

Diseño y construcción de un microscopio de efecto túnel

Fernando Camino (*)

Desde los primeros exitosos experimentos de G. Binnig, H. Rohrer y colaboradores, la microscopía de efecto túnel se ha convertido en una técnica invaluable para el análisis de superficies e interfases. En este trabajo se detallan los pasos del diseño y construcción de un microscopio de efecto túnel de pequeño tamaño ($<1\text{ cm}^3$), masa pequeña y con un método de aproximación gruesa basado en el deslizamiento inercial. El cabezal del MET tiene una alta frecuencia de resonancia producto de la pequeña masa del cabezal y también de la independencia del ambiente, mediante un control electrónico autónomo que reduce considerablemente el esfuerzo en aislar mecánicamente el sistema. Se explican los detalles del diseño de la electrónica de control, la construcción del cabezal del microscopio así como el software necesario para la operación del mismo.

(*) Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Casilla postal 31-139, Lima - Perú.

Introducción

Breve descripción del funcionamiento del MET

En 1981 Binnig, Rohrer y colegas¹ introdujeron el Microscopio de Efecto Túnel (MET). El principio del MET es simple: una punta muy fina se aproxima muy cerca de la muestra por medio de un sistema de realimentación, mediante el barrido de la punta sobre la muestra (similar al barrido que efectúan los electrones en una pantalla de TV) se obtiene una imagen a partir de la señal de realimentación (fig. 1). La punta así como la muestra son conductoras, y mediante la aplicación de un pequeño voltaje entre la punta y la muestra hacemos que una corriente de tunelaje empiece a fluir, considerando que la distancia entre la punta y la muestra es muy pequeña (del orden de un nanómetro). Esta corriente es fuertemente dependiente de la distancia y midiendo la corriente, la distancia puede ser determinada. La punta se mueve mediante piezoeléctricos cerámicos, los cuales cambian sus dimensiones al aplicárseles voltaje. La resolución del MET es muy alta, tiene resolución atómica y aquí reside su gran importancia, i.e. cerca de 1 Å lateralmente y 0.01 Å verticalmente.

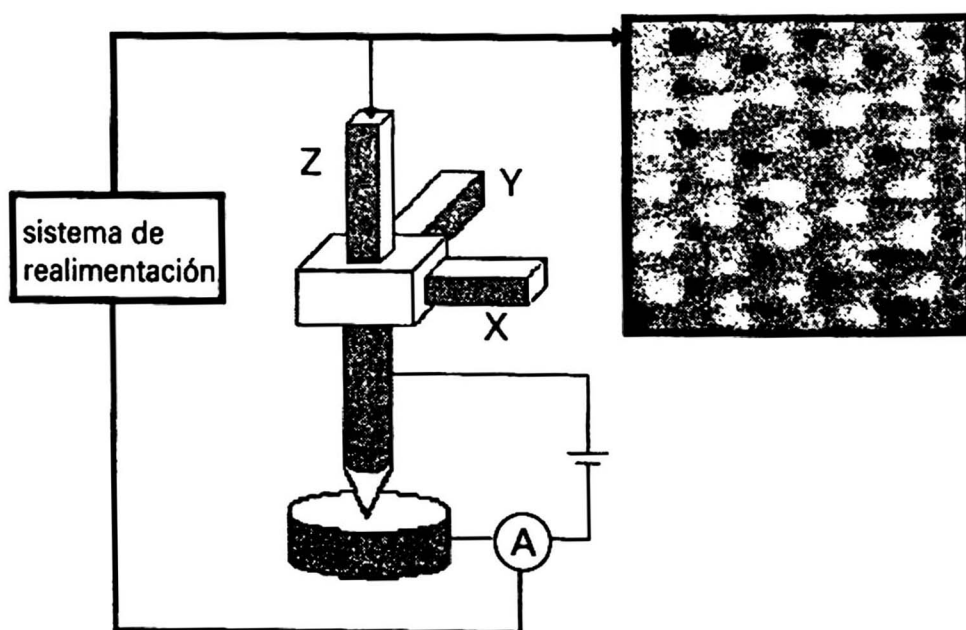


Fig. 1 En el MET la imagen se forma haciendo un barrido de una punta muy afilada sobre la muestra. Un sistema de realimentación mantiene la distancia punta-muestra (alrededor de 10 Å) constante controlando el voltaje aplicado al piezoelemento z . La distancia se determina midiendo la corriente túnel entre la punta conductora y la muestra conductora. Esta corriente es fuertemente dependiente de la distancia. Cuando se hace que la punta haga un barrido sobre la muestra aplicando voltajes apropiados a los piezos- x e y , el sistema de realimentación ordena al piezo- z que mueva la punta de tal forma que siga la superficie a una distancia punta-muestra constante. La señal de realimentación provee información de la topografía de la superficie y graficando esta señal, generamos una imagen. La imagen en la figura es una imagen real de un monocristal de grafito, tomada con nuestro MET. La distancia entre puntos claros (átomos de la primera etapa atómica superficial) es de 2,46 Å.

Principio del tunelaje

Existen dos modos de abordar teóricamente el efecto del tunelaje en el MET. El primero se conoce como el principio de dispersión, donde la ecuación de Schrödinger se resuelve acoplando una onda incidente con una onda reflejada y transmitida. Este modelo es simple, sin embargo, el cálculo de la probabilidad de transmisión puede ser muy difícil. Simmons² solucionó este problema en una dimensión utilizando el método WKB y un metal con electrones libres, lo que es un modelo muy simplificado. El segundo método se le conoce como el del hamiltoniano de transferencia³, en donde la punta y la muestra se consideran dos sistemas independientes con una interacción débil. Ambas teorías han sido utilizadas con éxito en uniones planas donde la distancia de separación es de 10 nm y el tunelaje es esencialmente unidimensional debido a la fuerte dependencia de la distancia. El gap de túnel en el MET es mucho más pequeño, cerca de 1 nm, y la punta se supone aguda y no plana. Esto hace al método del hamiltoniano de transferencia dudoso pues está limitado a una interacción débil entre los electrodos. Sin embargo es ampliamente utilizado ya que permite la incorporación de muchas partículas y efectos inelásticos en geometrías tridimensionales. A continuación daré una breve explicación del método de dispersión el cual aunque bastante aproximado es suficiente para justificar la dependencia exponencial de la corriente de tunelaje respecto a la distancia punta-muestra.

En la solución dada por Simmons², para ondas planas y un metal de electrones libres, la corriente de tunelaje I se puede describir en función del ancho de la barrera z y el voltaje aplicado V , por

$$I \propto \frac{\phi}{z^2} \exp(-A \phi^{\frac{1}{2}} z) - \frac{\phi + eV}{z^2} \exp[-A (\phi + eV)^{\frac{1}{2}} z], \quad (1)$$

donde ϕ es la altura media de la barrera por encima del nivel de Fermi del electrodo a potencial negativo, y la constante $A = (2m)^{1/2}/h$ (m es la masa del electrón y h la constante de Planck). La relación es también válida para altos voltajes en el modo de emisión de campo. En el límite de pequeños voltajes, la relación de corriente puede ser simplificada a

$$I \propto \frac{V}{z} \exp(-A \phi^{\frac{1}{2}} z) \quad (2)$$

La principal propiedad de la ec. (2) es la dependencia exponencial con la distancia punta-muestra z . Un cambio en distancia de tunelaje de 1 Å con $\phi = 4$ eV, cambiará la corriente de tunelaje en un orden de magnitud.

Construcción

Introducción

Para conseguir resolución atómica, el aislamiento de vibraciones es esencial. Existen dos formas de conseguir una solución adecuada. La primera es hacer la unidad del MET (el cabezal) tan rígido como sea posible. El segundo es reducir la transmisión de la vibración ambiental. Un sistema de supresión de vibraciones comúnmente usado consiste en un conjunto de resortes de suspensión y un mecanismo de amortiguamiento.

Todo cabezal del MET debe contener un mecanismo grueso de aproximación que permita reducir la distancia punta-muestra hasta la distancia de tunelaje. Se desea que este mecanismo sea lo más pequeño posible de manera que no disminuya la rigidez del cabezal. La elección del mecanismo de aproximación gruesa determina en gran medida la performance del cabezal final del MET.

Los sistemas de aproximación manual basados en motores a pasos, utilizando tornillos, resortes y palancas⁴ son simples pero no son soluciones compactas. Estos sistemas son susceptibles a influencias de la temperatura y la vibración. Existen otras formas de extender el rango de los piezoeléctricos. Las más comunes son: 1. multiplicación mediante pasos estáticos como en el "louse"⁵ o el inchworm,^{6,7} y 2. movimiento inercial,⁸ que utiliza la inercia de la parte a mover contra rápidos movimientos del piezoelemento. Nosotros utilizamos el sistema introducido por S. Kleindiek y K.H. Herrmann⁹, modificado ligeramente. Este es un posicionador tridimensional con aproximación fina y gruesa de ajuste puramente electrónico. Este sistema mejora la estabilidad mecánica mediante una rigurosa reducción del tamaño y la masa del sistema de posicionamiento, resultando en una alta frecuencia mecánica de resonancia que garantiza una eficiente protección contra las vibraciones ambientales. La idea básica es reducir el MET a unas pocas partes esenciales: Dos tubos concéntricos posicionadores para el movimiento lateral y longitudinal de la punta conectados por una base, un pedazo de alambre de Pt/Ir con la punta, un porta-muestra soportado por el piezotubo x/y. Para desacoplar el sistema mecánicamente del ambiente, las líneas de alimentación eléctricas deben de ser tan finas como sea posible. El sistema utiliza un mecanismo similar al que utiliza la Ref. 7, salvo que aquí lo utilizamos para controlar la aproximación de la punta a la distancia túnel.

El cabezal

La pieza principal del MET la constituye sin lugar a dudas el llamado cabezal del MET. El cabezal es la pieza en donde se ubican los piezoeléctricos de barrido, el sistema de aproximación fina y gruesa, la punta y la muestra.

El diseño de nuestro cabezal depende principalmente del método de aproximación gruesa que hemos elegido. El MET utiliza el método de deslizamiento inercial. En la fig. 2 podemos apreciar un esquema simplificado del arreglo mecánico

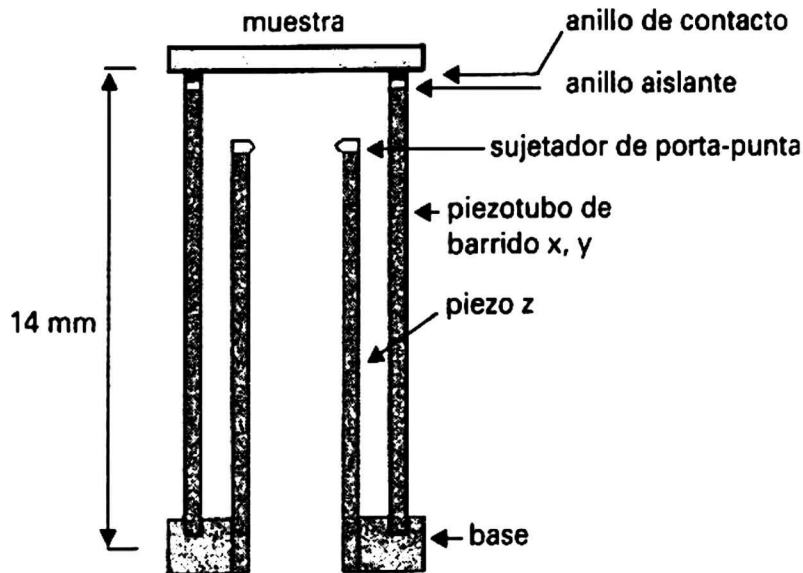


Fig. 2 Diseño esquemático del cabezal del MET. No se muestra el porta-punta. Ambos piezoeléctricos cilíndricos están montados en una base cerámica hecha a partir de lava volcánica.

Como se aprecia en la fig. 2, se montan dos piezotubos concéntricos en una base cerámica. El piezotubo externo tiene 12,7 mm de largo; 6,35 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor. Este piezotubo tiene su electrodo externo dividido en cuatro sectores y es el encargado de desplazar la muestra lateralmente respecto de la punta (que se ubica en el eje de los piezotubos). El piezotubo interno mide 12,7 mm de largo; 3,2 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor, y se encarga exclusivamente del desplazamiento vertical de la punta. El material de los piezos es PZT-5H y sus electrodos son de níquel.

La primera frecuencia de resonancia longitudinal del piezo z es de 55 kHz y la frecuencia de resonancia en el modo de barrido es de 22 kHz. Valores muy aceptables.

El porta-punta se aprecia en la fig. 3 (a) y en la fig. 3(b) se aprecia el conjunto completo.

Sistema de aproximación gruesa

Como hemos mencionado líneas arriba, el método de aproximación gruesa escogido es el de deslizamiento inercial. La velocidad de acercamiento se puede regular,

(70 nm/s como mínimo para una amplitud del diente de 60 V). La velocidad típica de aproximación es de alrededor de 360 nm/s, aunque es bastante lenta (se demora 23 min en avanzar 1 mm) es aconsejable ya que una vez llegada a la zona túnel no se quiere que la punta siga avanzando por inercia.

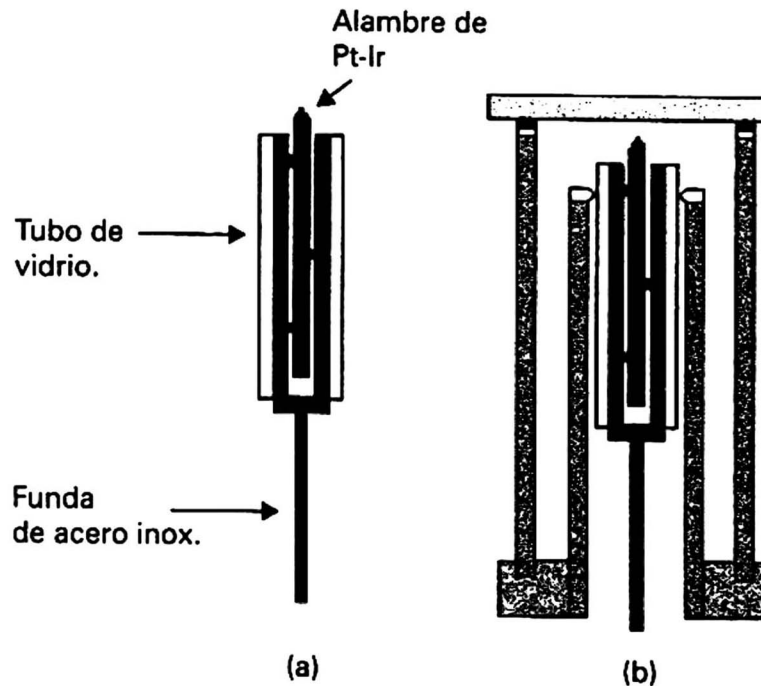


Fig. 3 (a) Porta-punta del MET. (b) Cabezal completo. Al aplicar un voltaje de diente de sierra al piezo *z* haremos que el porta-punta (y por consiguiente la punta de Pt-Ir) se mueva hacia la muestra por fricción y deslizamiento inercial.

Con 360 nm/s, lo que la punta avanza por inercia una vez llegada a la zona túnel (considerando una razón fricción/masa de 100 m/s^2) es $6,5 \times 10^{-6} \text{ \AA}$, es decir, nada. Con un periodo del diente de 0,8 ms, la velocidad de aproximación es de 0,45 mm/s y lo que avanza la punta por inercia es 1 nm, es decir, la distancia túnel promedio, pudiendo con mucha probabilidad, chocar la punta con la muestra. También se desea una velocidad de aproximación muy lenta, con el fin de considerar el tiempo de respuesta de la etapa electrónica. Una vez llegada la punta a la zona túnel, la electrónica no detiene inmediatamente el diente de sierra, sino que demora un tiempo muy corto pero finito, luego una velocidad muy lenta, asegura que la punta no avance demasiado durante este lapso de tiempo.

Idealmente, podemos suponer que la punta se mantiene en su posición durante el tiempo de caída del diente, por lo tanto en cada ciclo del diente, la punta avanza una distancia de 360 nm hasta que la electrónica detecte la corriente túnel y detenga la punta. En la fig. 4 podemos apreciar el movimiento de la punta respecto del movimiento del piezo *z*.

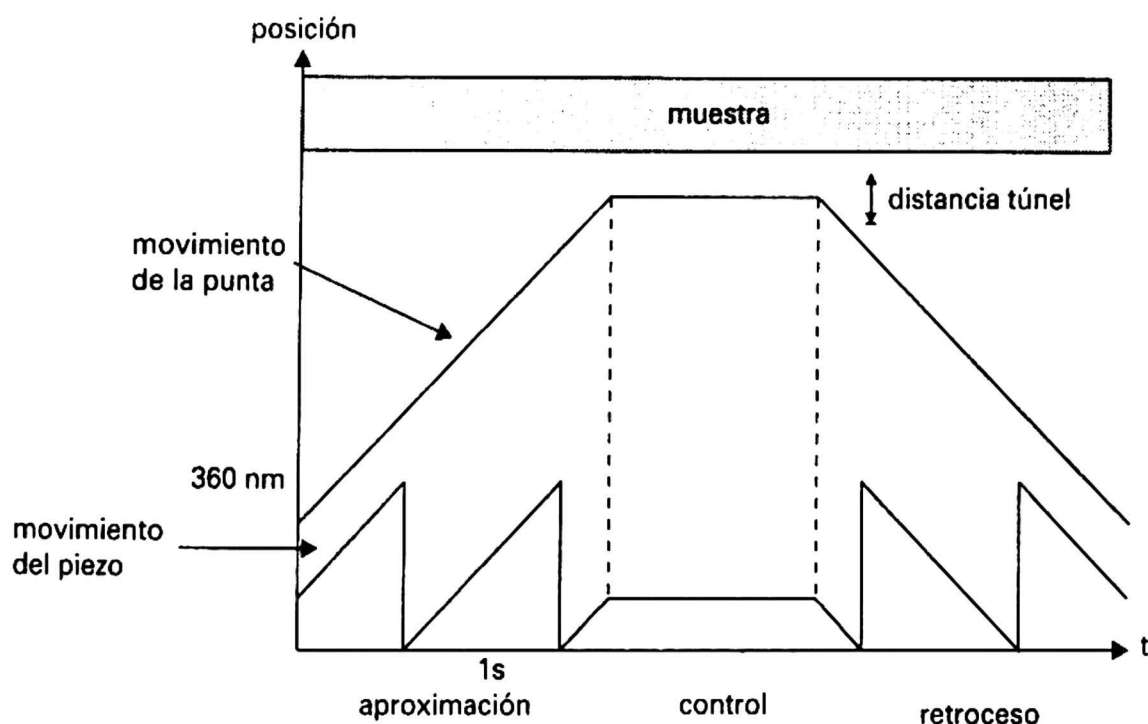


Fig. 4 La electrónica entrega el diente de sierra hasta que se detecte la corriente túnel. En la zona de control se procede a la medición, aquí el movimiento de la punta es muy fino y la aguja y piezo se mueven en conjunto (sin deslizamiento). Una vez terminada la medición, la electrónica entrega un diente de sierra de rampa inversa alejando la aguja de la muestra.

Movimiento fino

La aproximación de la punta cesa cuando se detecta la corriente túnel. De aquí se procede a tomar una imagen de la muestra. Al barrer el área de la muestra, el piezo z mueve la punta muy levemente, con el fin de mantener una corriente túnel constante durante el barrido. La punta se desplaza $60 \text{ \AA}/V$. Por lo tanto si se aplican voltajes de $0,1 \text{ mV}$, podemos desplazar la punta distancias por debajo de $0,01 \text{ \AA}$. Aunque en principio, la resolución vertical del MET puede fácilmente estar por debajo de $0,01 \text{ \AA}$, por problemas de estabilidad mecánica, no es posible ir por debajo de este nivel.

La electrónica

La etapa electrónica del MET tiene tres partes principales: el amplificador de corriente, el sistema de realimentación y los amplificadores que controlan el voltaje aplicado al piezotubo de barrido horizontal (ejes x , y).

El amplificador de corriente se construye alrededor de un amplificador operacional de alta impedancia y muy baja corriente "bias" (por ejemplo, el OPA128 de la Burr-Brown). Usualmente la corriente túnel está en el rango de $1\text{-}10 \text{ nA}$, y esta corriente

se detecta haciendo que el amplificador de voltaje detecte la caída de voltaje a través de un resistor de 1-100 M Ω . Lo más conveniente es colocar el amplificador lo más cerca posible de la unión túnel para minimizar la capacitancia.

Los componentes del sistema de realimentación se muestran en la Fig. 5. Usualmente la corriente túnel se linealiza mediante un amplificador logarítmico para compensar la dependencia exponencial de la corriente túnel con la distancia. Esta señal se compara con una señal de referencia seguida de un regulador proporcional integral el cual controla el voltaje aplicado al piezo z (el piezoeléctrico encargado del movimiento vertical de la punta). Muchos diseños utilizan solamente la parte integral del control PI.

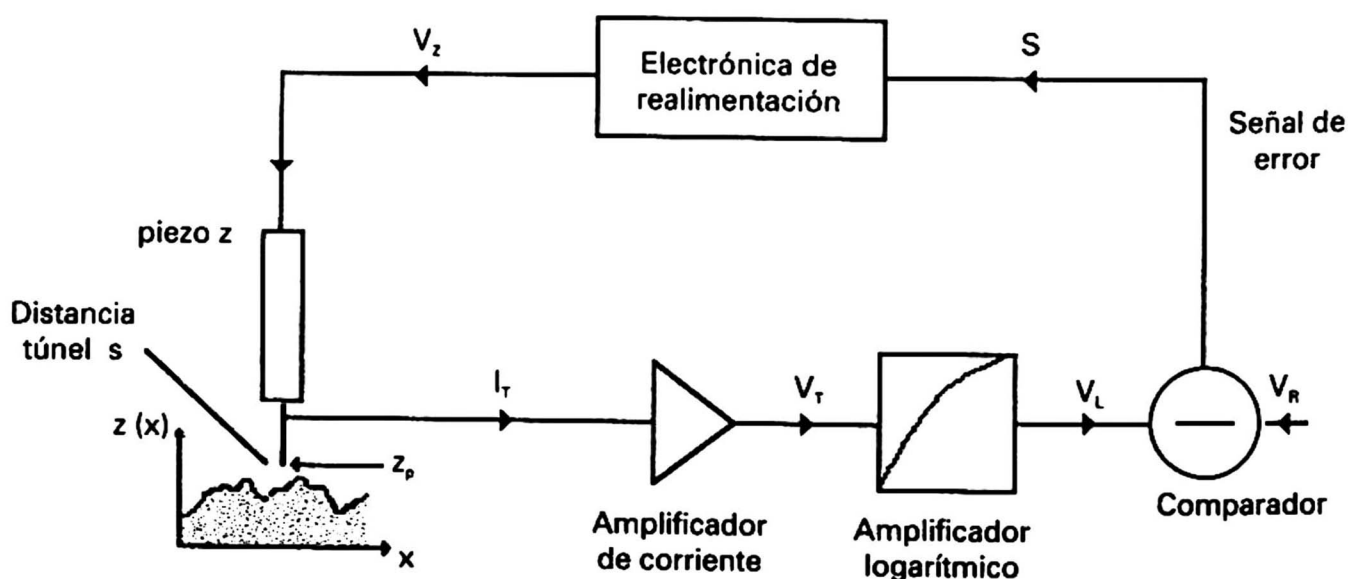


Fig. 5 Diagrama esquemático del lazo de realimentación en el MET.

Se desea que la ganancia total del sistema de realimentación sea lo más alta posible sin causar oscilaciones.

Nuestro diseño hace que los amplificadores que manejan al piezotubo de barrido sean amplificadores operacionales convencionales que operan a ± 18 V, evitando el uso de costosos amplificadores de alto voltaje. Estos amplificadores permiten seleccionar diferentes rangos de barrido, cambiando los valores de sus ganancias. Reciben las señales de barrido provenientes de los conversores D/A y se lo entregan a los electrodos adecuados del piezotubo de barrido.

Circuito de control

El sistema de control consta de dos etapas: el integrador y los Schmitt triggers.

El integrador.- El integrador es la etapa estándar de control. La fig. 6 muestra su diseño. La función de esta etapa es la de mantener la distancia punta-muestra constante durante una medición V_t es la señal túnel proveniente del preamplificador y V_{ref} define la corriente túnel que queremos mantener constante.

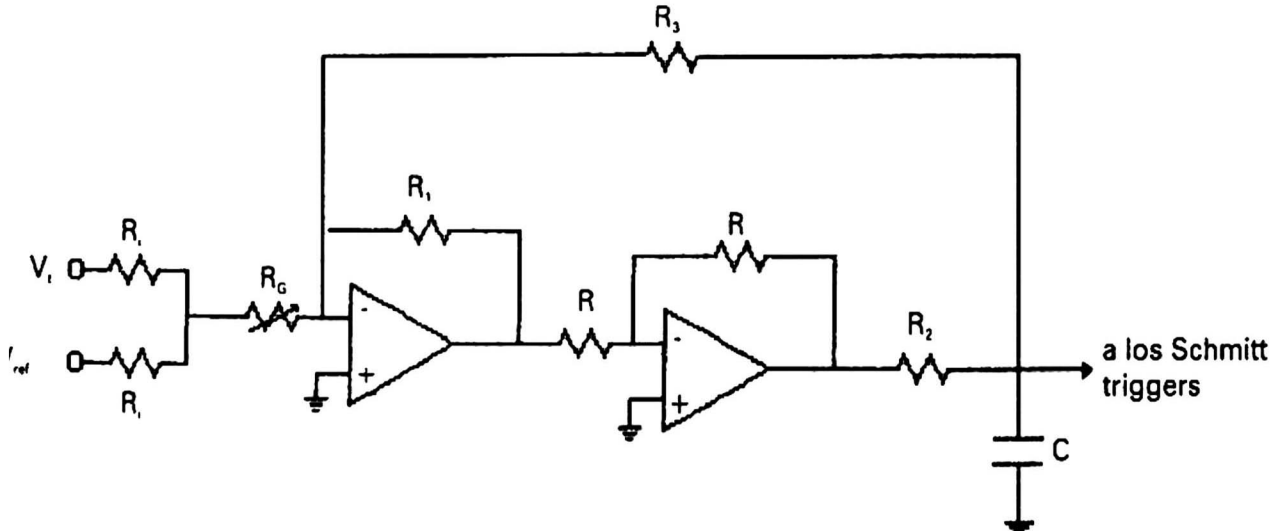


Fig. 6 Integrador. V_{ref} define la corriente túnel y R_G (que es variable) ajusta el ancho de banda del lazo y la ganancia de la etapa.

Si cumplimos con la condición $R_1 = R_2 + R_3$, el voltaje V_c en el condensador es

$$V_c = (V_t + V_{ref}) \frac{R_1}{R_2 (R_i + 2 R_G) C} t \quad (3)$$

Los valores que tenemos son $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$, $R_G = 0-1 \text{ M}\Omega$, y $C = 470 \text{ pF}$. Luego la constante de esta etapa varía entre 6500 y 94500 $\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Altos valores significan respuestas rápidas pero con baja estabilidad. La salida de esta etapa es la señal de retroalimentación que se le aplica al piezo z para mantener la distancia punta-muestra constante. Esta es la señal que nos da la información de la topografía de la muestra.

Los Schmitt triggers.- Cuando añadimos el circuito de la fig. 7 a la etapa de integración, tenemos el sistema que permite generar los dientes de sierra de aproximación (o alejamiento) hasta llegar a la zona túnel en forma automática.

Cuando la punta está alejada de la muestra, la rampa del diente tendrá una pendiente que depende del voltaje de referencia y de la ganancia del integrador, tal como lo muestra (3). Podemos llegar a velocidades de aproximación muy lentas definiendo un V_{ref} pequeño. La ec. (3) nos dice que la rampa aumentará de valor

linealmente hasta que se llegue al voltaje de corte definido por el Schmitt-trigger (comparador con histéresis) ST2. Una vez llegado a este valor, los diodos conducen y el condensador se descarga a través de ellos, comenzando una rampa positiva nuevamente. En el retroceso de la punta el proceso es similar salvo que la descarga se realiza por los diodos asociados con ST1.

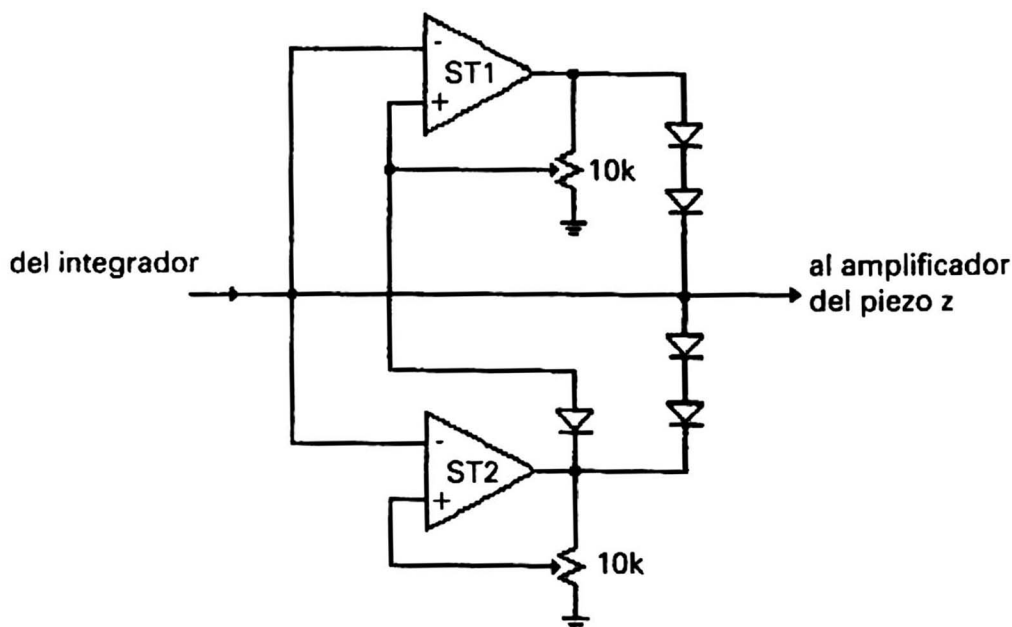


Fig. 7 Schmitt triggers. Los diodos son 1N4148. ST2 corta la rampa positiva (acercamiento) y ST1 corta la rampa negativa (alejamiento).

Computadora

Casi todos los microscopios de efecto túnel de hoy en día hacen uso de una computadora. La computadora puede ser utilizada tanto para las medidas como para la presentación de las imágenes. La tarjeta de interfase entre la computadora y la electrónica del MET necesita al menos dos conversores D/A para comandar los desplazamientos laterales (x, y) y un conversor A/D para almacenar el valor del voltaje aplicado al piezo z el cual lleva la información de la topografía de la muestra. Es preferible que estos conversores sean de 16 bits de resolución.

El software del MET debe de ser capaz de mostrar las imágenes después o durante un barrido. Lo puede hacer como una imagen en escala de grises (en dos dimensiones, el tono de gris vendría a darnos el dato de altura). Existen programas más elaborados permiten definir la localización de la fuente luminosa, creando efectos de sombras que resaltan las propiedades de la muestra. La calidad de la imagen puede ser ampliada por muchas técnicas. Una muy común es crear un plano de referencia desde el cual se miden las distancias, lo que permite corregir imágenes que están un poco inclinadas. Se puede reducir el ruido de la medición mediante filtros digitales. Además todo software de MET debe de tener la facilidad de almacenar las imágenes que se tomen.

Resultados experimentales

A continuación mostraremos imágenes con resolución atómica de la superficie de grafito pirolítico altamente orientado (HOPG). Las imágenes fueron tomadas en el modo de corriente constante. El grafito es un material popular en los estudios de microscopía de efecto túnel, ya que es muy fácil preparar una superficie limpia con grandes superficies atómicamente planas simplemente partiendo (cleaving) la muestra. El grafito es un material hecho por capas, donde las capas se mantienen unidas por fuerzas débiles de Van der Waals, lo que explica la facilidad de "clivelar" el material (el procedimiento práctico es adherir una cinta adhesiva a una cara del cristal y luego despegarla con cuidado, en la cinta quedará unida una capa muy fina dejando una superficie limpia y de gran área en el cristal).

Dentro de una capa, los átomos están ubicados en un arreglo hexagonal formado por fuertes enlaces π entre los átomos. En la fig. 8 se muestra una imagen obtenida con nuestro MET.

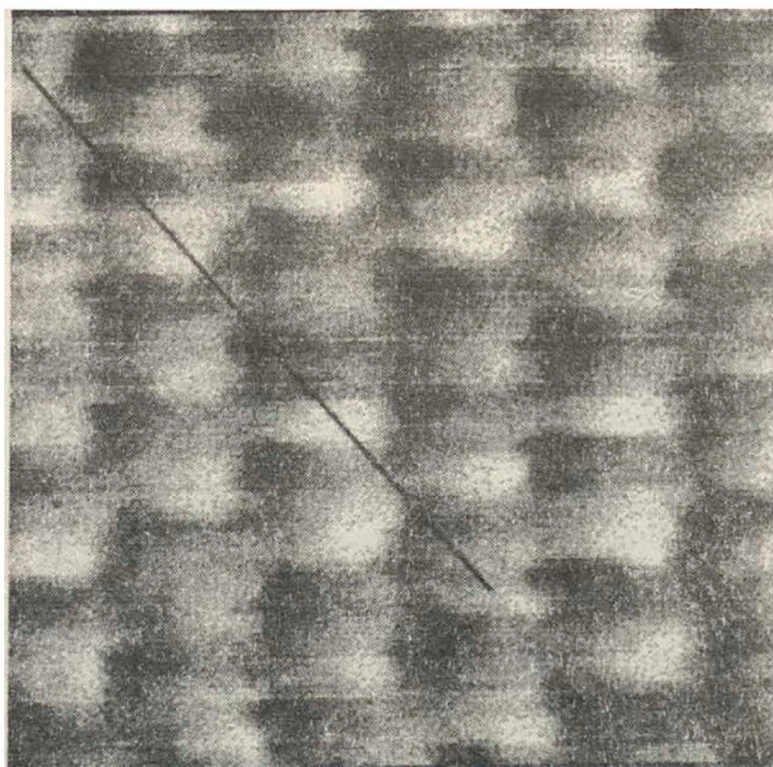


Fig. 8 Imagen suavizada vista de arriba de HPOG. $I = 0,5 \text{ nA}$, $V_{\text{punta-muestra}} = 0,1 \text{ V}$, voltaje de barrido = $0,1 \text{ V}$, número de columnas = número de filas = 128, promedio = 20. Con punta cortada de Pt-Ir. Los átomos visibles son solamente los ubicados en las posiciones β . La recta representa las posiciones por las que se ha efectuado un corte transversal, como se explicará más adelante.

La imagen de la fig. 8 no muestra la estructura hexagonal del grafito más bien muestra una simetría triangular. La interacción capa-capa puede explicar este hecho. Las posiciones de los átomos de carbón en una capa no son equivalentes (fig. 9). La

posición α tiene un átomo de carbón directamente debajo en la segunda capa, más no la posición β . Los enlaces π en las posiciones α interactúan con la capa inferior, conduciendo a nuevos enlaces bastante alejados del nivel de Fermi. Como hemos visto anteriormente, a bajos voltajes punta-muestra, el MET sólo muestra los estados en el nivel de Fermi, y consecuentemente una imagen con el MET sólo debe de mostrar las posiciones β . No sólo observamos esta anomalía con las imágenes de grafito. Existen otras anomalías tales como corrugaciones gigantes de la superficie de grafito, que son estudiadas y nos dan nuevas informaciones acerca de las propiedades elásticas de la superficie, tales como potenciales interatómicas y constantes elásticas locales.

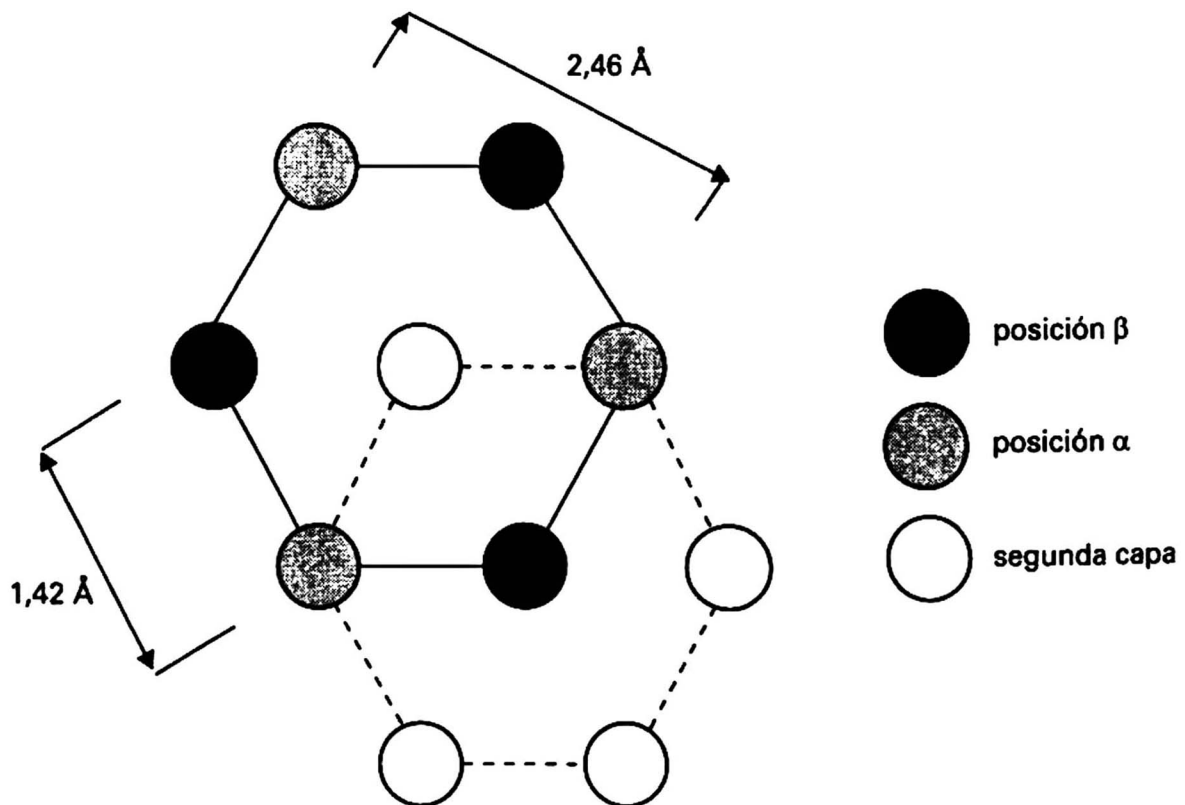


Fig. 9 Dibujo esquemático de dos capas de grafito. Las posiciones α , tiene un átomo directamente debajo en la segunda capa, mientras que las posiciones β no.

Según la fig. 9 los átomos negros (posiciones β) serán los que más sobresalen en la superficie, y por lo tanto se presentarán blancos en la imagen. Las posiciones α no conducen suficiente corriente túnel como para notarse claramente en la imagen, aunque la corriente que conducen no es completamente nula. Esto es justamente lo que se muestra en la imagen de la fig. 8, donde se aprecia claramente la estructura de triángulo equilátero que forman los átomos vecinos en las posiciones β .

La facilidad de corte transversal, nos puede confirmar lo arriba dicho. Si realizamos un corte transversal a lo largo de la recta que parte de una posición β y

biseca el lado opuesto, el corte cruzará sucesivamente una posición β , un hueco (átomo de la segunda capa) y una posición α , en forma periódica. El gráfico del corte transversal, debe de presentar picos de corriente para las posiciones β , mínimos en los huecos y pequeños picos para las posiciones α , ya que como hemos mencionado anteriormente, la corriente túnel en estas posiciones aunque pequeña, no es completamente nula. Esto lo apreciamos en la fig. 10, que muestra el resultado del corte transversal según la recta que se muestra en la imagen de la fig. 8.

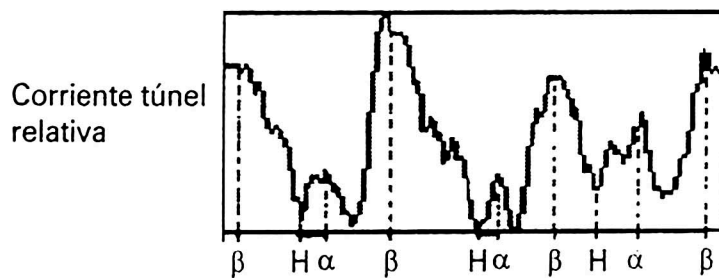


Fig. 10 Corte transversal según la recta de la imagen de la fig. 8. Esta recta pasa por cuatro máximos que corresponden a átomos en las posiciones β . H significa un hueco, es decir, una posición de un átomo de la segunda capa, sin ningún átomo sobre él.

Para calibrar el desplazamiento lateral, utilizamos la imagen de la fig. 11.

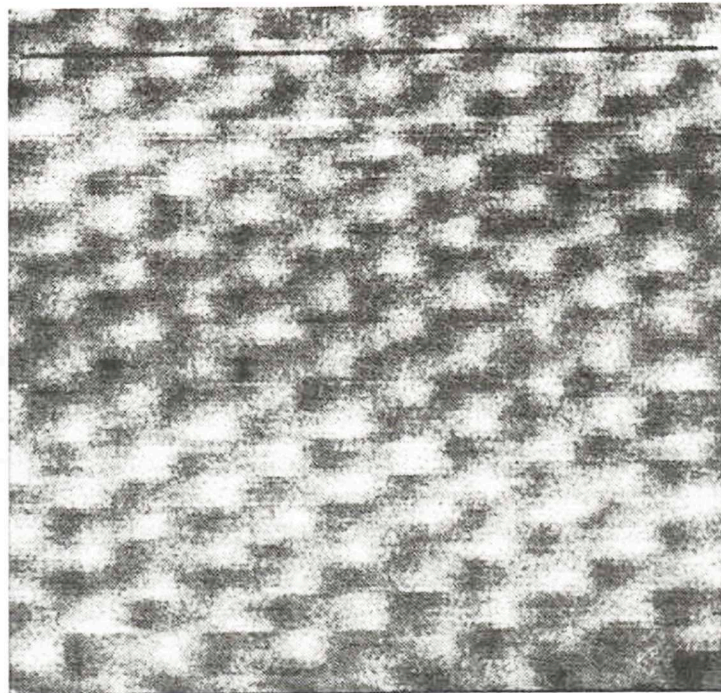


Fig. 11 Imagen suavizada vista de arriba de HPOG. $I=0,5$ nA; V punta-muestra = 0,1; voltaje de barrido = 0,205 V; número de columnas = número de filas = 128, promedio = 20. Con punta cortada de Pt-Ir.

Si analizamos la línea trazada en la fig. 11, vemos que pasa por 6 posiciones β . Dos posiciones β consecutivas forman un rombo a partir de dos triángulos equiláteros unidos por su base, tal como se muestra en la fig. 12.

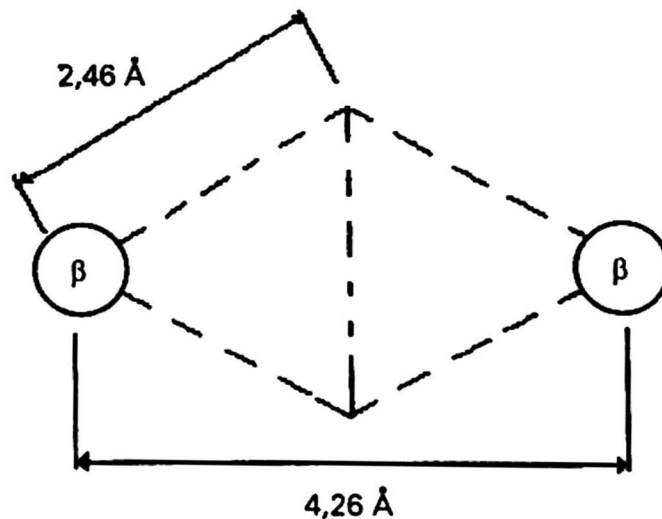


Fig. 12 La distancia entre dos posiciones β a lo largo de la recta trazada en la imagen de la fig. 11.

En el ancho de la muestra, según la recta trazada, existen cinco de estos rombos. luego el ancho de la muestra es de $5 \times 4,26 = 21,3 \text{ Å}$. Como el barrido lateral se hizo con un voltaje de $0,205 \text{ V}$, tenemos que la calibración en los ejes laterales es de $103,9 \text{ Å/V}$. Este valor experimental, está muy próximo al valor de 125 Å/V calculado teóricamente. La diferencia se debe a las propiedades intrínsecas de los piezoelementos cerámicos como el "arrastre" (creep) e histéresis durante el barrido.

En la fig. 13 apreciamos una imagen tridimensional de la superficie mostrada en la fig. 8.

No he detallado en este informe partes importantes del MET tales como el aislamiento de vibraciones, el software y la construcción de las puntas. Una explicación detallada de la construcción del MET está disponible en mi tesis de licenciatura.

Conclusiones

- En esta tesis se presentó el trabajo realizado para construir en el Perú el primer microscopio de efecto túnel con resolución atómica en los aspectos mecánico, electrónico y de computación. Se mostraron las primeras imágenes de grafito pirolítico obtenidas en atmósfera de aire, a temperatura ambiente.

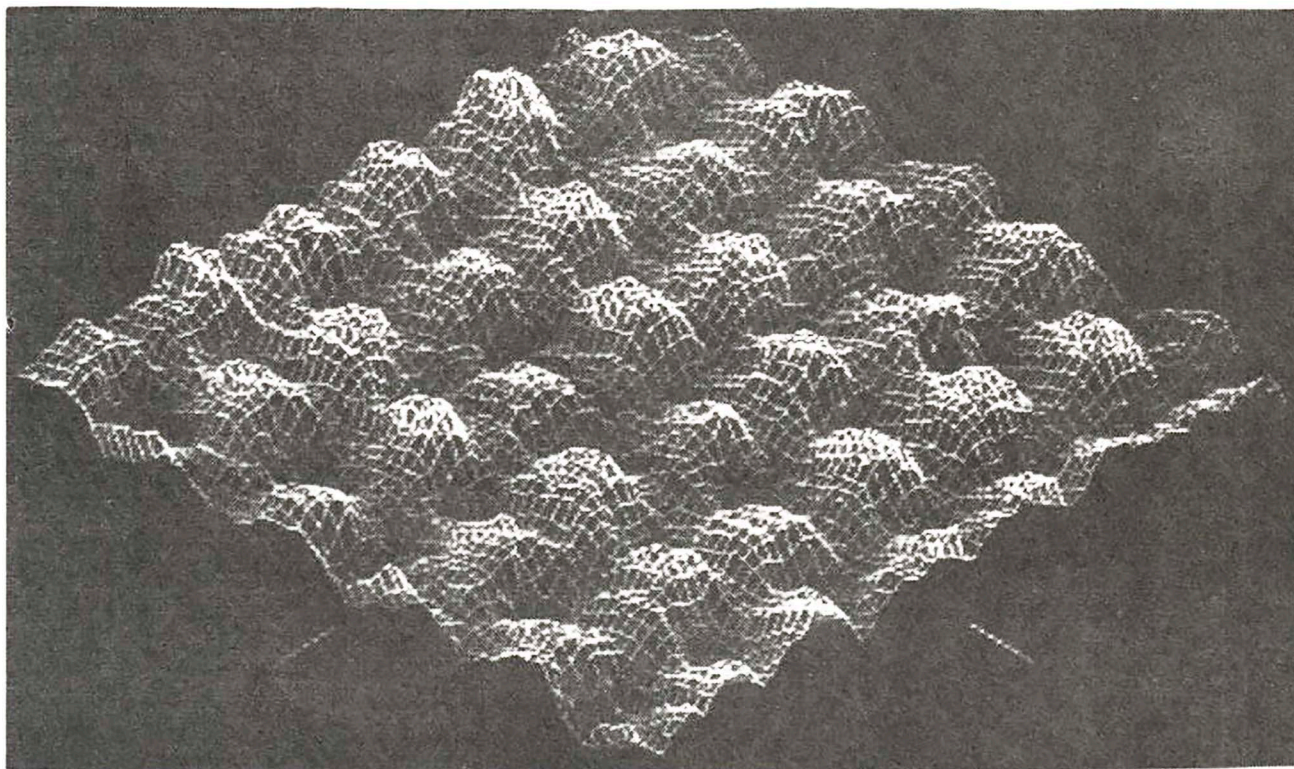


Fig. 13 Imagen tridimensional de la superficie mostrada en la fig. 8. Interlineado (densidad de la malla) = 1, ángulo azimutal = 50° , rotación en el plano horizontal, 45° .

- El sistema presenta una excelente supresión de vibración acústica. La resonancia lateral del MET se estima alrededor de 20 kHz, y la vertical en 100 kHz. Buena compensación térmica, y alta velocidad de operación. Tan altos valores en las frecuencias de resonancia son producto de la pequeña masa del cabezal y también de la independencia del ambiente, mediante un control electrónico autónomo que reduce considerablemente el esfuerzo en aislar mecánicamente el sistema.
- El principal propósito que llevó al Prof. Estrada a la construcción del MET fue la de familiarizarnos con él, para luego aplicarlo en el estudio del crecimiento de películas delgadas sobre superficies sólidas para lo cual tendremos que diseñar un sistema que opere en medio líquido. En un futuro cercano pensamos incursionar en el fascinante campo de las nanoestructuras.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a mi profesor asesor Dr. Walter Estrada por darme la oportunidad de participar en este fascinante proyecto. Su confianza y apoyo fueron indispensables para culminar esta etapa del trabajo.

Deseo agradecer al Dr. Boris Chornik del Departamento de Física de la Universidad de Chile quien nos apoyó en todo momento y nos permitió aprender todo lo que sabemos acerca del Microscopio de Efecto Túnel.

Agradezco a mis co-trabajadores, el Licenciado Ciro Carhuacho quien diseñó y construyó las tarjetas electrónicas del Microscopio y a Grabierl Altuna.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, y E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* 49, 57 (1982).
- ² G. Simmons, *J. Appl. Phys.* 34, 1793 (1963).
- ³ J. Bardeen, *Phys. Rev. Lett.* 6, 57 (1961).
- ⁴ F. J. Giessibl, Ch. Gerber, y G. Binnig, *J. Vac. Sci. Technol. B* 9, 984 (1991).
- ⁵ G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber y E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.* 40, 178 (1982).
- ⁶ *Inchworm* es una marca registrada de Burleigh Instruments.
- ⁷ D. R. Peale y B. H. Cooper, *J. Vac. Sci. Technol. A* 8, 345 (1990).
- ⁸ K. Besocke, *Surf. Sci.* 181, 145 (1987).
- ⁹ S. Kleindiek y K. H. Herrmann, *Rev. Sci. Instrum.* 64, 693 (1993).