

# Microscopio de efecto túnel con resolución atómica

A.I. OLIVA\*, V. REJÓN, N. LÓPEZ SALAZAR, E. AVILA,  
T. KANTÚN, J.E. CORONA Y J.L. PEÑA

*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida  
Apartado postal 73-Cordemex, 97310 Mérida, Yucatán, México*

Recibido el 19 de abril de 1993; aceptado el 14 de octubre de 1993

RESUMEN. Se presenta el diseño, la construcción y la puesta en marcha del primer sistema integrado de microscopio de efecto túnel (MET) con resolución atómica desarrollado en México, que puede operarse en condiciones de presión atmosférica y de ultra-alto-vacío. Se detalla el trabajo realizado para su desarrollo tanto en su parte mecánica, como electrónica y de computación. Se muestran las primeras imágenes de grafito pirolítico altamente orientado con resolución atómica obtenidas con este sistema en condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica.

ABSTRACT. The design, construction and calibration of the first Scanning Tunneling Microscope (STM) integrated system made in Mexico with atomic resolution is presented. This system can be used at atmospheric pressure and under ultra high vacuum conditions. We present the work done in the mechanical, electronics and computational aspects of the STM. We show the first images of HOPG with atomic resolution obtained with this system at atmospheric pressure and room temperature conditions.

Pacs: 07.80.+x; 61.16.Di; 73.40.Gk

## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de tunelamiento surge como una consecuencia de la aparición de la mecánica cuántica, en el cual una partícula (un electrón, por ejemplo) muestra tener una probabilidad finita de entrar a una región clásicamente prohibida; en consecuencia, la partícula puede tunear a través de una barrera de potencial establecida entre dos regiones clásicamente permitidas. Esta probabilidad se ha demostrado ser de tipo exponencial con el ancho de la barrera, por lo que para poder observarse experimentalmente es indispensable tener barreras de potencial muy pequeñas.

Los primeros resultados experimentales de tunelamiento de electrones fueron desarrollados por Esaki [1] en juntas p-n, por Giaever [2] en juntas metal-óxido-metal y por Josephson [3] en juntas superconductoras.

En 1971, Young *et al.* [4] obtienen tunelamiento de electrones en una unión metal-vacío-metal con ayuda de un dispositivo al que denominaron el "topografímetro". Con este dispositivo fue posible dibujar la superficie de metales, usando una punta metálica como electrodo de la unión, la cual se montaba en un trípode piezoeléctrico para efectuar barridos. Sin embargo, la "pobre" resolución alcanzada fue de 30 Å en la dirección vertical y de 4000 Å en la dirección lateral, dada la gran distancia punta-muestra (varios cientos de

---

\*Estudiante del doctorado en Física de Materiales, CICESE IFUNAM-Ensenada.

angstroms) que había por el régimen de emisión de campo y principalmente por problemas de vibración de la unión.

En 1981, Binnig y Rohrer [5], resolviendo los problemas de vibraciones en la unión metal-vacío-metal, logran desarrollar un instrumento capaz de resolver en la escala atómica: El microscopio de tunelamiento de barrido (STM, del inglés Scanning Tunneling Microscope). Estos autores usaron como electrodos de la unión, una punta afilada y una muestra conductora y como barrera de potencial, el vacío. La punta es acercada unos cuantos angstroms (entre 1 y 10 Å) hacia la muestra ocasionando un traslape entre sus nubes electrónicas. Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, fluye una corriente de tunelamiento (de entre 0.1 y 10 nA) entre los estados electrónicos ocupados cerca del nivel de Fermi de un electrodo y los estados electrónicos no ocupados del otro electrodo. Usando un circuito de control para manejar un trípode piezoeléctrico donde se encuentra montada la punta afilada, es posible realizar barridos para determinar la forma de la superficie de la muestra con resolución atómica, es decir su tipografía. La alta resolución alcanzada en este microscopio es posible, debido a la dependencia exponencial encontrada en la corriente túnel en virtud de la distancia de separación entre los electrodos de la unión túnel, esto es, una variación de 1 Å en la separación de la unión, ocasiona una variación de un orden de magnitud en la corriente de tunelamiento.

El microscopio de efecto túnel (MET), como lo llamaremos de ahora en adelante en este trabajo, se ha convertido hoy en día en una técnica muy poderosa de análisis de superficies en varios campos de la ciencia, dado su alto poder de resolución encontrado. Incluso, su creación ha motivado a la aparición actual de 21 técnicas adicionales [6] que se han desarrollado bajo principios inspirados en su funcionamiento.

A partir de la aparición de este nuevo microscopio, se ha publicado en la literatura científica una gran variedad de diseños dependiendo de su necesidad. Así, tenemos el MET de "bolsillo" desarrollado por Gerber [7], el MET de baja temperatura de Smith and Binnig [8], con el cual pudieron medir el movimiento fonónico de metales, el MET para líquidos [9] con el cual es posible analizar materiales biológicos desde el punto de vista atómico, entre otros.

En este trabajo se mencionan los esfuerzos realizados para desarrollar en México el primer sistema integral del MET con resolución atómica. Esfuerzos pioneros en el país realizados por Huerta Garnica y García Cantú [10] condujeron al desarrollo del "Inductoscanner", que es un microscopio de efecto túnel pero con resolución óptica y sub-óptica, el cual les permitió estudiar metales y desarrollar metrología. Cabe mencionar que actualmente estos sistemas integrados con resolución atómica pueden adquirirse en el mercado extranjero y su alto costo (por la alta tecnología desarrollada) hace muy difícil su acceso, además de la dependencia tecnológica que representa. Por ello, dos grupos adicionales en el país (IFUNAM-Ensenada y CINEVESTAV-Saltillo), actualmente realizan esfuerzos por cultivar esta novedosa técnica, realizando estudios de materiales con MET's comerciales.

## 2. SISTEMA DEL MET CONSTRUIDO

Con el objeto de presentar con mayor claridad el sistema del MET que se construyó,

procederemos a explicarlo en las tres partes en que se dividió durante su desarrollo: mecánica, electrónica y computación.

### 2.1. Mecánica

La parte mecánica está integrada exclusivamente por la llamada "cabeza" del MET. Comprende la unión túnel, el trípode piezoeléctrico, los mecanismos de aproximación punta-muestra y el sistema de aislamiento de vibraciones. Todo este conjunto está montado sobre una brida estándar de 8" para su uso en ultra-alto-vacío y está construido en acero inoxidable 304. Veamos con detalle cada uno de los elementos que la integran.

#### a) La unión túnel

Esta unión está formada por la punta, la muestra y el medio ambiente que los separa. La punta es fabricada por el método electroquímico a partir de alambre de tungsteno de 0.8 mm de diámetro al cual se le aplica 6 volts en DC, en una solución 2M de KOH, mediante un circuito de control elaborado para tal fin [11]. Dicho circuito permite medir el tiempo de pulido, la corriente que circula, así como des-energizar el proceso y emitir un sonido audible para avisar el final del proceso. Estudios realizados [12] demostraron que esta condición de electropulido proporciona las puntas más agudas. También se han utilizado puntas de platino-iridio (Pt-Ir) que son más estables en condiciones atmosféricas. Estas son preparadas cortándolas con tijeras a un ángulo de aproximadamente 45 grados para luego montarlas.

La muestra inicial utilizada es el grafito pirolítico altamente orientado, muy utilizado como patrón de calibración dada su ordenación cristalina conocida, su fácil preparación y su estabilidad para trabajar con él a presión atmosférica. El medio ambiente entre la unión es el aire, ya que se trabaja a presión atmosférica. Sin embargo, ciertos materiales se degradan rápidamente en condiciones atmosféricas, lo que exige sean estudiados en condiciones de vacío.

#### b) Trípode piezoeléctrico

La punta es manipulada por medio de elementos piezoeléctricos colocados en forma de trípode ortogonal para fácil movimiento en las tres direcciones. La punta es montada (por medio de un portapunta) sobre el piezo Z (movimiento vertical) que es un tubo cerámico tipo EBL #3 [13] con una sensibilidad de 17 Å/volt. Los movimientos X y Y para el barrido se consiguen con dos cilindros cerámicos del mismo tipo, pero con sensibilidad de 5.2 Å/volt (véase Fig. 1).

Otro sistema de barrido actualmente muy utilizado y que fue introducido por Binning *et al.* [14], es el del piezo-tubo seccionado en cuatro cuadrantes. Con él es posible simplificar el tamaño del diseño y de realizar barridos más rápidos. Sin embargo, por su forma de trabajo (deflexión), ha demostrado producir imágenes deformadas cuando las áreas de barrido son grandes, además de disminuir su frecuencia de resonancia durante su dinámica de movimiento [15].

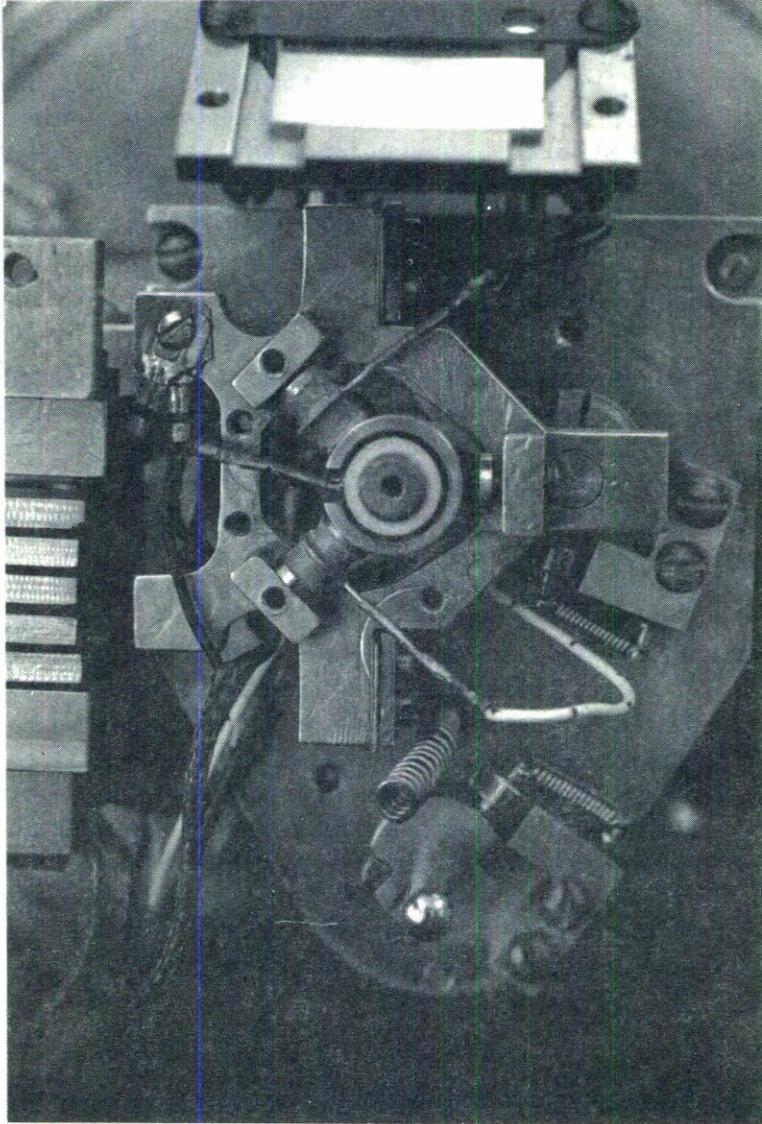


FIGURA 1. Trípode piezoeléctrico del MET. El piezo Z es un tubo y el sistema de barrido XY está formado por piezoeléctricos cilíndricos. La punta (no mostrada) va montada en el agujero central y la muestra va ubicada frente a la punta.

### c) Mecanismos de aproximación

Los mecanismos de aproximación se utilizan para llevar la punta hacia la muestra, o viceversa, desde unas distancias ópticamente visibles (mm) hasta distancias de tunelamiento (algunos angstroms). En nuestro caso, para la aproximación gruesa se utiliza un sistema manual de tornillo diferencial combinado con reducción tipo proporcional [16], el cual lleva la punta hasta distancias cercanas al tunelamiento. Una aproximación más fina se lleva a cabo extendiendo el piezo Z con un voltaje aplicado hasta detectar corriente de

tunelamiento. Dado que este proceso resulta lento y tedioso, por las distancias que se exigen entre punta y muestra, se implementó un sistema de motor a pasos para mover el tornillo diferencial tal que se detenga al sensar corriente de tunelamiento. Un factor determinante en la calidad de la corriente de tunelamiento y en consecuencia en la información obtenida, es la calidad de la punta preparada, por lo que es importante evitar cualquier contacto entre punta y muestra durante el acercamiento y el barrido sobre el material. Un caso contrario nos dará inestabilidades e imágenes alejadas de la realidad.

#### d) Sistema de aislamiento de vibraciones

La estabilidad mecánica de la unión túnel es de primordial importancia para la obtención de imágenes de buena calidad. Por ello en nuestro caso, la unión túnel se aísla del resto del sistema al montarse sobre una serie de placas apiladas entre sí y separadas con elementos toroidales de vitón. Este sistema de aislamiento ha demostrado ser de gran utilidad por lo compacto y robusto de su diseño [17], así como por su versatilidad para usarse en condiciones de ultra-alto-vacío. La alta estabilidad alcanzada depende también, en gran parte, de la rigidez del diseño del MET y del sitio donde se encuentre ubicado el microscopio. Es recomendable caracterizar las vibraciones del lugar, en cuanto a amplitud y frecuencia, usando un acelerómetro. Con ello es posible calcular niveles cuantitativos de reducción del ruido para lograr alcanzar los niveles deseables. Cuando no se cuenta con este dispositivo, como en el caso nuestro, es necesario adicionar sistemas de aislamiento de vibraciones para asegurar la disminución de los niveles de vibración. Nuestro MET está ubicado en el primer nivel de un edificio de dos plantas, donde cada laboratorio del primer nivel posee una unidad de ventana de aire acondicionado. En el techo del segundo nivel está ubicada una unidad integral de aire acondicionado que surte a toda la planta alta. Además existe en todo el edificio intensa actividad humana. Por esta razón, fue indispensable colgar el MET del techo mediante una serie de elementos elásticos (cámaras de bicicleta). Esto último logró reducir de manera importante los niveles de vibración.

## 2.2. Electrónica

La componente electrónica del MET la forman el convertidor I-V, el circuito de control (retroalimentación), los amplificadores de voltaje, el sistema de barrido XY, el sistema de adquisición de datos, el sistema de aproximación fina y las interconexiones eléctricas. A continuación detallaremos cada uno de estos elementos, así como la relación que guardan entre sí.

#### a) El convertidor I-V

Su función es la de convertir la corriente de tunelamiento ( $\sim$  nA) en una señal de voltaje "túnel" amplificada. Para ello se utiliza el c.i. AD515K que tiene un factor de conversación de 0.1 V/nA, con una amplificación posterior de la señal de 10 (1 V/nA). El convertidor I-V tiene un ruido de 2 mV pico-pico y está alimentando con dos pilas de 9 VCD para disminuir posibles ruidos de la línea. Este elemento está ubicado muy cerca de la unión

túnel para evitar que en el trayecto recoja señales externas que afecten a la señal principal. Generalmente se utiliza con el factor de conversión 1 V/nA.

b) El circuito de control (retroalimentación)

La función del circuito de retroalimentación es la de mantener constante la distancia punta-muestra a un valor deseable donde pueda medirse la corriente de tunelamiento.

Antes de enviar la señal de túnel para efectos de control, puede optarse por linealizar el voltaje "túnel" (pasándolo a través de un amplificador logarítmico) y así aumentar su estabilidad, o enviarlo directamente a un filtro pasa-bajos de primer orden ( $-6$  db/oct). En nuestro caso se utilizó un amplificador logarítmico AD759N. La señal filtrada es comparada con un voltaje de referencia seleccionado. El voltaje de referencia puede ser elegido dependiendo del valor de corriente túnel que se desee controlar. El circuito desarrollado permite controlar una corriente de tunelamiento en el rango de 0.1 nA a 10 nA.

El error de comparación  $\delta$  puede ser manejado a través de dos controles tipo proporcional e integral (PPI). La función del control proporcional es mover la punta en una forma proporcional a  $\delta$  y depende de las condiciones de la punta, la velocidad de barrido y los materiales que se estén analizando, entre otros. Las ganancias del proporcional diseñado van desde  $10^{-2}$  hasta 10. Ganancias grandes proporcionan respuestas rápidas, por lo que es importante conocer la frecuencia de resonancia mecánica del MET para poder trabajarlo a la máxima ganancia posible.

El control integral diseñado ayuda en la rapidez o retardo del tiempo de respuesta del manejo de  $\delta$  de manera que éste siempre sea un mínimo. La constante de integración va desde 1 V/seg hasta 1000 V/seg. Altos valores de integración significan respuestas rápidas pero con baja estabilidad. Es importante aquí definir su valor para que los tiempos de barrido sean compatibles y poder trabajar debajo de la frecuencia de corte de los circuitos electrónicos.

La señal proveniente del PPI, representará la señal de retroalimentación que se le aplicará al piezo Z para mantener la punta una distancia constante de la muestra (para el caso topográfico). Durante el barrido, esta señal de retroalimentación será la información que dará la topografía de la superficie.

Una forma alternativa de efectuar un barrido es eliminando el circuito de control una vez que se haya sentido la corriente túnel. De esta forma se estarán capturando las variaciones de corriente que vaya sentido la punta durante el barrido. Esto es posible realizarlo en áreas pequeñas de barrido y en muestras atómicamente planas. Este método es llamado espectroscopía y nos proporciona información de propiedades electrónicas del material en estudio.

Un segundo filtro pasa-bajos de segundo orden ( $-12$  dB/oct) puede ser utilizado para limpiar la señal retroalimentada de ruidos de alta frecuencia, antes de ser enviada como señal de control al piezo Z para corregir la posición de la punta y así cerrar el ciclo de retroalimentación. En la Fig. 2 se muestra el diagrama del circuito de control diseñado.

El voltaje de polarización que se aplica entre punta-muestra para originar la corriente túnel debe provenir de una fuente de muy bajo ruido y alta estabilidad. En nuestro caso la fuente tiene un ruido de 1.5 mV pico-pico de alta frecuencia (del orden de Mhz).

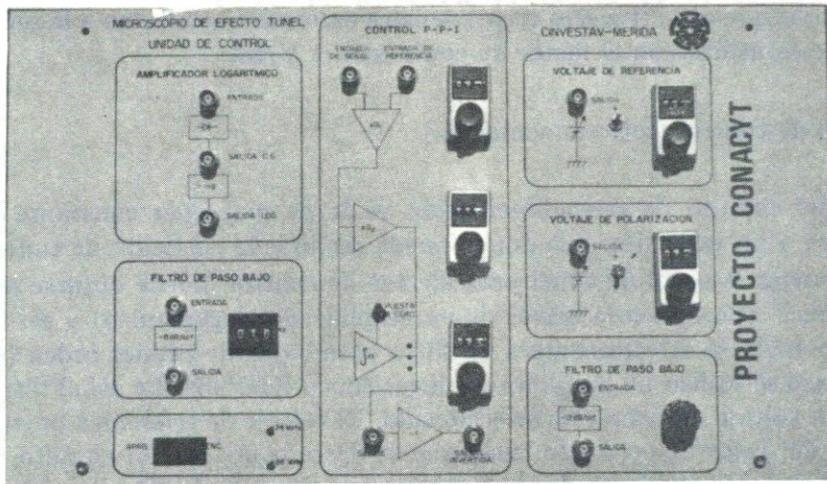


FIGURA 2. Circuito de control diseñado para controlar la distancia punta-muestra. El circuito incluye la etapa de amplificación logarítmica, así como la fuente del voltaje de polarización de la unión.

c) Amplificadores de voltaje

Para poder alcanzar grandes áreas de barrido es indispensable proporcionar un voltaje a los elementos piezoeléctricos por medio de amplificadores. Es importante mencionar que el nivel de ruido de cada amplificador debe ser muy bajo. En nuestro caso se diseñaron amplificadores que manejan  $\pm 150$  volts con ganancia variable, y con un nivel de ruido de 2 mV pico-pico. Considerando la sensibilidad del piezo Z de  $17 \text{ \AA}/\text{V}$ , entonces podemos resolver hasta  $0.03 \text{ \AA}$ . Para los ejes XY, la resolución es de  $0.01 \text{ \AA}$ . En la realidad la resolución global del sistema es de  $0.08 \text{ \AA}$ , debido a la combinación de ruidos de los elementos interconectados.

d) Sistema de barrido XY

El manejo de los piezos XY se realiza mediante una tarjeta convertidora D/A diseñada con un c.i. DAC703BH de 16 bits, el cual se interconecta al bus de una PC 386/33 para ser controlada por software. Su finalidad es tomar la información binaria procedente del bus de datos y convertirla a una señal analógica (voltaje) para ser aplicada a los piezos XY de forma que éstos se muevan en forma sincronizada y generen un área de barrido. Por medio del convertidor D/A sólo es posible manejar señales de  $\pm 10 \text{ V}$ , por lo que mayores voltajes son alcanzados por medio de los amplificadores.

e) Sistema de adquisición de datos

Para adquirir la información proveniente de la unidad de control, se emplea un convertidor A/D AD1674 de 12 bits. Con la información obtenida se genera mediante software el archivo de una matriz de puntos con información de X, Y y Z, para posteriormente presentarlo

en forma de una imagen. Mayores detalles del diseño de los dos incisos anteriores pueden encontrarse en la Ref. [18].

#### f) Sistema fino de aproximación

En la misma tarjeta de adquisición de datos se incluyó, mediante un convertidor de 16 bits DAC703BH, un sistema de comunicación para proporcionar, controladamente, un potencial al piezo Z para acercar la punta a valores de tunelamiento. Esto se realiza desde el tablero de la computadora, apoyado con un amplificador de voltaje de ganancia variable.

#### g) Interconexiones eléctricas

Para poder alcanzar niveles de ruido aceptables y así lograr resolución atómica es necesario, además de que cada componente electrónico en forma independiente tenga un bajo nivel de ruido, que al interconectarse entre ellos, este nivel de ruido se mantenga en intervalos aceptables. Para ello es conveniente utilizar los cables (coaxiales) con la protección adecuada para evitar interferencias y captura de ruidos, así como manejar adecuadamente las tierras utilizadas para evitar lazos que generan ruidos [19]. Estos cuidados deben extremarse en virtud de que las señales que se manejan son de niveles muy bajos, según se ha mencionado en el inciso c).

### 2.3. Computación

Aunque las primeras imágenes del MET se obtuvieron con ayuda de graficadoras, en la actualidad es común utilizar la computadora personal dada la gran cantidad de información que puede manejarse en una sola imagen obtenida. Ello da mayor calidad y poder de resolución, así como rapidez en su captura y presentación al grado tal, que es posible realizarla en tiempo real [20]. Una imagen está formada por los datos obtenidos en Z durante el barrido XY. A cada dato se le asigna un nivel de color en una tabla de 256 colores. Estas imágenes son llamadas imágenes de color falso. Los datos son presentados en pantalla y forman la imagen correspondiente.

El software utilizado para controlar el MET construido, ha sido desarrollado para ambiente WINDOWS 3.x en lenguaje compilado con Borland C++ versión 3.1 para sistema operativo MS-DOS 5.0 y puede ser utilizado en computadoras compatibles IBM-PC AT 386/486 con interfase gráfica de usuario MS WINDOWS 3.x.

El desarrollo en ambiente WINDOWS permite un rápido acceso al usuario, así como la facilidad para efectuar aplicaciones gráficas.

Los módulos disponibles para el usuario a través de un menú de opciones son:

#### a) Módulo de manejo de archivos.

- Abrir un archivo de datos.
- Guardar un archivo de datos.
- Exportar archivos a formato ASCII.

- Probar lectura/escritura de los puertos.
  - Salir del programa.
- b) Módulo de edición.
- Copiar la imagen para disponer en otras aplicaciones de Windows.
  - Cambiar el tamaño de la imagen (5 tamaños).
  - Dar ejemplos de presentación con funciones tipo.
- c) Módulo de configuración de barrido.
- Solicitar las dimensiones del barrido (X y Y).
  - Seleccionar la dirección y velocidad de barrido.
  - Solicitar el número de puntos por barrido.
  - Efectuar el control del acercamiento fino.
  - Guardar las características particulares de cada archivo.
  - Dar inicio al barrido (repetitivo o unitario).
- d) Módulo de imágenes
- Presentación tridimensional de la imagen.
  - Modificar la paleta de colores.
  - Exportar imágenes (bitmaps).
  - Efectuar escalamiento en la presentación de la imagen.
  - Efectuar sustracción de planos.
  - Efectuar promediado en los datos.

Actualmente se trabaja en el módulo de tratamiento digital de imágenes para lograr una mejor presentación de la información, tales como filtros digitales, transformadas de Fourier, efectuar acercamientos en una zona elegida, gráficas de línea, entre otras.

Una representación esquemática donde se muestra todo el conjunto del MET construido se muestra en la Fig. 3.

### 3. RESULTADOS

Con el objeto de caracterizar el sistema del MET desarrollado, se utilizó una muestra de grafito pirolítico (Unión Carbide) el cual posee una estructura cristalina conocida del tipo hexagonal y que muchos autores utilizan como patrón, dada su facilidad de preparación y su planicidad a nivel atómico.

Para ello se preparó una punta de tungsteno por la metodología descrita anteriormente y se montó en el MET. La muestra de grafito fue preparada despegando capas atómicas mediante una cinta adhesiva hasta dejar una superficie homogénea para tunelamiento.

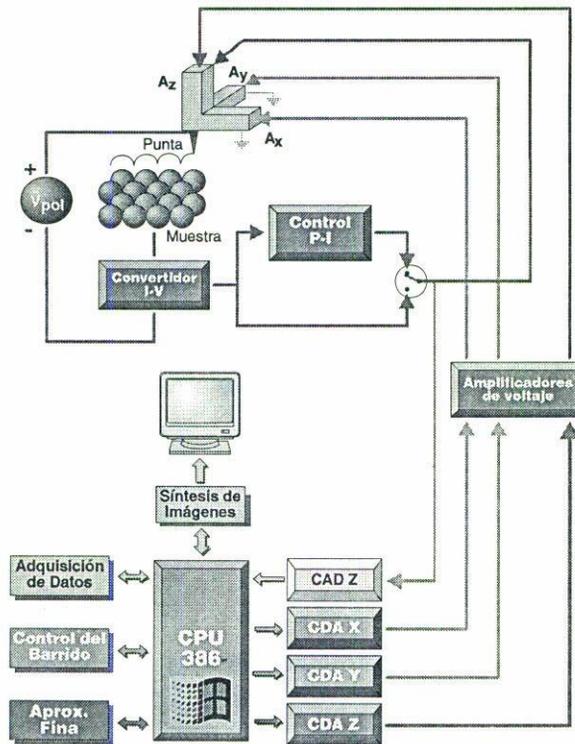


FIGURA 3. Esquema de conjunto del sistema del microscopio de efecto túnel construido. En el esquema se muestran las partes principales que lo forman y su interrelación. Esta última es explicada en el texto.

El equipo electrónico fue energizado con anterioridad para alcanzar estabilidad térmica. Una vez detectada la corriente túnel, se separó ligeramente la punta aplicando un voltaje al piezo Z y sin dicha corriente se dejó transcurrir un tiempo para alcanzar estabilidad mecánica. Obteniendo nuevamente la corriente túnel, se procedió a efectuar los barridos. En la Fig. 4 se presenta la conocida estructura hexagonal [21] que posee el grafito, así como sus distancias interatómicas. El grafito consiste de un arreglo hexagonal de átomos mantenidos juntos con uniones de carbón en capas desplazadas y alternadas. El desplazamiento de capas da lugar a tres sitios superficiales (véase Fig. 4): los círculos negros grandes, que representan la capa más alta de átomos; los círculos negros pequeños, que son una capa de átomos ligeramente inferior a la capa más alta (del orden de  $0.1 \text{ \AA}$ ); y los círculos blancos, que representan la capa más baja de átomos ubicada a  $1 \text{ \AA}$  por debajo de la capa más alta y que en una topografía se observan como depresiones (agujeros) en la superficie. La distancia interatómica entre vecinos más cercanos es de  $1.42 \text{ \AA}$  y la constante de red del plano es de  $2.46 \text{ \AA}$  [22]. Los resultados obtenidos con el sistema implementado se muestran en la Fig. 5, donde se presentan cuatro imágenes obtenidas a presión atmosférica y temperatura ambiente con diferentes tamaños de barrido, en el cual sólo a la primera imagen se le ha realizado un filtrado para eliminar ruidos. Las tres restantes se muestran tal como se obtuvieron. En la Fig. 5a) puede observarse la estructura hexagonal del grafito.

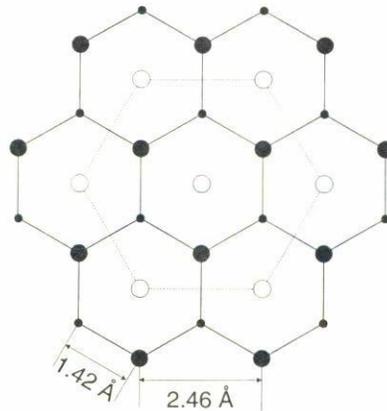


FIGURA 4. Estructura hexagonal del grafito pirolítico utilizado ampliamente en la calibración del MET a resolución atómica. Se muestran los parámetros de la red.

La imagen es de  $13 \text{ \AA} \times 20 \text{ \AA}$ . La sensibilidad de los piezoelectrónicos puede ser calculada usando la distancia interatómica conocida del grafito. Con esta imagen, la sensibilidad del piezoelectrónico es de  $6.7 \text{ \AA/V}$ , y mantiene un buen acuerdo con el valor de la sensibilidad proporcionada por el fabricante de los piezos en las direcciones X y Y ( $5.2 \text{ \AA/V}$ ). Este es un método común utilizado para efectos de calibración de los mismos. La diferencia puede ser explicada si consideramos que los elementos piezoelectrónicos poseen propiedades tales como “arrastre” e histéresis durante el barrido. Las Figs. 5b, c y d fueron obtenidas con diferentes velocidades de barrido y corresponden a mayores tamaños en el barrido y puede observarse la misma ordenación cristalina. Las sensibilidades calculadas usando estas tres imágenes varió hasta un máximo de  $7.1 \text{ \AA/V}$ . Todas las imágenes son de  $200 \times 200$  píxeles y sus tiempos de barrido oscilaron entre 8 y 35 segundos. Estos tiempos de barrido pueden darnos una idea de la frecuencia de resonancia mecánica de nuestro MET, que corresponde a un valor del orden de 5 KHz. Para evitar efectos producidos por ruidos externos, las imágenes fueron obtenidas durante la noche, cuando la actividad laboral en el edificio era baja.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se reportó el trabajo realizado para construir en México el primer sistema de microscopio de efecto túnel con resolución atómica en los aspectos mecánico, electrónico y de computación. Se mostraron las primeras imágenes de grafito pirolítico obtenidas con este sistema con resolución atómica y en condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica. Este sistema es actualmente utilizado para caracterizar materiales semiconductores tipo CdTe:In recientemente obtenidos mediante la técnica CSVT-evaporación libre [23] y así determinar el papel que juega el indio dentro de la red cristalina del CdTe.

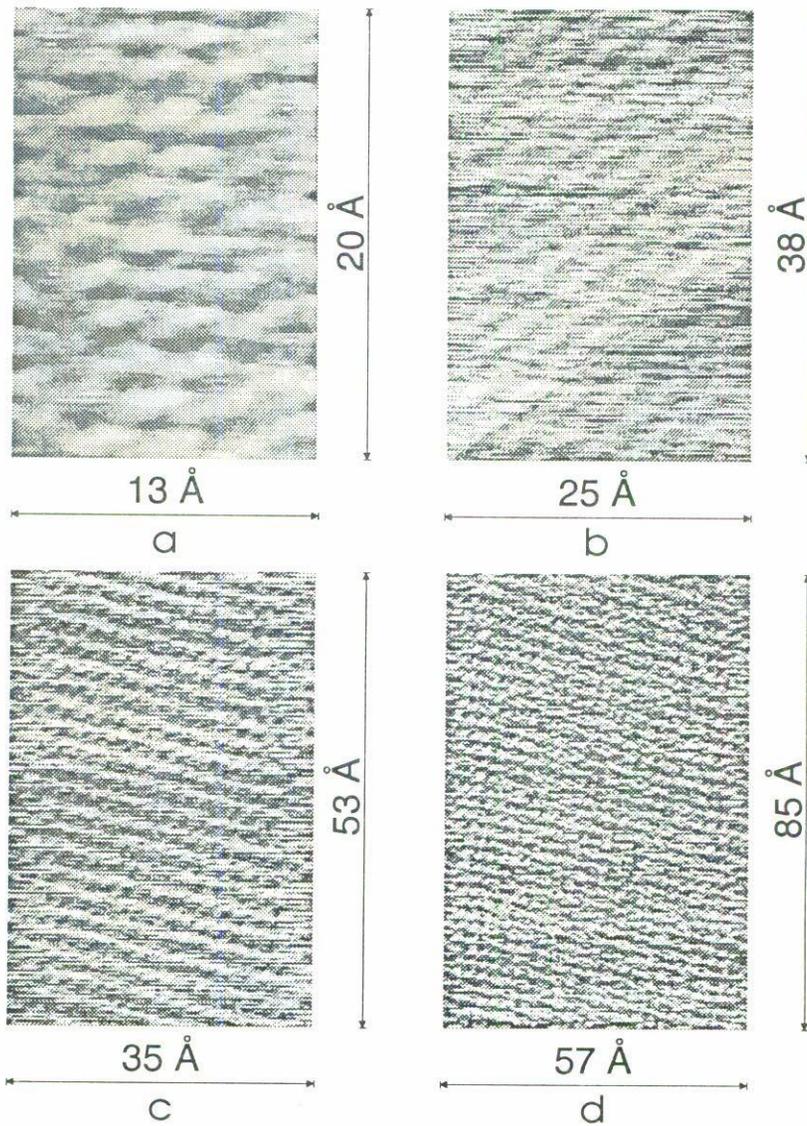


FIGURA 5. a-d) Cuatro imágenes de diferentes tamaños obtenidas con resolución atómica con ayuda del MET construido. Las imágenes fueron obtenidas a temperatura ambiente y presión atmosférica. En a) puede observarse con claridad la estructura hexagonal del grafito utilizado en virtud de las dimensiones del barrido realizado ( $13 \text{ \AA} \times 20 \text{ \AA}$ ). Las imágenes fueron obtenidas con diferentes velocidades de barrido y usando una punta de tungsteno.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo económico proporcionado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) bajo el proyecto No. 0562-E9108. Los autores agradecen todas las sugerencias y apoyos proporcionados por el Laboratorio de Microscopía Túnel del Dr. Miguel Aguilar de la Universidad Autónoma de Madrid y por

el grupo de Microscopía Túnel del Dr. Alex de Lozanne de la Universidad de Texas en Austin.

## REFERENCIAS

1. L. Esaki, *Phys. Rev.* **109** (1958) 603; *Rev. Mod. Phys.* **46** (1974) 237.
2. I. Giaever, *Phys. Rev. Lett.* **5** (1960) 147 y 464.
3. B.D. Josephson, *Phys. Lett.* **1** (1962) 251; *Adv. Phys.* **14** (1965) 419.
4. R. Young, J. Ward and F. Scire, *Phys. Rev. Lett.* **27** (1971) 922; *Rev. Sci. Instrum.* **43** (1972) 999.
5. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 178; *Physica* **109**, **110B** (1982) 2075.
6. H. Kumar Wicramasinghe, Ed., *Scanned Probe Microscopy*, AIP Conference Proceedings 241, AIP (1992).
7. Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti and H. Rohrer, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (2) (1986) 221.
8. D.P.E. Smith and G. Binnig, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 2630.
9. B. Drake, R. Sonnenfeld, J. Scheir, and P.K. Hansma, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 441.
10. M.A. Huerta Garnica and R. García Cantú, *Surf. Sci.* **181** (1987) 216.
11. V. Rejón, J.E. Corona, A.I. Oliva y J.L. Peña, *Instrumentación y Desarrollo* **3** (1993) 121.
12. A. Romero García, Tesis de Licenciatura, Ing. Química, ITM (1991).
13. Staveley Sensors Inc., 91 Prestige Park, Circle/East, Hartford, CT 06108, USA.
14. G. Binnig and D.P.E. Smith, *Rev. Sci. Instrum.* **57** (1986) 1688.
15. M.E. Taylor, *Rev. Sci. Instrum.* **64** (1993) 154.
16. A.I. Oliva, J.F. Haller, J.L. Peña y M. Aguilar, *Instrumentación y Desarrollo* **3** (1991) 28.
17. A.I. Oliva, Víctor Sosa, R. de Coss, Raquel Sosa, N. López Salazar and J.L. Peña, *Rev. Sci. Instrum.* **63** (1992) 3326.
18. V. Rejón, E. Avila, T. Kantún, A.I. Oliva y J.L. Peña, *Instrumentación y Desarrollo* **3** (1993) 125.
19. H.W. Hott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, John Wiley & Sons. (1976).
20. A. Bryant, D.P.E. Smith and C.F. Quate, *Appl. Phys. Lett.* **48** (1986) 832.
21. Sang-II Park and C.F. Quate, *Appl. Phys. Lett.* **48** (1986) 112.
22. A. Selloni, P. Carnevalli, E. Tosatti, and C.D. Chen, in *Proceedings of the 17th International Conference on the Physics of Semiconductors*, edited by J.D. Chadi and W.A. Harrison, Springer, New York (1985), p. 11.
23. R. Castro-Rodríguez and J.L. Peña, *J. Vac. Sci. Tech.* **A11**, (1993) 730.