

# HACIA EL STM: LA HISTORIA TRAS LA PRIMERA IMAGEN DE RESOLUCIÓN ATÓMICA EN CUBA

## TOWARDS THE STM: THE STORY BEHIND THE FIRST ATOMIC RESOLUTION IMAGE IN CUBA

M. P. HERNÁNDEZ<sup>\*a</sup>, J. A. MARTÍNEZ<sup>a†</sup>

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. javmar@imre.uh.cu<sup>†</sup>  
 †para la correspondencia

Recibido 1/5/2025; Aceptado 1/6/2025

<sup>\*</sup> Fallecida el 15 de agosto de 2024 (Rev. Cubana Fis. 41, 153, 2024).

La microscopía de barrido por efecto túnel constituye una herramienta ampliamente utilizada en las investigaciones de nanociencia y nanotecnología. Esta técnica tiene la ventaja de permitir estudiar las capas superficiales sin dañarlas o destruirlas y de alcanzar la resolución atómica. Su sencillez en comparación con otros instrumentos científicos ha permitido que diferentes laboratorios construyan sus propios microscopios. Se presenta aquí cómo fue construido el STM de la Universidad de La Habana y cómo se alcanzó con él por primera vez en Cuba la resolución atómica.

Scanning tunneling microscopy is a widely used tool in nanoscience and nanotechnology research. This technique has the advantage of allowing the study of surface layers without damaging or destroying them and of achieving atomic resolution. Its simplicity compared to other scientific instruments has allowed different laboratories to build their own microscopes. Here we present how the STM at the University of Havana was built and how it achieved atomic resolution for the first time in Cuba.

Keywords: Laboratory experiments and apparatus (Experimentos y aparatos de laboratorio); History of science (Historia de la ciencia); Scanning tunneling microscopes (Microscopios de barrido de efecto túnel).

### I. INTRODUCCIÓN

Una de las herramientas más empleadas por la nanociencia es el microscopio de barrido por efecto túnel (STM, del inglés: scanning tunneling microscope). Este microscopio es un resultado de la aplicación práctica del efecto túnel de la mecánica cuántica en la investigación científica.

El STM permite la obtención de imágenes topográficas de una superficie, la manipulación de átomos y moléculas, y brinda la posibilidad de caracterizar sus propiedades eléctricas locales. Con él podemos obtener información de la densidad electrónica de los orbitales moleculares incluso a nivel de moléculas individuales y estudiar los mecanismos de transporte de carga a través de las moléculas.

El STM ha jugado un papel primordial en el estudio de las monocapas autoensambladas (SAMs, del inglés: self-assembled monolayers) mediante el análisis de la orientación espacial y conformación de las moléculas individuales sobre los sustratos.

Trabajando con el STM a resolución atómica es posible obtener información estructural detallada de las interacciones atómicas en el sistema sustrato-adsorbato, haciendo posible fabricar estructuras más sofisticadas con potenciales aplicaciones en dispositivos electrónicos moleculares como alambres, conmutadores y diodos.

Aquí ofrecemos algunos datos sobre la construcción del primer STM cubano, que permitió obtener las primeras imágenes de resolución atómica en nuestro país.

### II. EL MICROSCOPIO DE BARRIDO POR EFECTO TÚNEL

Los antecedentes STM se remontan a noviembre de 1926, cuando Friedrich Hund envió para su publicación un artículo en el cual resolvía la ecuación de Schrödinger para el caso de un electrón que se mueve entre dos pozos de potencial separados por una barrera [1]. Hund encontró que existía una probabilidad de que bajo determinadas condiciones la función de onda del electrón atravesara la barrera y pudiese pasar al pozo vecino [1]. En éste, y una serie de artículos sucesivos publicados en 1927, Hund demostró los casos en que puede producirse este fenómeno y lo aplicó a la interpretación de espectros moleculares [2]. Trabajando independientemente, en un artículo publicado en 1928, Leonid Mandelstam y Mihail Leontovič llegaron a las mismas conclusiones [3]. De este modo fue postulado teóricamente el llamado “efecto túnel”, nombre que le fue dado por Walter Schottky en 1931 [4]. Entre 1927 y 1928, Ralph Howard Fowler y Lothar Nordheim, e independientemente Julius Robert Oppenheimer demostraron que la emisión por efecto de campo provocada por un campo eléctrico externo en metales podía ser explicada a través de la aparición de una corriente eléctrica que atravesaba mediante efecto túnel la barrera de potencial de la superficie del material [2,5-8].

En 1978, los científicos suizos Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, del IBM Zurich Research Laboratory, concibieron la idea de utilizar el efecto túnel para realizar estudios topográficos de mapeo de superficies basados en las ideas planteadas por Fowler, Nordheim y Oppenheimer. Con este objetivo, aplicaron pequeños voltajes de polarización entre una muestra conductora y una punta de tungsteno, la cual se encontraba a

fracciones de nanómetro de la superficie de la muestra dentro de una cámara con ultra alto vacío (UHV, del inglés: ultra high vacuum). En esas condiciones, ellos consiguieron provocar la aparición de una corriente por efecto túnel, estable, entre la superficie y la punta. Binnig y Rohrer con la colaboración de Christoph Gerber y Edward Weibel, fabricaron un equipo que trabajaba según este principio. De este modo, en 1981, se construyó el primer STM [9–11], por el cual Binnig y Rohrer recibieron el Premio Nobel de Física en 1986 [12, 13].

Desde los primeros momentos tras su invención, el STM ha sido una importante herramienta extensamente empleada en la caracterización de superficies de materiales, en el estudio de los procesos de adsorción de moléculas y nanopartículas y en la fabricación de dispositivos de electrónica molecular [14–18].

Sin embargo, la manipulación de átomos y moléculas, demostrada en 1990 por Donald M. Eigler y Erhard K. Schweizer [19], es su mayor fortaleza: ningún otro microscopio puede situar átomos y moléculas en posiciones determinadas. Esta capacidad permite fabricar estructuras partiendo de un diseño del material, átomo a átomo o molécula a molécula.

Dada su estructura relativamente sencilla, ha sido factible que diversos grupos científicos construyan sus propios STM, con más o menos originalidad, generando incluso publicaciones científicas relativas a la construcción o automatización de los STM [20, 21]. De hecho, en la literatura científica abundan ejemplos de investigaciones realizadas en los más diversos países, desarrollados o no, utilizando microscopios de barrido por efecto túnel “caseros” [22–30]. El costo de un microscopio comercial había impedido durante años poder disponer de ellos en los laboratorios de nuestro país, de ahí la necesidad e importancia de acometer el trabajo de construir uno por nuestros propios esfuerzos.

### III. EL STM DEL IMRE

Las primeras ideas de construir un STM propio se remontan a los finales de los 90 del siglo XX, durante el desarrollo en el entonces Instituto de Materiales y Reactivos (IMRE) de la Universidad de La Habana (UH) –hoy Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales– de una tesis doctoral en la que se emplearon datos publicados de mediciones de electrones balísticos de uniones Schottky metal-semiconductor usando un BEEM (en inglés: Ballistic Electron Emission Microscope), para desarrollar un modelo que explicara las heterogeneidades en dichas uniones [9]. El BEEM es un desarrollo del STM, al cual se le agrega otro terminal aparte de los de la muestra y la punta. De este modo, para construir un BEEM primero debía construirse un STM. Entonces, se decidió fomentar una colaboración con laboratorios que tuvieran STM o que hubieran construido su propio microscopio. Esta colaboración permitiría la compra de componentes fundamentales, utilizadas en estos microscopios, como el piezoeléctrico y el motor de pasos. Surgió entonces la posibilidad de establecer un intercambio con un grupo del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

(CINVESTAV-IPN), en Mérida, México; donde el Dr. Andrés Iván Oliva Arias ya había construido un STM [20]. A esta colaboración le faltó financiamiento y no pudo realizarse, pero desde entonces, nos aferramos a la idea de la construcción en Cuba de un STM, por la sencillez de su construcción y de sus potencialidades para el estudio de superficies que nos abría las puertas para las investigaciones en nanoestructuras.

Años después, se estableció una colaboración científica entre nuestro grupo en el IMRE con el Dr. José Valenzuela Benavides, del Centro de Ciencias de la Materia Condensada (CCMC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) —actualmente Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN)—, en Ensenada, Baja California, México, quien ya poseía experiencia en la fabricación de este instrumento. Con el financiamiento por parte de becas doctorales del Centro Latinoamericano de Física (CLAF) y de la Red de Macrouiversidades de América Latina y el Caribe, y proyectos internacionales financiados por la UNAM se pudo finalmente iniciar la construcción de nuestro STM.

Este microscopio de barrido por efecto túnel construido está integrado por las siguientes partes: una mesa antivibratoria, un cabezal que contiene el piezoeléctrico, la punta para el barrido y un circuito preamplificador, una base que soporta la muestra —y que contiene, además, un motor de pasos y los tornillos para el ajuste del cabezal—, una unidad de control de microscopio —que consta de: un circuito de realimentación, amplificador de alto voltaje, controlador de motor de pasos y una fuente—, una computadora, una tarjeta de adquisición de datos y un programa que controla la operación del microscopio.

La construcción del equipo se inició en 2007 en Ensenada. Primero, se fabricaron las piezas que conforman la base y el cabezal, que posteriormente fueron ensamblados. El cabezal consistió en un cilindro de acero donde van colocados el tubo piezoeléctrico y el circuito de preamplificación. La base consistió en un cilindro de aluminio donde está el portamuestras y en cuyo interior está el motor de pasos, que tiene como función acercar la punta a la muestra. (Figura 1). Tres tornillos de rosca fina de fueron insertados al cilindro de aluminio, que soportan el cabezal del STM. Uno de los tornillos acopló con el eje del motor de pasos, y los otros dos quedaron libres, siendo la función de estos dos últimos, realizar la aproximación gruesa de la punta a la muestra. El ajuste fino se realiza por medio del giro del tornillo acoplado al motor, que empuja la parte trasera del cabezal hacia arriba, provocando que su parte delantera aproxime paso a paso la punta a la muestra. Entre los tres tornillos va ubicada la muestra a analizar, sujeta a la base mediante una presilla que, además, hace la función de contacto eléctrico con la muestra. La base dispone de dos conectores, uno para realizar la conexión con el cabezal y el otro hacia la unidad de control. Finalmente, mediante resortes y pernos, fue asegurada la colocación rígida del cabezal sobre la base, como aparece en la Figura 1 y una tapa de aluminio fue incorporada para proteger el sistema del ambiente exterior.

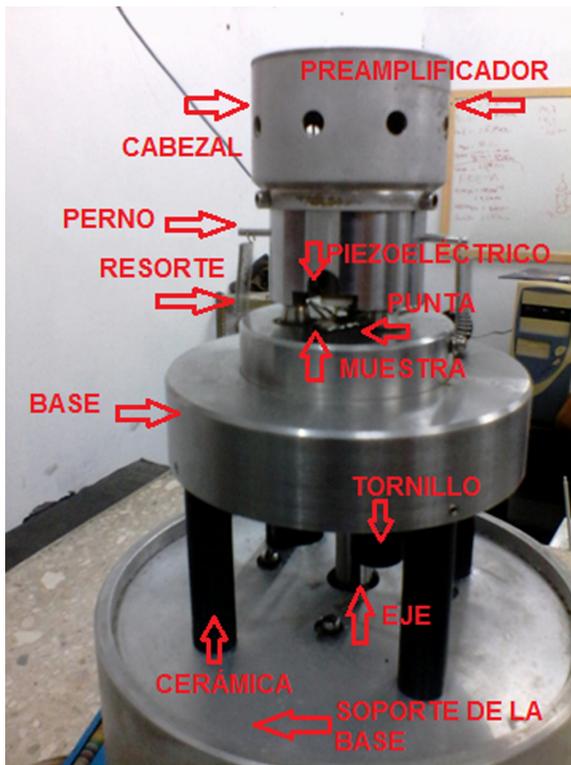


Figura 1. Base y cabezal del STM.

El cilindro piezoeléctrico, diseñado especialmente para su utilización en STM y microscopía de fuerza atómica, está constituido por segmentos denominados +X, -X, +Y, -Y y Z, permiten realizar, mediante la aplicación de señales eléctricas, deformaciones mecánicas en el cabezal en las direcciones X, Y y Z. En el interior del piezoeléctrico, solidaria con este, se colocó una cerámica para sostener una aguja de jeringuilla, que sirvió perfectamente como soporte a la punta del microscopio (Figura 1). Los segmentos +X, -X, +Y, -Y, Z del piezoeléctrico y la aguja de jeringuilla, fueron conectados al circuito electrónico de preamplificación colocado en la parte superior del cabezal. Terminados el cabezal y su base, se conectaron a una unidad comercial de STM disponible en el laboratorio del Dr. Valenzuela en la UNAM y se verificó su funcionamiento con resultados satisfactorios.

El siguiente paso fue la construcción de la unidad de control, un bloque electrónico integrado por un circuito de realimentación, un circuito amplificador de alto voltaje, un controlador de motor de pasos y una fuente. Esta unidad de control también gobierna al motor de pasos a través de un circuito integrado comercial. El circuito de realimentación consiste en un control automático proporcional-integral (PI). Su función es controlar el valor de la corriente de túnel mediante la comparación de la señal adquirida y un valor de referencia fijado por el operador, que es el llamado punto de operación del microscopio. Para la automatización del sistema fue empleada una tarjeta de adquisición de datos comercial. Esta fue configurada para generar las señales de barrido en las direcciones X y Y, que se aplican sobre el piezoeléctrico del cabezal y adquirir la señal provenientes de la unidad de control.

El programa de automatización del STM fue diseñado utilizando LabVIEW™, entorno de programación gráfico, extensamente empleado en la automatización de experimentos científicos, incluso de STM [21]. El programa de automatización constó de tres bloques fundamentales: uno para la generación de las ondas de barrido, otro en la adquisición de los voltajes de túnel y, finalmente, para el procesamiento de datos y formación de la imagen.

El bloque de generación de ondas del programa utiliza los dos canales de salida analógica de la tarjeta. Estas ondas tienen una forma triangular y, al ser aplicadas a los segmentos X y Y del piezoeléctrico producen un barrido bidimensional de la superficie por la combinación de los movimientos en X y Y. Teniendo en cuenta que el voltaje en la dirección Z del piezoeléctrico es proporcional a la topografía de la superficie, su muestreo permite obtener información para construir la imagen de la superficie. De este modo, la repetición sucesiva del barrido en X y Y permite obtener la imagen de la superficie [31]. Realizados todos estos pasos a lo largo de los años 2007 y 2008 en Ensenada y La Habana, quedaba concluida como tal la construcción del microscopio. Sin embargo, quedaban aún por construir un sistema de aislamiento vibracional, un sistema para fabricar las puntas, así como la conexión a tierra. Y lo más importante, demostrar mediante una imagen, la capacidad del microscopio para obtener resolución atómica.

El aislamiento vibracional es fundamental en este microscopio. Debido a la alta resolución del STM, capaz de ver átomos, las vibraciones mecánicas provenientes de la propia edificación donde se encuentra ubicado, la presencia de fuentes de ruido mecánico, como los pasos de las personas, el movimiento de automóviles, etcétera, afectan notablemente la calidad de las imágenes. Para alcanzar la resolución atómica, es necesaria una resolución lateral de al menos 10 pm, por lo que es necesario reducir las vibraciones externas al menos por debajo de 1 pm [18]. Las vibraciones externas pueden ser minimizadas aislando el instrumento de medición de las vibraciones externas, mediante el empleo de sistemas antivibratorios [32]. Las mesas antivibratorias también son sistemas que se venden comercialmente, pero que con cierto grado de creatividad pueden ser sustituidas convenientemente por sistemas "caseros".

Una mesa antivibratoria consiste en un sistema mecánico que idealmente tiene el comportamiento de un oscilador armónico críticamente amortiguado [32]. En este oscilador, las vibraciones que actúan sobre él son absorbidas y el sistema es restablecido en su posición original en un mínimo de tiempo. De este modo, un STM colocado en una mesa antivibratoria permanece aislado de las vibraciones propias de la edificación donde está instalado, que pueden variar considerablemente en amplitud y frecuencia según el tipo de construcción, piso y lugar de emplazamiento [34]. De este modo, el diseño de estos sistemas puede ser muy variado. La construcción resultante es una combinación de materiales rígidos de gran masa, como granito y acero, para eliminar los efectos de las altas frecuencias; materiales elásticos, como gomas y colchones de aire, para eliminar las bajas frecuencias; hasta obtener el adecuado amortiguamiento.

La mesa antivibratoria construida en el IMRE para el STM fue aislada del suelo mediante piezas de goma. Sobre estas fue colocado un cajón de madera relleno con arena e, inmerso en ella, la base de un soporte metálico de gran masa. Sobre este soporte se colocaron alternativamente piezas de goma y de granito, además de un neumático inflado, a modo de colchón de aire (Figura 2).



Figura 2. Mesa antivibratoria con el STM.

Al no contar con un medidor comercial de vibraciones, el funcionamiento de la mesa antivibratoria se evaluó de la siguiente forma: Sobre la superficie superior de la mesa antivibratoria se instaló un interferómetro de Michelson [34] observando la aparición de franjas de interferencia en ausencia de vibraciones mecánicas externas, así como el inmediato restablecimiento de estas, décimas de segundo después de realizar perturbaciones mecánicas en el local. La observación de las franjas de interferencia en ausencia de vibraciones forzadas en el local, así como el rápido restablecimiento del patrón de interferencia con posterioridad a la realización de estas, fueron los indicadores para considerar la existencia de un buen aislamiento vibracional.

La resolución lateral del STM está determinada por el ancho e intensidad del filamento de corriente túnel, por el potencial aplicado, por las propiedades físicas de la punta y la muestra, y por los estados electrónicos de la superficie y la punta [36].

De este modo, disponer de puntas de calidad es imprescindible para lograr buenas imágenes con resolución atómica.

Una punta debe de cumplir los siguientes requisitos: longitud corta, simetría cónica o hiperbólica, ápice afilado y ser fabricada de un metal relativamente inerte. Los métodos

electroquímicos son fáciles y rápidos para obtener puntas baratas y confiables para STM [37–39]. De este modo, para la fabricación de las puntas empleamos el método electroquímico de corriente alterna [37]. En este método, un alambre de tungsteno de 0.25 mm de diámetro es sumergido en un electrolito a una profundidad entre 0.4 y 1 mm. El electrolito empleado fue una solución de hidróxido de sodio de concentración 2-6 mM. Como contraelectrodo empleamos un aro de cobre colocado sobre la superficie del electrolito. Para esto fue construido un equipo [39] basado en el diseño de J. P. Ibe y colaboradores [40], que permitió la fabricación de las puntas, mediante la aplicación de un voltaje hasta que, por la acción de la reacción electroquímica, el tungsteno forma la punta de geometría cónica (Figura 3).

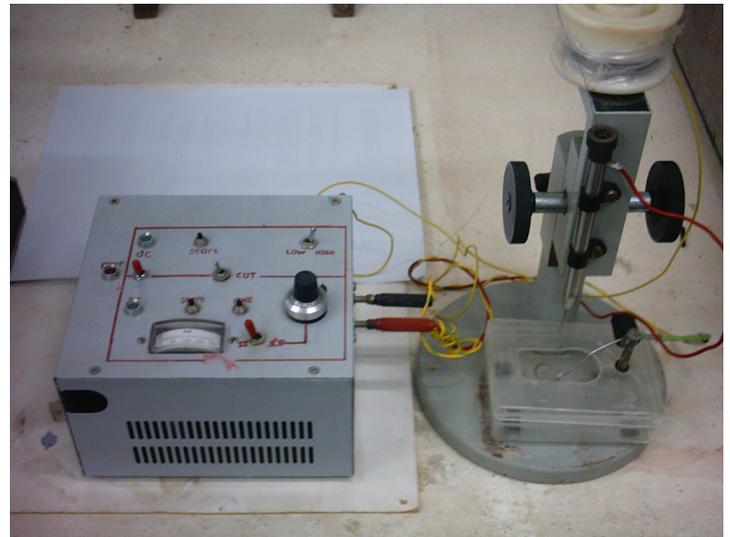


Figura 3. Equipo para la fabricación de puntas.

Sin embargo, a pesar de ya tener el STM, el sistema antivibracional y la fabricación de puntas listas, no fue de inmediato que alcanzamos la resolución atómica, debido a que el ruido eléctrico en las imágenes impedía ver los átomos. Durante un tiempo, fuimos asegurándonos que cada una de las partes que componían el microscopio funcionaban bien. Fue un ejercicio en el creamos circuitos de prueba, mediciones de señales de corriente y voltaje en el tiempo en todos los circuitos del STM. Un reacomodo de todas las tierras resolvió el ruido en las imágenes, para lo cual fue necesario modificaciones en la instalación.

Finalmente, el 24 de febrero de 2009 fue la fecha en que se logró adquirir por primera vez una imagen con resolución atómica en Cuba, correspondiente a una superficie de grafito (Figura 4). Para lograr la resolución atómica se realizó una calibración preliminar basada en la medición de tamaños de granos de oro, y pistas de disco compacto, previamente observadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM, del inglés: scanning electron microscope) y luego se realizaron sucesivos barridos de la muestra disminuyendo su amplitud y seleccionando la frecuencia de barrido adecuada, hasta que fue posible visualizar los átomos.

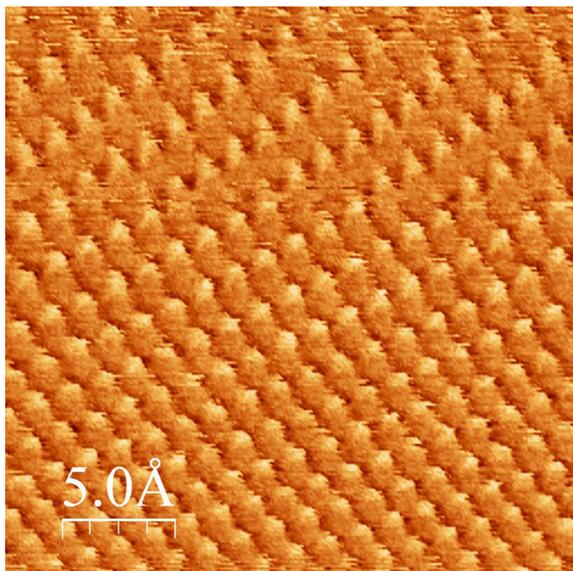


Figura 4. La primera imagen de resolución atómica adquirida en Cuba, átomos de grafito. IMRE, Universidad de La Habana, 24 de febrero de 2009.

El siguiente paso, consistió en la calibración del cabezal del microscopio en las direcciones X y Y, a partir de las imágenes de resolución atómica, que proporcionaban las distancias entre los átomos de grafito.

En imágenes de resolución atómica realizadas sobre áreas de diferente tamaño, aplicando diferentes voltajes al piezoeléctrico en la dirección X e Y, realizamos el conteo de la cantidad de átomos presentes a lo largo de un perfil trazado sobre la imagen, y podemos establecer la magnificación para cada voltaje.

En el caso de la calibración del eje Z, el procedimiento fue el siguiente. Conociendo el valor de la altura de los escalones monoatómicos del grafito, la medición de los voltajes en Z en escalones monoatómicos permitió realizar la calibración.

Este proceso, descrito en pocos párrafos, no estuvo exento de dificultades, errores e imprevistos. Un caso curioso fue en una ocasión la afectación que sobre el STM estuvo realizando durante algunos meses un aire acondicionado defectuoso, que incrementaba desmesuradamente la humedad del local donde se encontraba el equipo, lo que se manifestó en un incremento del ruido eléctrico en el cabezal del STM. Varias semanas tomó identificar el origen de esta fuente de ruido, que fue eliminada después de reparar el aire. Originalmente, la mesa antivibratoria fue construida en un local muy pequeño, por lo que su funcionamiento no fue eficiente. No fueron pocas las dificultades ya explicadas para garantizar la calidad de la conexión a tierra. A todo esto, podrían agregarse las conocidas dificultades con las interrupciones del servicio eléctrico.

Desde que se logró la primera imagen de resolución atómica, el equipo ha sido empleado en la investigación científica y las imágenes adquiridas con él han sido publicadas en diversas revistas científicas [41–52].

En el propio año 2009 nuestro laboratorio en el IMRE recibió la visita del Dr. Christoph Gerber, uno de los creadores del STM en 1981. Durante su visita elogió la originalidad y calidad de

las soluciones propuestas para superar las dificultades y poder poner en funcionamiento el STM y realizó valiosas sugerencias para su mejoramiento (Figura 4).



Figura 5. Visita del Dr. Christoph Gerber al STM del IMRE, noviembre de 2009.

Los comentarios elogiosos del Dr. Gerber fueron de gran estímulo para nosotros, quienes continuamos empeñados en ver, a través de un pequeño túnel, los más pequeños detalles de los materiales en la nanoescala.

#### IV. CONCLUSION

La obtención de la primera imagen de resolución atómica en Cuba fue el resultado del empeño de un grupo de investigación del IMRE, que en colaboración con un grupo mexicano pudo acometer la labor de construir un STM y ponerlo en funcionamiento. Este resultado demuestra que es posible, en las condiciones de nuestro país construir equipamiento científico de avanzada y lograr con él resultados de impacto.

#### V. ACKNOWLEDGEMENT

La construcción del STM en Cuba fue el resultado del trabajo de un equipo dirigido por Mayra Paulina Hernández Sánchez, en Cuba y José Valenzuela Benavides en México, e integrado por: Javier Alberto Martínez Pons, Carlos Alberto Canino Ramos, Antón Mesa, y José Orlando Abad Hernández. Otras personas a quienes agradecemos su colaboración para que el microscopio se hiciera realidad son: Yohan Pérez Moret, Manuel Herrera Zaldívar, Carlos Alonso Villasuso, Luis Ponce Cabrera, José Alfredo Herrera Isidrón, Edwin Pedrero González y Ernesto Estévez Rams.

#### REFERENCIAS

- [1] F. Hund, Z. Phys. **40**, 742 (1927).
- [2] E. Merzbacher, Phys. Today **55**, 44 (2002).
- [3] L. Mandelstam y M. Leontowitsch, Z. Phys. **47**, 131 (1928).
- [4] W. Schottky, Phys. Z. **32**, 833 (1931).
- [5] L. Nordheim, Z. Phys. **46**, 833 (1927).

- [6] J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.* **31**, 66 (1928).
- [7] J. R. Oppenheimer, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **14**, 363 (1928).
- [8] R. H. Fowler y L. Nordheim, *Proc. Roy. Soc. London A* **119**, 173 (1928).
- [9] G. Binnig y H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* **55**, 726 (1982).
- [10] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber y E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 178 (1982).
- [11] G. Binnig [sic.], H. Rohrer, Ch. Gerber y E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 57 (1982).
- [12] G. Binnig y H. Rohrer, *Rev. Mod. Phys.* **59**, 615 (1987).
- [13] G. Binnig y H. Rohrer, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **26**, 606 (1987).
- [14] R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy. Methods and Applications* (Cambridge University Press, Cambridge, 1994), pp. 291–580.
- [15] Ch. Bai, *Scanning Tunneling Microscopy and its Applications*, 2nd ed. (Shanghai Scientific and Technical Publishers/Springer, Shanghai/Berlin, 1995), pp. 165–344.
- [16] K. Oura, V. G. Lifshitz, A. A. Saranin, A. V. Zotov y M. Katayama, *Surface Science. An Introduction* (Springer, Berlin, 2003), pp. 159–164.
- [17] S. Chiang, *J. Phys. D Appl. Phys.* **44**, 464001 (2011).
- [18] C. J. Chen, *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*, 3rd ed. (Oxford University Press, Oxford, 2021), pp. 167–272.
- [19] D. M. Eigler y E. K. Schweizer, *Nature* **344**, 524 (1990).
- [20] A. I. Oliva, V. Rejón, N. López Salazar, E. Ávila, T. Kantún, J. E. Corona y J. L. Peña, *Rev. Mex. Fís.* **40**, 106 (1994).
- [21] J. Guillén Rodríguez, E. Valaguez-Velázquez, A. Zapata-Navarro, A. Márquez-Herrera, M. Meléndez-Lira y M. Zapata-Torres, *Rev. Mex. Fís.* **59**, 208 (2013).
- [22] I. Biljan, M. Kralj, T. Mišić Radić, V. Svetličić y H. Vančik, *J. Phys. Chem. C* **115**, 20267 (2011).
- [23] A. Crepaldi, S. Pons, E. Frantzeskakis, F. Calleja, M. Etzkorn, A. P. Seitsonen, K. Kern, H. Brune y M. Grioni, *Phys. Rev. B* **87**, 115138 (2013).
- [24] N. V. Fischer, U. Mitra, K.–G. Warnick, V. Dremov, M. Stocker, W. Hieringer, F. W. Heinemann, N. Burzlaff, A. Görling y P. Müller, *Chem. Eur. J.* **20**, 11863 (2014).
- [25] F. Lecadre, F. Maroun, I. Braems, F. Berthier, C. Goyhenex y P. Allongue, *Surf. Sci.* **607**, 25 (2013).
- [26] R. Hammer, A. Sander, S. Förster, M. Kiel, K. Meinel y W. Widdra, *Phys. Rev. B* **90**, 035446 (2014).
- [27] D. Y. Lee, M. M. Jobbins, A. R. Gans y S. A. Kandel, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15**, 18844 (2015).
- [28] H. Li, H.–X. Fu y S. Meng, *Chin. Phys. B* **24**, 086102 (2015).
- [29] A. Martín–Recio, C. Romero–Muñoz, A. J. Martínez–Galera, P. Pou, R. Pérez y J. M. Gómez–Rodríguez, *Nanoscale* **7**, 11300 (2015).
- [30] J. Wang, W. Ge, Y. Hou y Q. Lu, *Carbon* **84**, 74 (2015).
- [31] J. A. Martínez, J. Valenzuela, M. P. Hernández y J. Herrera, *Rev. Mex. Fís.* **62**, 45 (2016).
- [32] M. A. Talley, en *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 6ª ed., editado por A. G. Piersol y T. L. Páez (McGraw–Hill, New York, 2010), pp. 38.1–38.39.
- [33] K. R. Symon, *Mecánica* (Aguilar, Madrid, 1968), pp. 52–55.
- [34] M. Okano, K. Kajimura, S. Wakiyama, F. Sakai, W. Mizutani y M. Ono, *J. Vac. Sci. Technol. A* **5**, 3313 (1987).
- [35] E. Hecht, *Óptica*, 3ª ed. (Addison–Wesley, Madrid, 2000), pp. 407–411.
- [36] A. N. Chaika, S. S. Nazin, V. N. Semenov, S. I. Bozhko, O. Lübben, S. A. Krasnikov, K. Radican e I. V. Shvets, *Eur. Phys. Lett.* **92**, 46003 (2010).
- [37] Y. Khan, H. Al–Falih, Y. Zhang, T. K. Ng y B. S. Ooi, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 063708 (2012).
- [38] T. Nishimura, A. M. A. Hassan y M. Tomitori, *Appl. Surf. Sci.* **284**, 715 (2013).
- [39] A. Reyes Valenzuela, *Diseño de un controlador electrónico para la fabricación de puntas metálicas para un microscopio de efecto túnel* (Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, 2003).
- [40] J. P. Ibe, P. P. Bey, S. L. Brandow, R. A. Brizzolara, N. A. Burnham, D. P. Di Lella, K. P. Lee, C. R. K. Marrian y R. J. Colton, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, 3570 (1990).
- [41] J. A. Martínez, J. Valenzuela B., R. Cao Milán, J. Herrera, M. H. Farías y M. P. Hernández, *Appl. Surf. Sci.* **320**, 287 (2014).
- [42] J. A. Martínez, J. Valenzuela, C. E. Hernández–Tamargo, R. Cao–Milán, J. A. Herrera, J. A. Díaz, M. H. Farías, H. Mikosch y M. P. Hernández, *Appl. Surf. Sci.* **345**, 394 (2015).
- [43] F. Solís–Pomar, O. Nápoles, O. Vázquez Robaina, C. Gutiérrez–Lazos, A. Fundora, A. Colin, E. Pérez–Tijerina y M. F. Meléndez, *Ceram. Int.* **42**, 7571 (2016).
- [44] R. Barzaga Guzmán, *Estudio computacional de la formación de multicapas de azufre en la superficie Au(100)* (Tesis de Maestría, Universidad de La Habana, La Habana, 2016).
- [45] M. P. Hernández, J. A. Martínez, C. E. Hernández–Tamargo, R. Barzaga, J. A. Herrera, M. H. Farías, J. Valenzuela y H. Mikosch, *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* **7**, 1 (2017).
- [46] G. Navarro–Marín, M. P. Hernández, O. Estévez–Hernández, M. H. Farías Sánchez y D. Díaz–Domínguez, *Acta Microscopica* **26A**, 430 (2017).
- [47] R. Barzaga, H. Mikosch, J. A. Martínez y M. P. Hernández, *Acta Microscopica* **26A**, 436 (2017).
- [48] J. A. Martínez Pons, *Caracterización de superficies de oro modificadas con moléculas sulfuradas mediante microscopía de barrido por efecto túnel* (Tesis de Doctorado, Universidad de La Habana, La Habana, 2017).
- [49] G. Navarro Marín, *Estudio de la adsorción de derivados de tiourea sobre Au(111)* (Tesis de Maestría, Universidad de La Habana, La Habana, 2018).
- [50] R. Barzaga, J. A. Martínez, M. H. Farías y M. P. Hernández, *J. Phys. Chem C* **123**, 12183 (2019).
- [51] R. Barzaga Guzmán, *Computational study of the adsorption of molecules on metal surfaces* (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2021).

[52] M. P. Hernández Sánchez, R. Barzaga Guzmán, J. A. Martínez Pons, G. Navarro Marín, S. Díaz-Tendero Victoria, O. L. Estévez Hernández, J. A. Herrera Isidrón,

M. H. Farías Sánchez y O. Cruzata Montero, *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* **14**, 1607 (2024).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

