

# EL MICROSCOPIO DE TUNELAMIENTO CUÁNTICO Y LA NANOTECNOLOGÍA

Wayner Rivera Márquez<sup>1,\*</sup> y Jaime Villalobos Velasco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidad del Cauca, Popayán.

<sup>2</sup> Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

## Resumen

El microscopio de tunelamiento cuántico (MTC) es un magnífico instrumento de laboratorio capaz de producir imágenes de resolución atómica y molecular. El MTC también ha probado su capacidad de crear patrones geométricos y estructuras de escala nanométrica sobre la superficie de los sólidos. De esta forma el MTC permite concebir una futura tecnología de sistemas y dispositivos de nanoscale hasta alcanzar el límite de la integración con manipulación de átomos individuales. En este artículo se ilustran las novedosas posibilidades del MTC y se presentan resultados y cifras que corroboran el potencial de este microscopio en la industria electrónica del siglo XXI. En particular, se presentan resultados experimentales sobre formación de nanoestructuras, del orden de los 100 Å sobre superficies de oro y bicapas de oro-grafito, con un microscopio de la Burleigh Instruments operando en aire.

**Palabras claves:** Microscopía de tunelamiento cuántico, nanotecnología, nanoestructuras, nanolitografía, manipulación atómica

## Abstract

The scanning tunneling microscope (STM) is a superb laboratory instrument for atomic and molecular imaging of surfaces. The STM has also proved to be a powerful tool in the manufacture of nanometer size patterns and structures on solid surfaces. Likewise, the STM permits to conceive a future technology of nanoscale systems and devices capable

of reaching the limit of integration involving single atom manipulations. This paper illustrates the novel possibilities of STM and shows results and figures that corroborate the potential use of this microscope in the XXI century electronic industry. In particular, we report experimental results of nanostructures formation, of 100 Å order on gold surfaces and gold-graphite bilayers, with a Burleigh Instruments microscope operating in air.

## 1. INTRODUCCIÓN

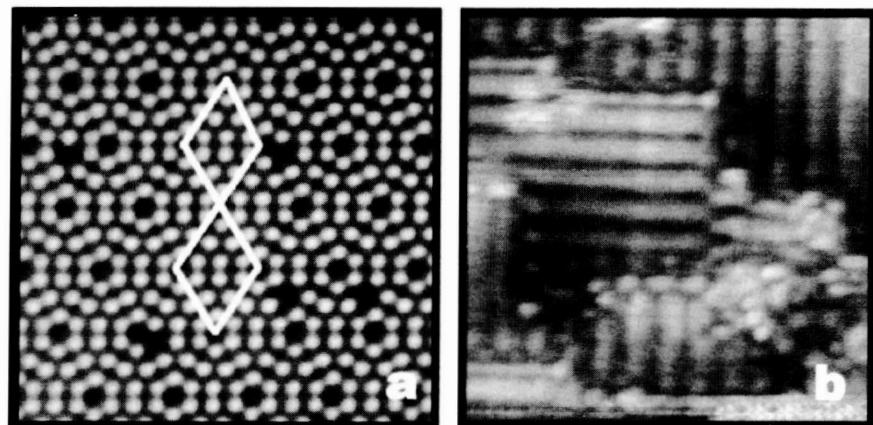


FIGURA 1. Imágenes con resolución atómica de superficies de sólidos cristalinos, obtenidas con el MTC en ultra-alto vacío. (a) Los rombos muestran la celda unidad de la reconstrucción  $7 \times 7$  de una superficie de silicio (111). (b) Imagen de  $59\text{\AA} \times 59\text{\AA}$  de la reconstrucción  $2 \times 1$  de una superficie de diamante homoepitaxial crecido por CVD. La reconstrucción atómica registrada con el MTC permite caracterizar el tipo y orientación cristalina.

El premio Nobel conferido en 1986 a Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, solo 5 años después del invento del MTC, pone de presente el extraordinario impacto científico y tecnológico de este dispositivo. La posibilidad de explorar la materia con el MTC y en general con los sistemas de sonda atómica, desarrollados a partir del invento original, ha permitido reconocer directamente la estructura de los

materiales e identificar la organización individual de los átomos. La poderosa capacidad del MTC para proporcionar imágenes de resolución atómica, ilustrada en la figura 1, complementada por su habilidad para manipular átomos simples o moléculas, permiten utilizar exitosamente este instrumento para modificar de manera controlada y reproducible la superficie de los sólidos a escala nanométrica. El MTC es el instrumento mas sofisticado para fabricar nanoestructuras sobre substratos sólidos; en la actualidad su poder de integración es 10 a 100 veces superior a la tecnología convencional de fabricación de circuitos integrados.

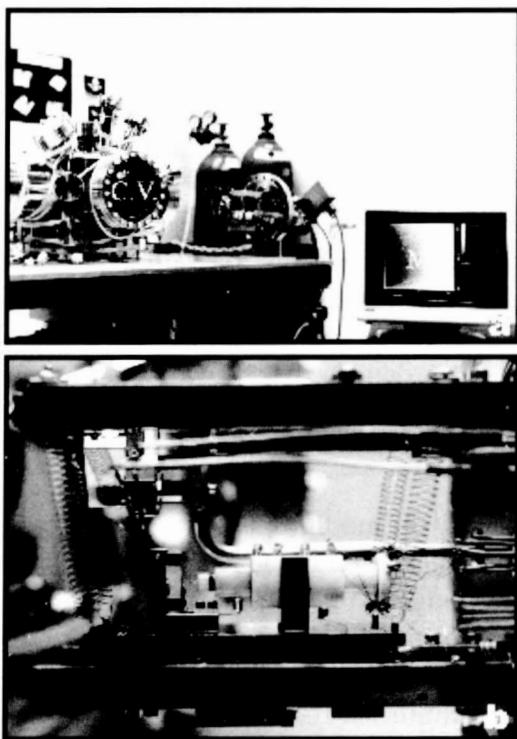


FIGURA 2. (a) Fotografía del MTC ARIS 6000 de la Burleigh Instruments utilizado por los autores en experimentos de formación de estructuras y patrones geométricos de tamaño nanométrico. Al lado izquierdo aparece la cámara de vacío (C.V.) y a la derecha el monitor (M.) para desplegar la imagen. (b) Fotografía de la cabeza del MTC, en la cual se destaca la sonda o aguja que registra el efecto túnel.

En este artículo se presenta un balance del estado del arte de la microscopía de efecto túnel, se evalúa el potencial del MTC en la futura tecnología de dispositivos nanométricos y se analizan las cifras que avalan las prospectivas tecnológicas de este instrumento. En particular, se ilustra el artículo con algunos resultados del trabajo de los autores, los cuales aspiramos que contribuyan a estimular en nuestro país el uso del MTC en diversos campos de investigación.

## 2. MODIFICACIÓN DE SUPERFICIES Y NANOLITOGRAFÍA CON EL MTC

La capacidad del MTC de formar estructuras o patrones de tamaño nanométrico sobre substratos sólidos le confiere el mayor atractivo al uso de este instrumento en nanotecnología. La posibilidad de modificar superficies de sólidos con el MTC se concretó en 1985 por medio de experimentos realizados sobre superficies de silicio [1]. Posteriormente los investigadores lograron crear patrones de 5 a 20 nm sobre superficies de oro bastante llanas por intermedio de un MTC dotado con una aguja del mismo material [2, 3]. Recientemente, se reportó el uso de un MTC de aguja fría, operando a temperaturas del orden de 4 K, para formar barreras de escala atómica, conocidas como corrales cuánticos, que pueden ser aprovechadas para la fabricación de nanodispositivos de interferencia cuántica [4].

Otra posibilidad de modificación de superficies sólidas con el MTC es la de cubrir la superficie con capas moleculares por la técnica de Langmuir-Blodgett o directamente por depósito del material para producir patrones que semejan diseños litográficos [5, 6].

Para ilustrar la forma de modificar superficies con el MTC, en la figura 3 se presentan los resultados típicos de los experimentos de producción de nanoestructuras de oro realizados en el Laboratorio de Microscopía de Efecto Tunel de la Universidad de North Texas. Los resultados de esta investigación reportados previamente [7], permitieron establecer el modelo de interacción entre la aguja del MTC y la superficie. En dichos experimentos se utilizó un MTC del tipo ARIS 6000 de la Burleigh Instruments funcionando en aire. Las nanoestructuras de la gráfica corresponden a colinas

de oro de aproximadamente 30 Å de altura, separadas decenas de angstroms, y cuyos diámetros en la base oscilan entre 70 y 150 Å. Las colinas se crecieron sobre una superficie cristalina de oro con orientación (111), al aplicar en los puntos previamente seleccionados con el control electrónico del MTC, descargas de voltaje del orden de 3 V y 10 ms de duración por intermedio de una aguja del mismo material. En el mismo laboratorio los autores hicieron experimentos de formación de motivos geométricos regulares sobre bicapas de oro-grafito. Se obtuvieron motivos con formas triangulares, rectangulares o hexagonales, del orden de 100 Å de lado y de 50 a 200 Å de profundidad en una capa de oro depositada sobre una superficie de grafito cristalino. Para formar los diferentes motivos se aplicaron descargas eléctricas de aproximadamente 4 V y 200 ms de duración por medio del MTC equipado con una aguja de oro sometida a electropulido químico en un baño de HCl. Estos resultados experimentales son reproducibles y responden a las dimensiones exigidas por los procesos de nanolitografía que demandará la futura tecnología de fabricación de dispositivos de efecto cuántico.

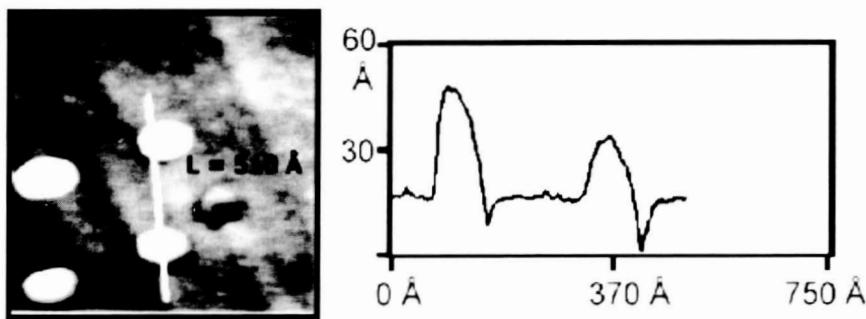


FIGURA 3. Fotografía de 4 nanoestructuras con forma elipsoidal producidas con el MTC sobre una superficie de oro de orientación cristalina (111); la línea blanca corresponde al trazado topográfico de 510 Å de longitud. La curva de la derecha presenta el detalle topográfico que muestra las dimensiones de dos colinas con diámetros del orden de 100 Å y alturas de aproximadamente 30 Å .

### 3. ULTRA-ALTA INTEGRACIÓN CON EL MTC

La predicción hecha por Gordon Moore de Intel, de que el número de componentes o dispositivos en un chip de circuito integrado se cuadriplicaría cada tres años, ha soportado la prueba del tiempo hasta ser acuñada como la ley de Moore. De mantenerse este ritmo de crecimiento en el año 2022 se deben fabricar circuitos integrados con chips de memoria RAM de 16 terabits [8]. A esta escala de integración se debe almacenar un bit en menos de 1000 átomos o sea en un cuadrado de menos de 100 Å de lado. Para la fotolitografía, inclusive de rayos X, este nivel de integración está vedado por problemas tecnológicos en la formación de patrones geométricos. Además, cuando los transistores tienen tamaños del orden de  $0.02 \mu\text{m}$  la física de los dispositivos se convierte en un problema básico.

En un sistema tipo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) con canales de esta dimensión los electrones adquieren un comportamiento balístico (o sea que pueden viajar su propia longitud de onda sin colisionar con huecos o átomos), de manera que el dispositivo se hace inestable por la competencia entre los electrones balísticos y los normales. Otra seria imposición sobre el tamaño nanoscópico de los componentes de los circuitos integrados tiene que ver con la alta densidad de las interconexiones, lo cual conlleva problemas físicos fundamentales; en la medida que se tengan líneas más finas la sección transversal del alambre tendrá menos átomos, los cuales pueden ser fácilmente desprendidos por colisiones con electrones, de manera que se pueden formar brechas y en consecuencia se crean cortocircuitos por el fenómeno de electromigración. A lo anterior hay que agregar los problemas de la disipación de calor y las limitaciones impuestas por el manejo de señales de alta frecuencia donde el acoplamiento inductivo-capacitivo entre múltiples capas de líneas interconectadas genera cruce de señales.

Los desafíos de la ultra-integración de los circuitos electrónicos demandan nuevos materiales y nuevos dispositivos que permitan alcanzar las fronteras de la nanotecnología. Una posibilidad en este camino de encoger el tamaño de los dispositivos es la de fabricar dis-

positivos de efecto cuántico. Así es posible concebir la fabricación de dispositivos nanoelectrónicos de tunelamiento resonante. En estos dispositivos se aplican voltajes específicos de control para explotar las características ondulatorias de los electrones que les permiten tunear barreras de potencial, conformadas por mult capas de espesor comparable a los 100 o 200 Å característicos de la longitud de onda de los electrones. Los problemas de integración también pueden ser superados con el MTC, el cual permite escribir líneas de menos de 100 Å de ancho sobre substratos sólidos, de modo que al producir integrados se tendrá una densidad de memoria del orden de terabits por  $\text{cm}^2$  con lo cual conservaría vigencia la ley de Moore. Si bien estos últimos valores de integración están lejos de las actuales técnicas de fotolitografía usadas en la fabricación de circuitos integrados con anchos de línea de 0.20  $\mu\text{m}$  o 200 nm [9], el uso del MTC con nuevos desarrollos técnicos promete alcanzar dichos límites. Las prospectivas inclusive sugieren la creación de novedosos sistemas microelectromecánicos con miles de MTC, construidos sobre la superficie de un chip, cada uno leyendo o escribiendo datos sobre un área de unos pocos micrones cuadrados [10].

#### 4. FABRICACIÓN DE NUEVOS MATERIALES CON EL MTC

La nanotecnología contempla la manipulación de átomos para formar nuevos compuestos moleculares con formas que no presenta la naturaleza. El sueño de un científico de materiales es arrancar con una pizarra limpia y un surtido con los átomos de la naturaleza, recoger átomo por átomo y colocarlos sobre la pizarra para construir cualquier molécula, compuesto o material imaginable[11]. La microscopía de tunelamiento cuántico ha hecho posible dibujar líneas, crear huecos y colinas de dimensiones nanométricas. Ahora estamos próximos a la meta final de diseñar moléculas manipulando átomos en forma individual. Dehuang Huang ha usado con éxito el MTC para construir cadenas atómicas, con fases metal, semiconductor y aislante, sobre una superficie de silicio (100) atómicamente plana, por manipulación de átomos individuales con la aguja del MTC trabajando en ultra-alto vacío [12]. En el coloquio del verano de 1996

del Instituto de Cuántica de la Universidad de Rice, Steve Olden-berg y Sarah Westcott del Halas Research Group de esa universidad presentaron resultados de unión de oro coloidal por la unión controlada de enlaces moleculares individuales [13].

También es posible concebir el uso del MTC para iniciar o estimular procesos de monocapas autoensambladas, conocidas por la sigla inglesa SAM (Self-Assembled Monolayers), que corresponden a novedosos materiales que imitan la capacidad de las capas biológicas de autoconstruirse a partir de fosfolípidos [14]. Un SAM es una película de uno o dos nanómetros de espesor hecha de moléculas orgánicas que forman un cristal bidimensional sobre el substrato. Un llamativo tipo de autoensamblaje se presenta con los nanotubos o “buckytubos” de carbón que son los más pequeños “alambres” conocidos hasta el presente en la naturaleza con diámetros de 5 a 10 nm. Estos filamentos son estructuras de grafito cerradas en forma de tubo que se agrupan concéntricamente y que pueden ser llenados con metales formando tubos de conductividad variable [15]. Los nanotubos de carbón pueden ser imaginados como alambres en circuitos de tamaño nanométrico.

## 5. CONCLUSIÓN

El MTC permite obtener imágenes de resolución atómica y manipular superficies cristalinas para producir motivos y estructuras apropiadas para la fabricación de dispositivos electrónicos de ultra-alta escala de integración. El MTC ha generado avances que permiten el control a escala atómica y molecular de superficies y materiales hasta alcanzar el límite de los dispositivos de efecto cuántico. Anteriormente estudios morfológicos de sistemas como el silicio poroso, cambios microestructurales de diamante, dióxido de estaño, entre otros, se llevaban a cabo utilizando diferentes tipos de microscopios electrónicos [16-19] como el SEM y el TEM. En la actualidad se logran conocimientos mas profundos de estos sistemas utilizando el MTC [20]. Las prospectivas tecnológicas indican que el MTC tendrá un papel protagónico en la industria electrónica del siglo XXI. Con este artículo esperamos estimular el uso de este instrumento de laboratorio en las universidades y centros de investigación en Colombia.

## Referencias

- [1] C. F. Quate, *in Scanning Tunneling Microscope and Related Methods*, edited by R. J. Behm *et. al.*, Kluwer Academy Publishers, Netherlands (1990) p. 281.
- [2] H. J. Mamin, P. H. Guethner, and D. Rugar, *Phys. Rev. Lett.* **65** (1990) 2418.
- [3] C. S. Chang, W. B. Su, and T. T. Song, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 574
- [4] M. F. Crommie, *in Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy*, edited by S. H. Cohen, and M. L. Lightbody, Plenum Press, New York (1997).
- [5] T. R. Albrecht, M. M. Dovek, C. A. Lang, P. Grütter, C. F. Quate, S. W. J. Kuan, C. W. Frank, and R. F. W. Pease, *J. Appl. Phys.* **64** (1988) 1178.
- [6] J. S. Foster, J. E. Frommer, and P. C. Arnett, *Nature* **331** (1988) 324.
- [7] W. Rivera y José M. Pérez, *Revista Colombiana de Física* **29**(2) (1997) 463.
- [8] Y. Nishi, *The Industrial Physicist* **3**(2) (1997) 24.
- [9] E. J. Lerner, *The Industrial Physicist* **5**(2) (1999) 18.
- [10] K. J. Gabriel, *Scientific American* (1995) 150.
- [11] *Atomic Resolution Microscopy: Atomic Imaging and Manipulation (AIM) for Advanced Materials*, NSF Panel Report, NSF 93-73 (1993).
- [12] D. H. Huang and Y. Yamamoto, *in Surface Review and Letters*, edited by D. S. Tong (World Scientific, 1996).
- [13] S. Oldenberg and S. Westcott, Rice University (*private communication*).

- 
- [14] E. Sabatini, I. Rubinstein, R. Maoz, and J. Sagiv, *J. Electroanalytical Chemistry* **219** (1987) 365.
  - [15] W. Rivera, J. M. Perez, R. S. Ruoff, D. C. Lorents, R. Malhotra, S. Lim, Y. G. Rho, E. G. Jacobs, and R. F. Pinizzotto, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13** (1995) 327.
  - [16] J. Villalobos, J. P. Estrera, P. Stevens, R. Glosser, *Anales Congreso Nacional de Física* (1993).
  - [17] J. Villalobos, W. Rivera, *Revista Colombiana de Física* **27** (1995).
  - [18] W. Rivera, J. Villalobos, J. Pérez, *Revista Colombiana de Física* **27** (1995).
  - [19] W. Rivera, J. Villalobos, J. Pérez, *Revista Colombiana de Física* **30**(1) (1998) 33-36.
  - [20] W. Rivera, J. Villalobos, Albert Aviles, *Revista Colombiana de Física* **28** (1996) 289-292.