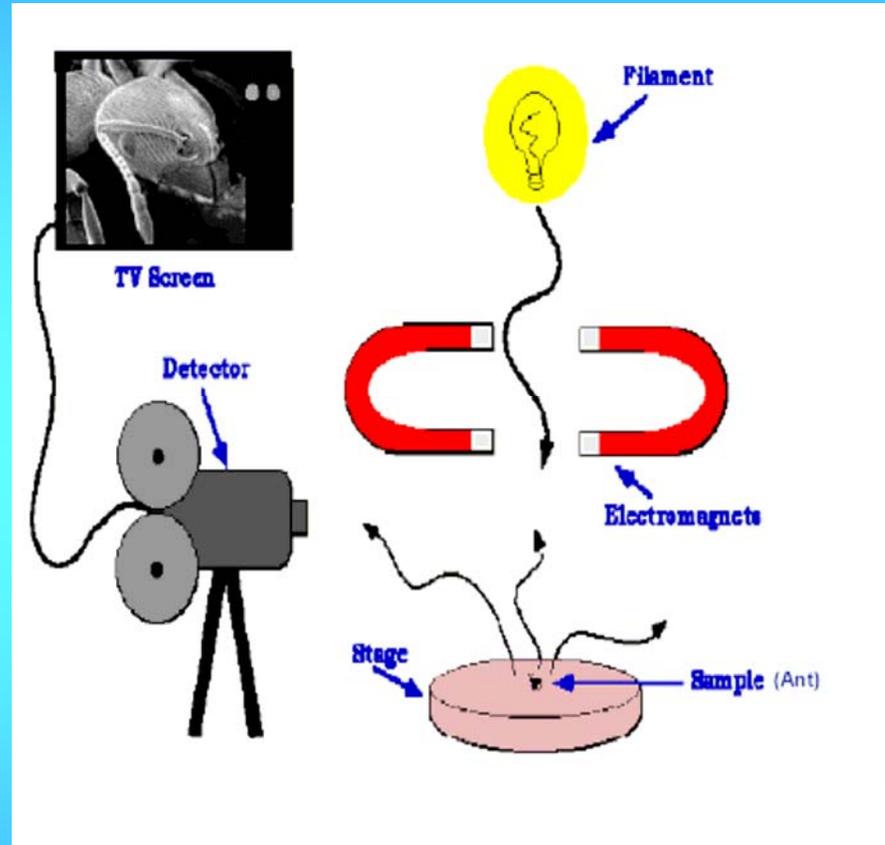
- I_T depende de $\rho_{E_{\text{Fermi}}}$ de la punta
- pérdida de resolución por escalones
- puntas múltiples
- intercambio de material
- movimiento térmico

SEM-Scanning Electron Microscopy- Microscopía electrónica de barrido



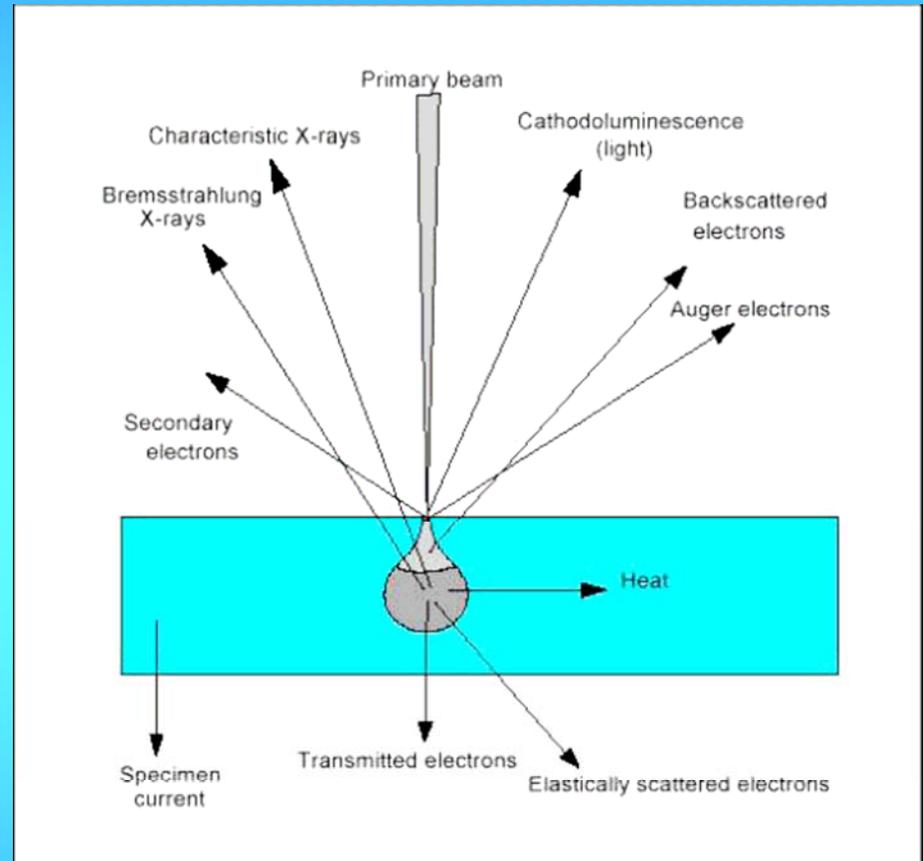
SEM-Principios y magnitudes

- Focalización fina del **rayo de electrones en líneas** sobre la muestra
- Construcción de la imagen por productos de la **interacción de electrones primarios energéticos** ($E=30\text{eV}$) y los átomos superficiales de la muestra
- Topografía (**resolución \approx nm**) y análisis químico



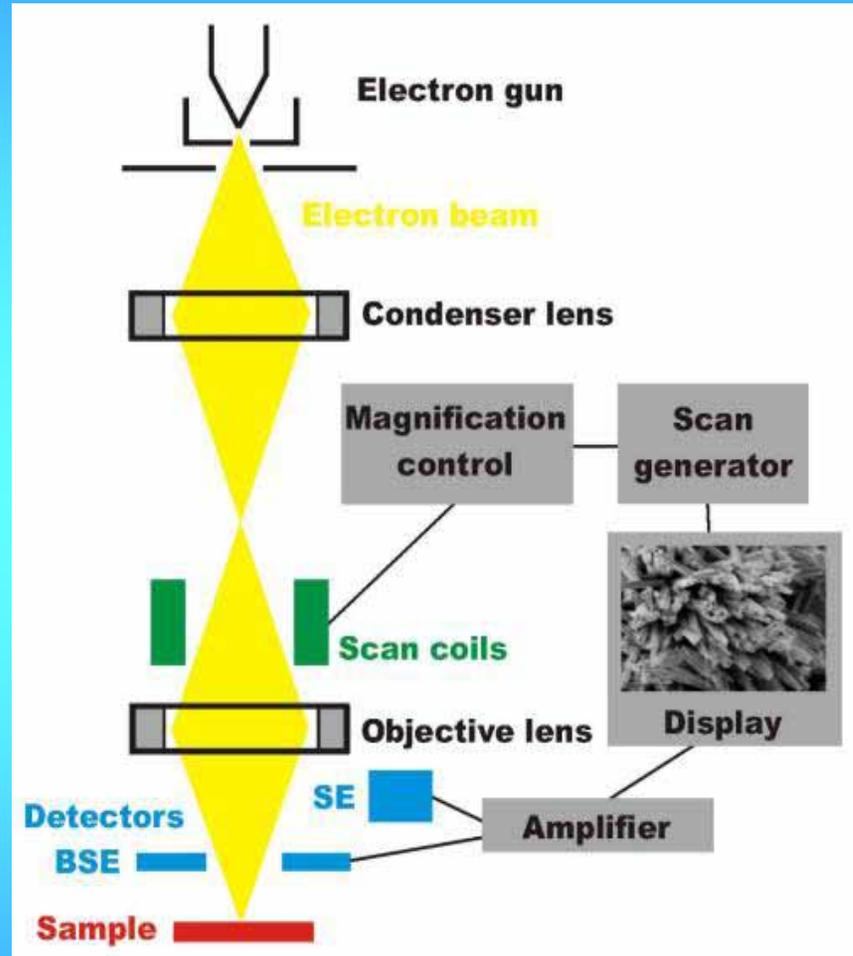
Radiación ↔ Información

- Topografía de la muestra
- Distribución de los potenciales eléctrico y magnético
- Análisis de los elementos
- Orientación cristalográfica
- Distribución del dopado



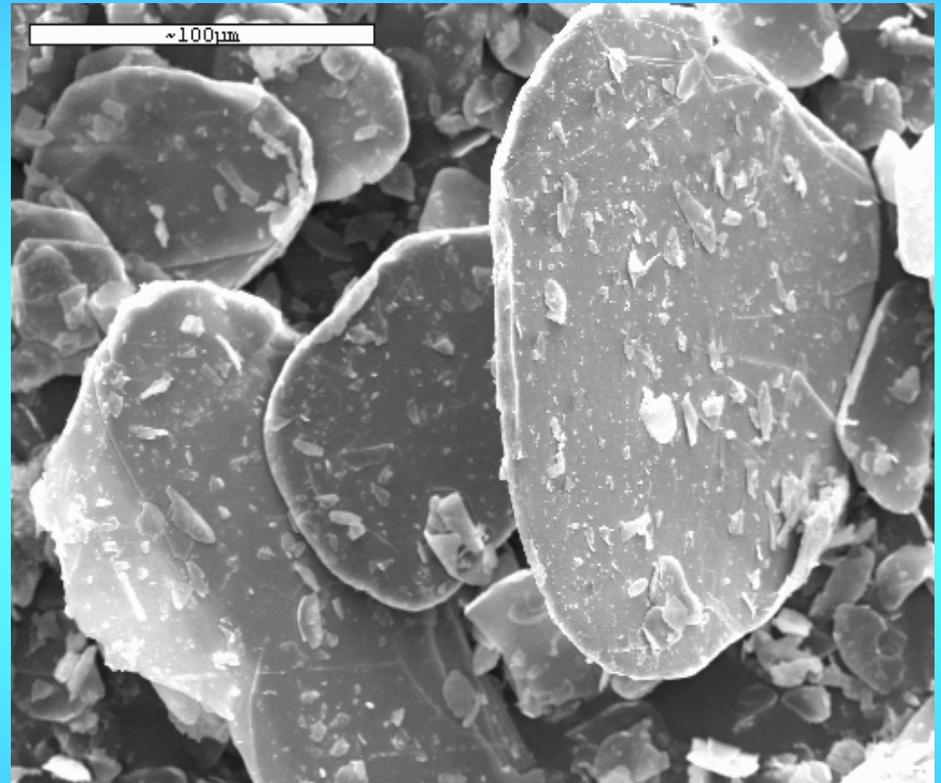
SEM-Medida

- Construcción típica, muestra en vacío ⇒
- Lectura y escritura sincronizadas
- intensidad del rayo de escritura modulada por la señal de medida



Imágenes de SEM

- Topografía superficial visible mediante **distintos efectos de contraste**, ej. contraste por rugosidad
- Igual para **propiedades del material**, ej. contraste del material
- Mezcla de ambos procesos



Mica muscovita y disilicato de lutecio tras una transformación reconstructiva

SEM ↔ STM

Común: solo para superficies conductoras

Ventajas

- resolución $\mu\text{m} \Rightarrow \text{nm}$
- muestras biológicas
- análisis químico
- orientación cristalográfica

Desventajas

- no tiene resolución atómica
- es necesario el vacío
- destrucción de la muestra
- no hay información 3-D
- errores de aberración