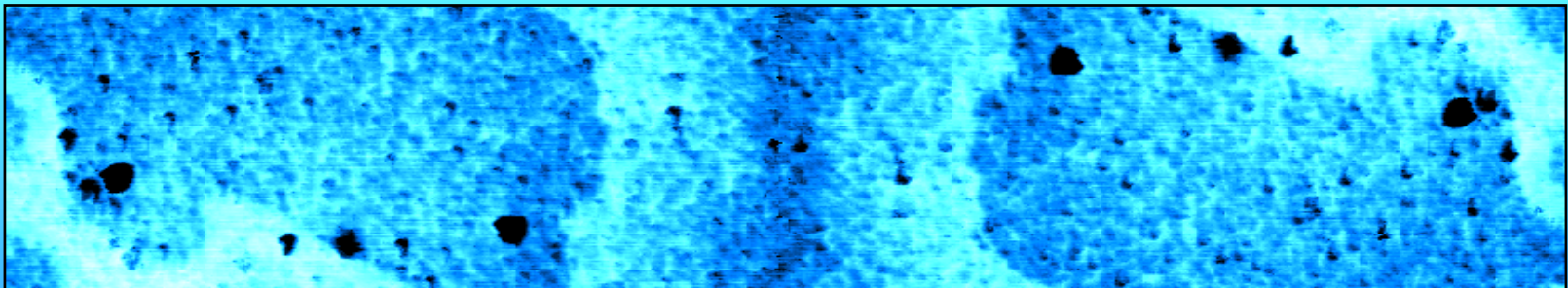


# STM – Scanning Tunneling Microscopy Microscopia de efecto túnel

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

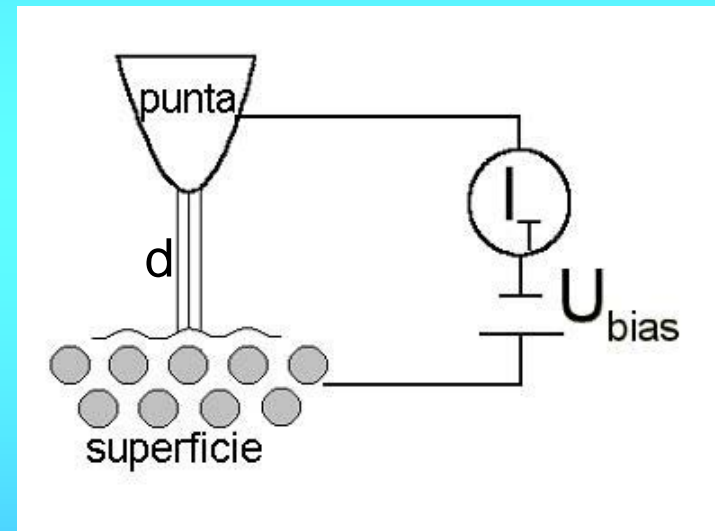
● la corriente túnel depende de  $d$  y  $U_{\text{bias}}$

● distancia  $d$  entre punta y superficie

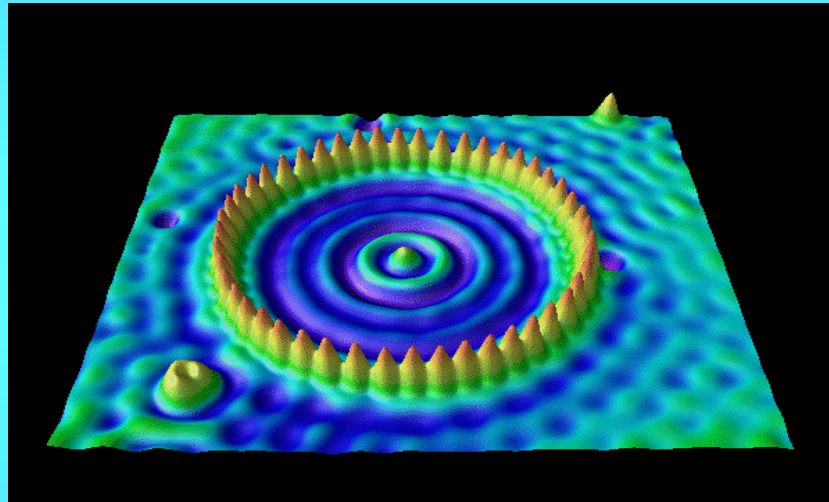
$\approx 5\text{nm}$

● tensión aplicada

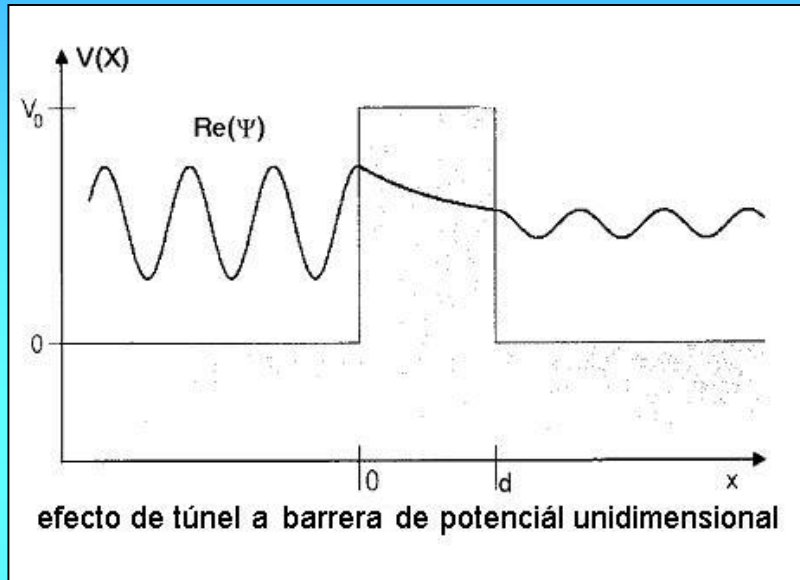
$U_{\text{bias}} \approx 1\text{V}$



# Teoría de STM



# Efecto túnel

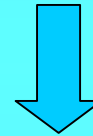


Modelo sencillo: barrera de potencial rectangular con anchura  $d$

● Ecuación de Schrödinger



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



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

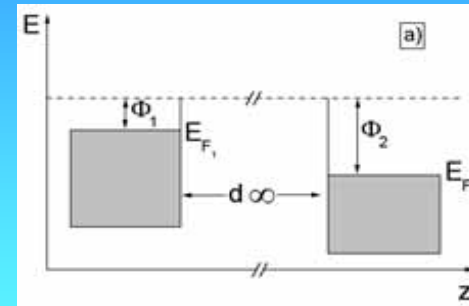


**La corriente túnel depende exponencialmente de la distancia  $d$  alta resolución**

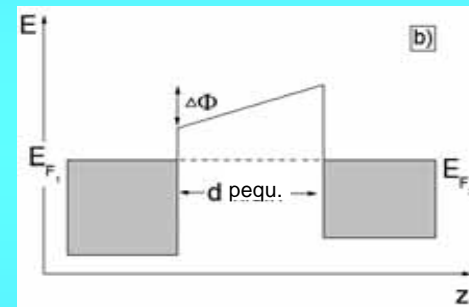


# Visión esquemática

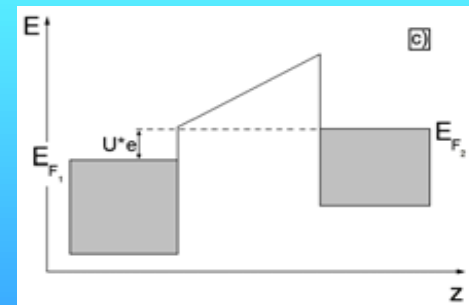
● **distancia grande:**  
mismo nivel de vacío;  
 $\Phi_i$  trabajo de extracción



● **distancia pequeña:**  
equilibrio térmico,  
mismo  $E_F$  (energía de Fermi)  
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  $I_T$  :  $\rho$ 's son densidades de estados, aproximación de bajas temperaturas



# Aproximación de Tersoff y Hamann

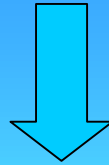
determinación de la matriz de interacción



Suposiciones:

- La **densidad de estados** en la punta  $\rho_p$  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:

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

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



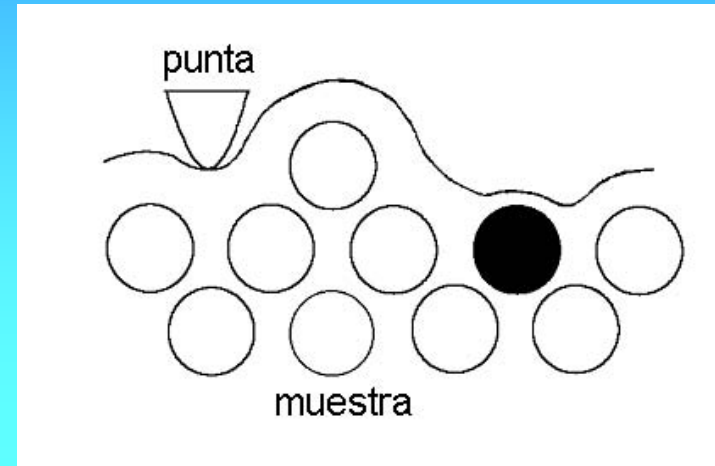
# Dependencias de la corriente túnel

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

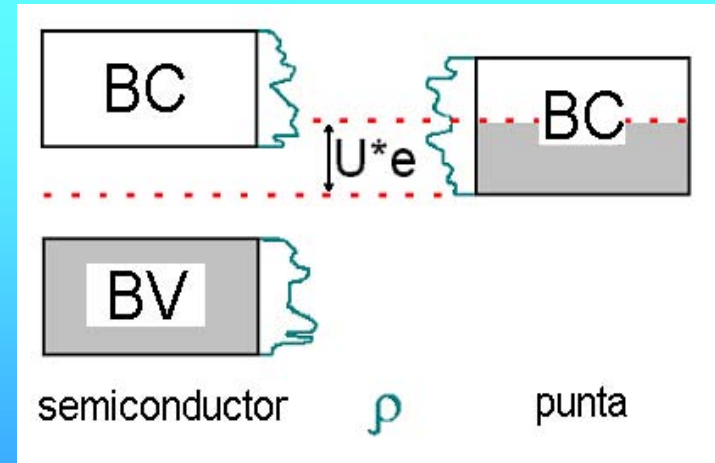
**Corriente constante significa densidades de estados locales constantes (cerca de  $E_F$ ) en la superficie de la muestra**

# Visualización de las dependencias

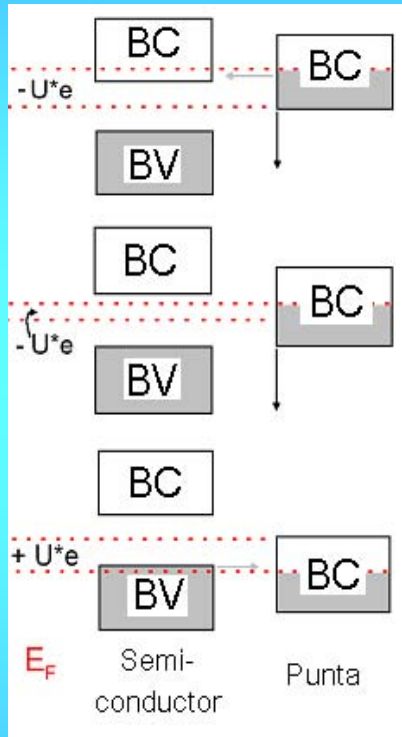
- **la información topográfica es limitada**  
(los escalones son topográficos, los huecos de impurezas no)



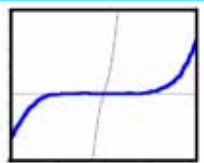
- el STM reconstruye las **densidades de estados de la muestra y de la punta**



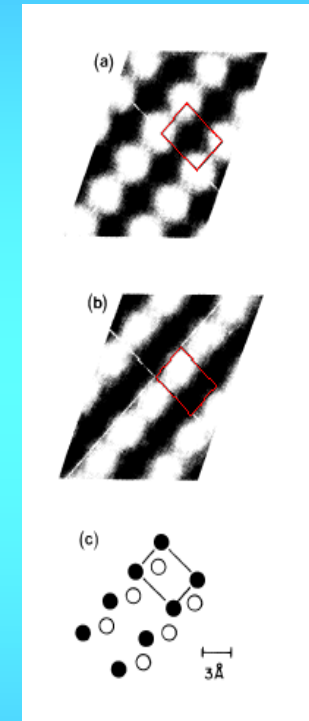
# Scanning-Tunneling-Spectroscopy



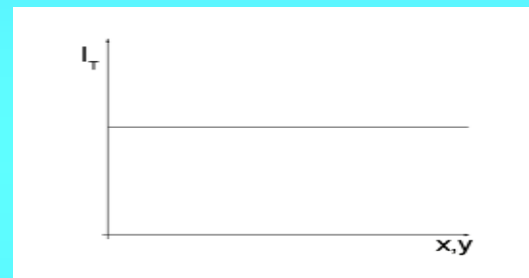
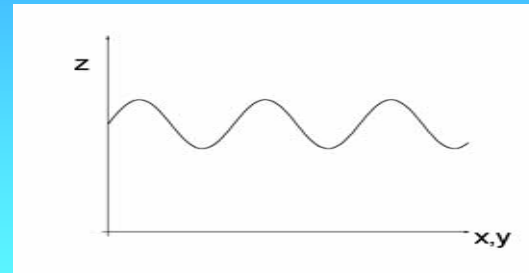
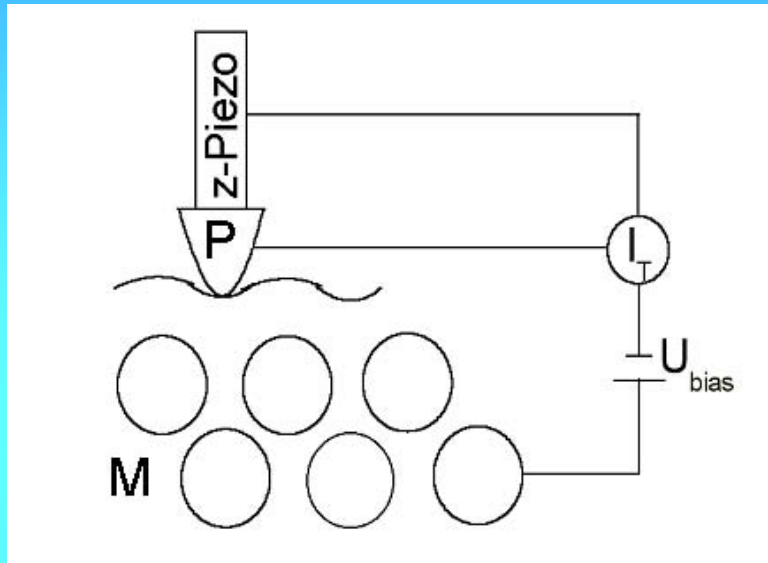
- coordenada fija (x,y,z)

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

- información sobre la estructura de bandas de los semiconductores



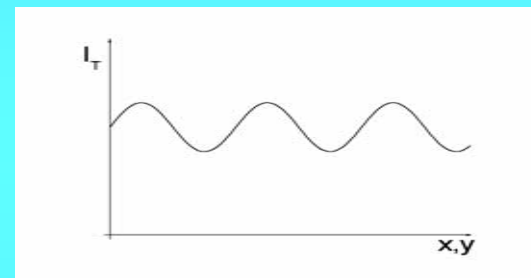
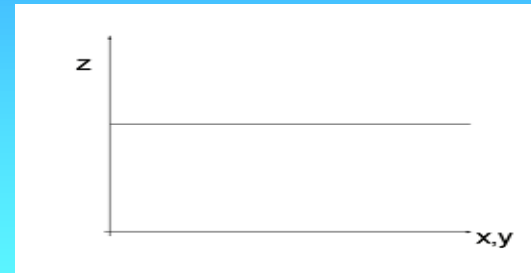
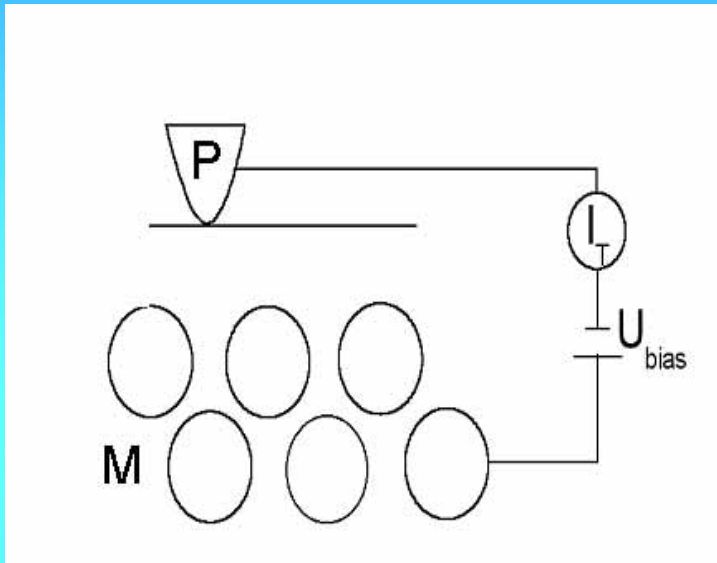
# Modo de corriente constante



**Ventaja:** óptima para estructuras rugosas por regulacion de altura

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

# Modo de altura constante

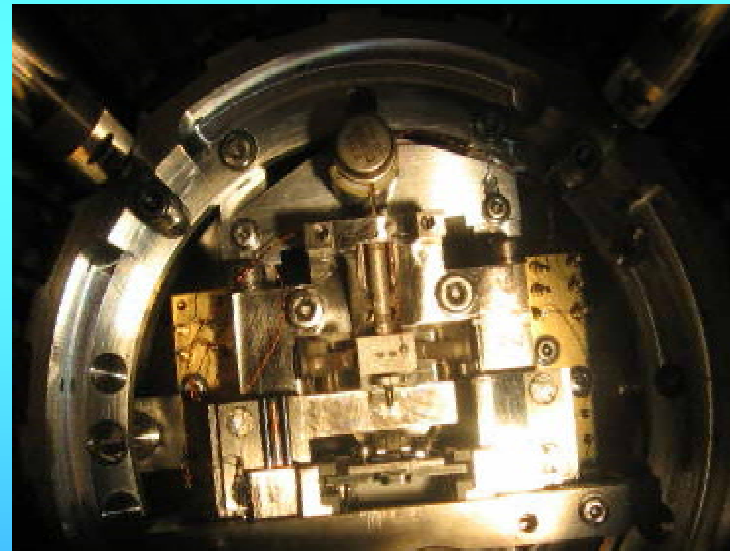
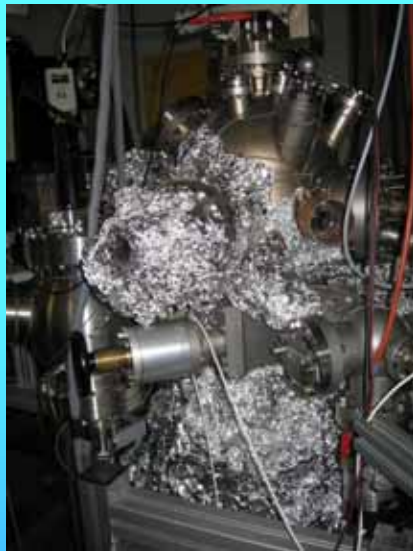


**Ventaja** : barrido rápido

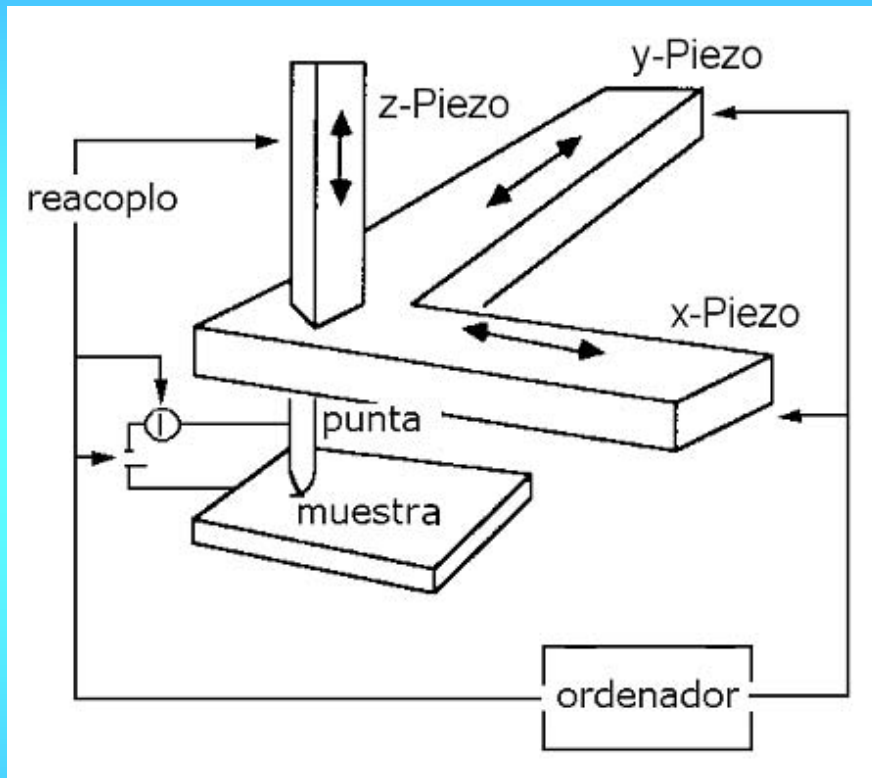
**Desventaja** : sólo para superficies muy lisas( $\ll 5\text{nm}$ )



# Construcción y preparación del experimento



# Scanner



Modo cc: el ordenador

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



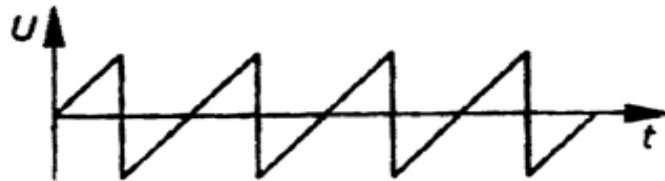
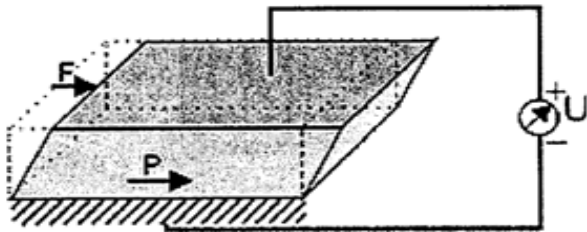
# Proceso de aproximación

## 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

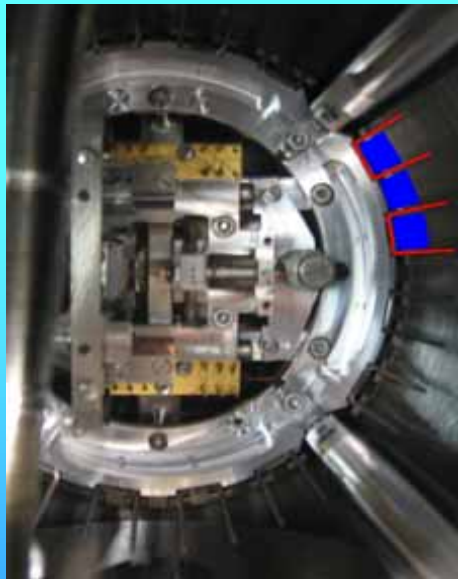
⇒ después “walker” con longitud de paso  $< 5$ nm pero puede pasar distancia  $\sim 0,1$ mm



# Amortiguación de las vibraciones

## Problema:

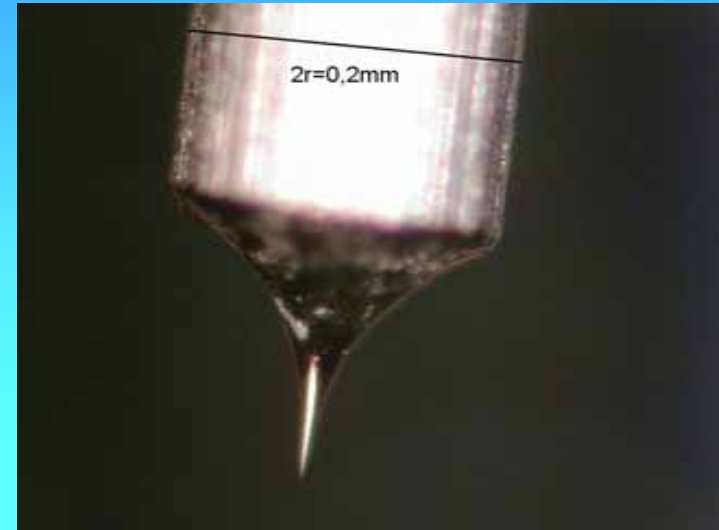
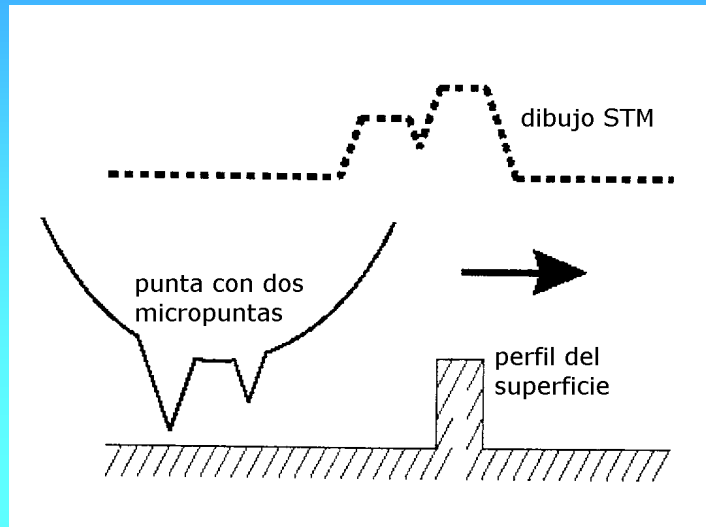
- $d < 5\text{nm}$   $\Rightarrow$  Vibraciones pequeñas pueden romper la punta
- $I \sim e^{-2kd}$   $\Rightarrow$  hasta elongaciones mínimas falsean el resultado



$\Rightarrow$  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

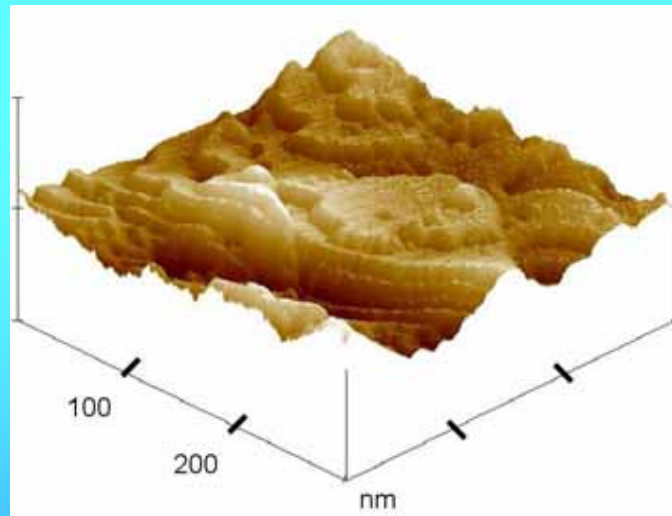
# Preparación de la punta



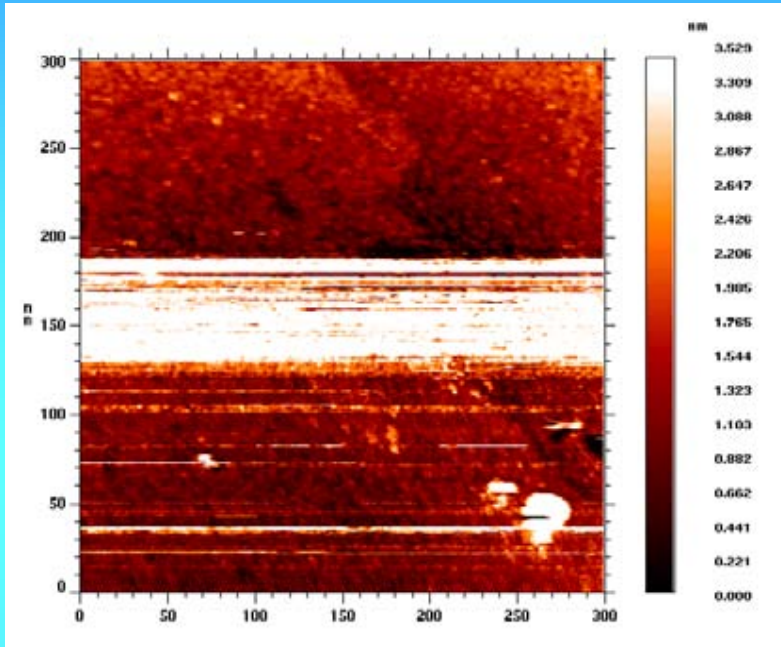
**La punta monoatomica es condición necesaria para la STM!**

**➡ punta delgada mediante corrosión con NaOH**

# Grabación y análisis de imágenes con STM



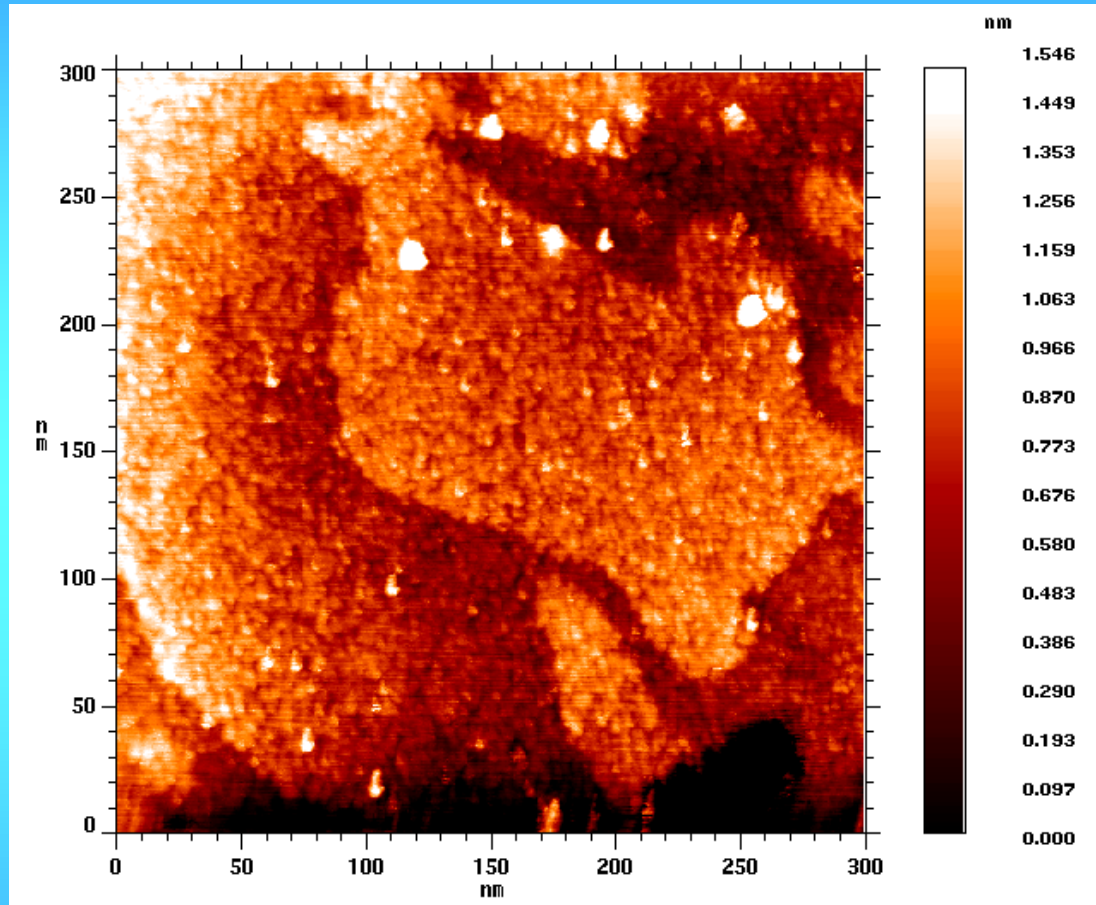
# Dificultades durante la medida



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

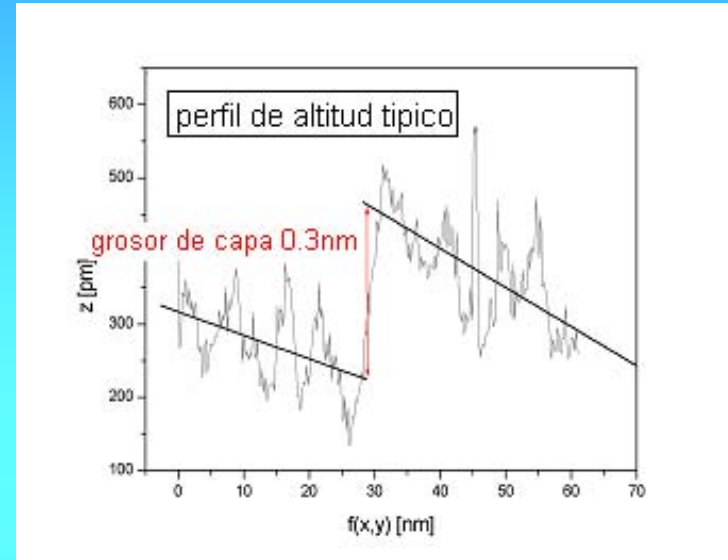
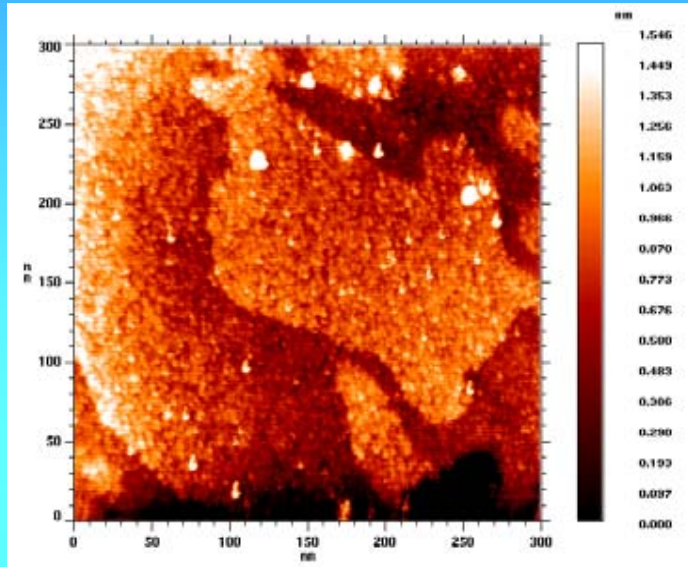
**Para medidas y resultados con sentido se tiene que saber reconocer las fuentes de error!**

# 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

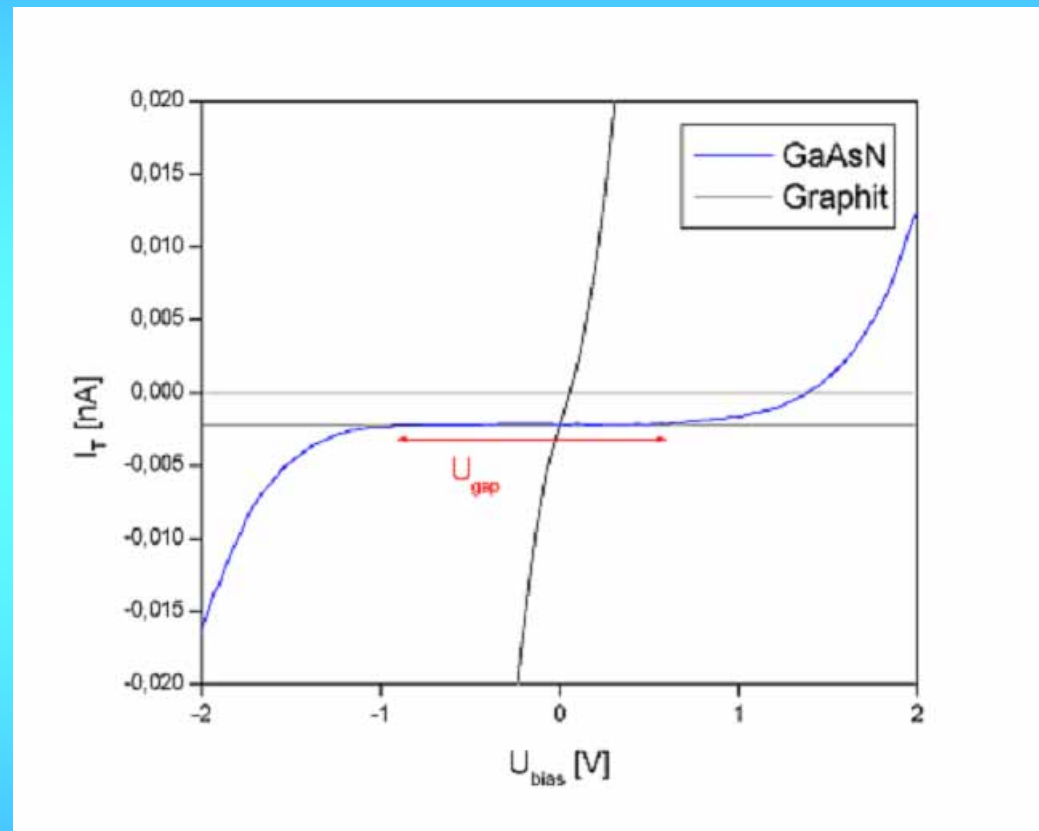
$$E_{g,\text{GaAs}} = 1,4\text{eV}$$

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

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

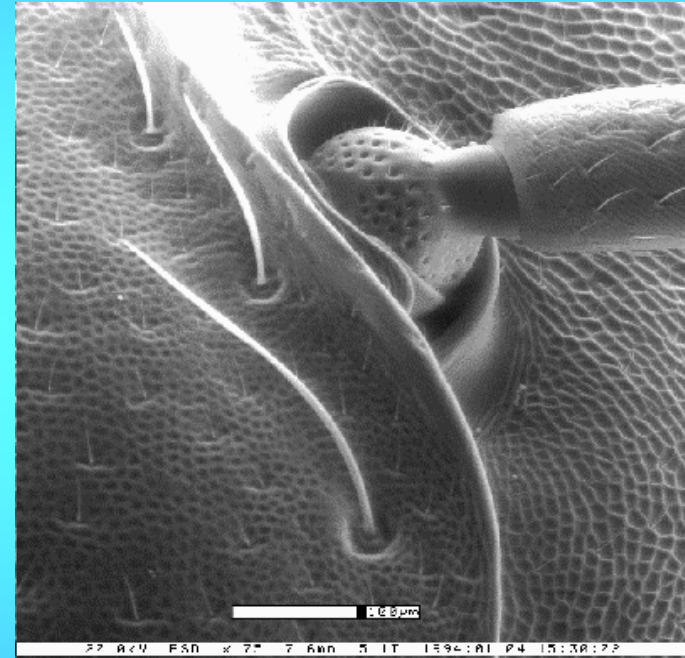
- sólo las cualidades de la muestra
- resolución atómica
- reproducible



## REAL

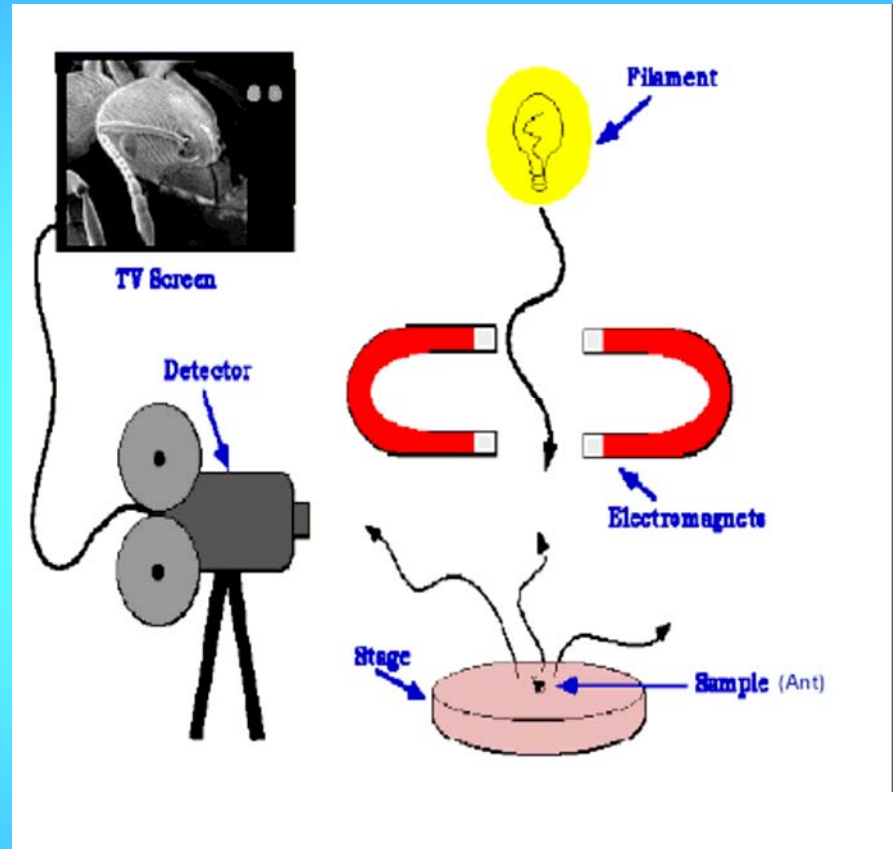
- $I_T$  depende de  $\rho_{E_{\text{Fermi}}}$  de la punta
- pérdida de resolución por escalones
- puntas múltiples
- intercambio de material
- movimiento térmico

# SEM-Scanning Electron Microscopy- Microscopía electrónica de barrido



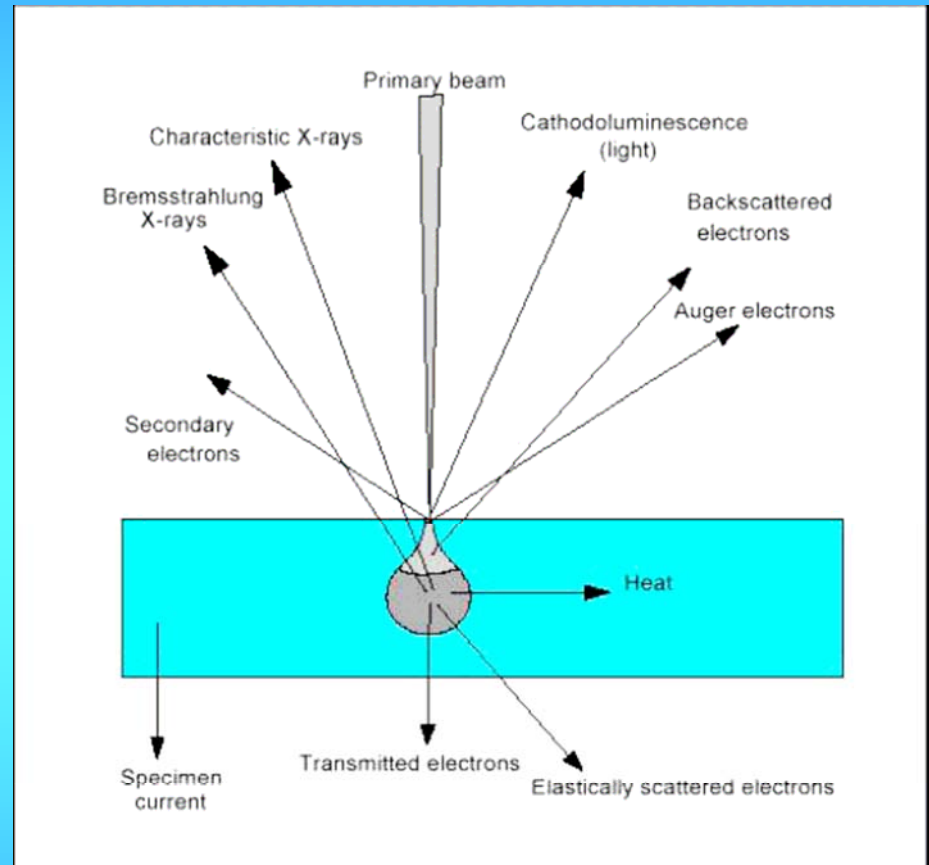
# SEM-Principios y magnitudes

- 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



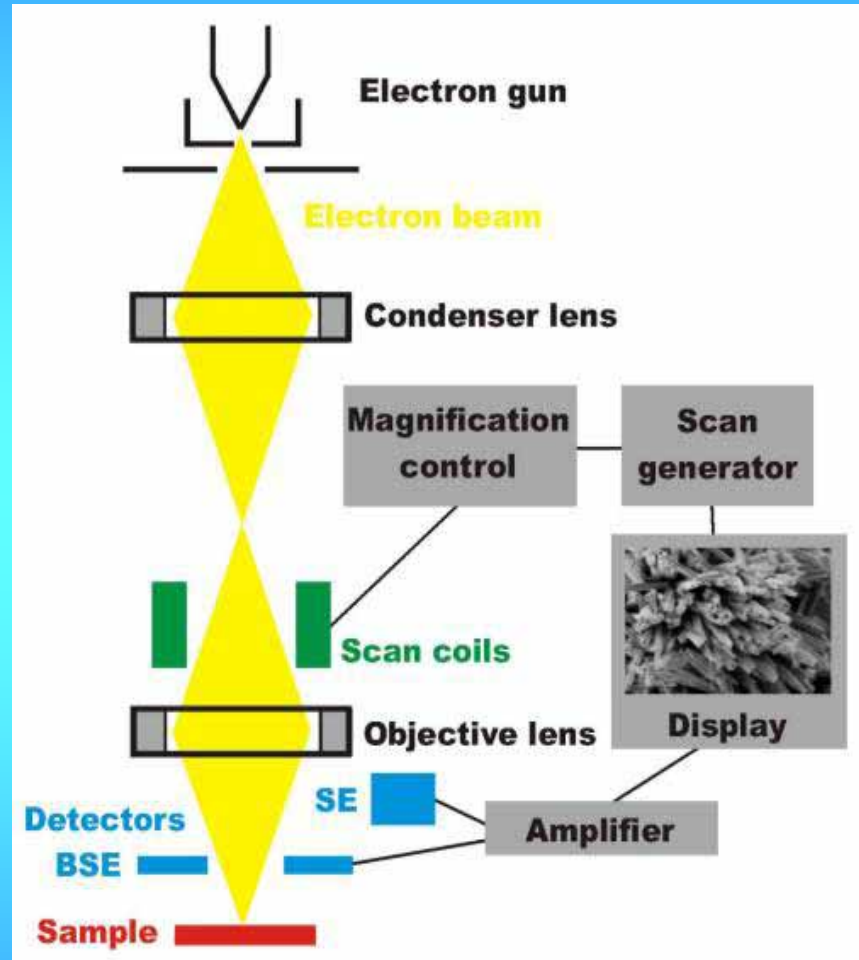
# Radiación ↔ Información

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



# SEM-Medida

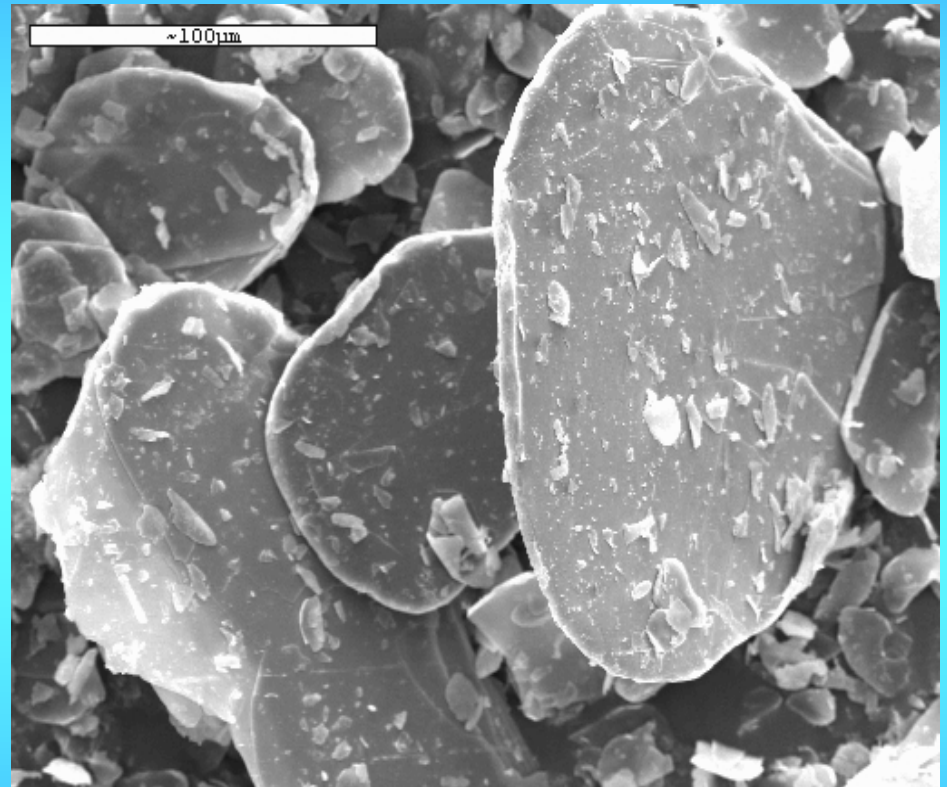
- Construcción típica, muestra en vacío ⇒
- Lectura y escritura sincronizadas
- intensidad del rayo de escritura modulada por la señal de medida





# 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