

LA NANOTECNOLOGÍA Y EL NUEVO ESTUDIO DEL CIPM SOBRE LAS FUTURAS NECESIDADES EN METROLOGÍA

J. Valdés

Miembro del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)

Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI

L. N. Alem 1067, Piso 7, 1001 Buenos Aires – República Argentina

Tel.: (0054) 11 4314 0882 - Fax: (0054) 11 4313 2130 - e-mail: jvaldes@inti.gov.ar

Resumen: La nanotecnología está conduciendo prospectivamente a una nueva revolución industrial. En el marco de un estudio estratégico iniciado por el CIPM, acerca de los requerimientos técnicos futuros en metrología, se muestra la influencia que tendrá la nanotecnología en los Institutos Nacionales de Metrología. A la luz de experiencias en nanometrología iniciadas tempranamente en México y Argentina, se muestran las limitaciones que podrían encontrar los países en desarrollo que decidan investigar en profundidad en temas de nanometrología. En ese contexto, se presenta una idea desarrollada en 1992 en el INTI de Argentina para producir corrientes de electrones de a uno, comandando la emisión desde una trampa interfacial ubicada en el ápex de una punta de silicio en un microscopio de efecto túnel. Para avanzar con el desarrollo de ese método sería necesario contar con la importante infraestructura de un laboratorio para la fabricación controlada de nanoestructuras estables.

INTRODUCCIÓN

En 1998 el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) publicó un estudio preparado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) sobre Necesidades Nacionales e Internacionales en el Ámbito de la Metrología¹. En ese informe, preparado por el CIPM para los gobiernos de los Estados Miembros de la Convención del Metro, por mandato de la Resolución 11 de la 20a. Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) de 1995, se abordaban esencialmente cuestiones derivadas de la creciente demanda de uniformidad internacional en las mediciones. La mayor preocupación residía en satisfacer el reconocimiento internacional de los servicios de medición y ensayo en el marco de la globalización del comercio internacional. Se exponían allí los lineamientos básicos que darían lugar al Reconocimiento Mutuo de los Patrones Nacionales de Medida y de los Certificados de Medición y Calibración Emitidos por los Institutos Nacionales de Metrología², así como el rol del BIPM en las primeras décadas del siglo XXI.

Dicho estudio debería también abordar las necesidades de largo plazo que van surgiendo como consecuencia de los nuevos avances científicos y desarrollos tecnológicos. Por tal motivo, en la 89a. reunión del CIPM, que tuviera lugar en octubre del año 2000, se inició un nuevo estudio de las futuras necesidades en metrología, focalizando prioritariamente las cuestiones científico-técnicas. Este tipo de estudios estratégicos será una actividad mucho más frecuente del CIPM.

Uno de los temas identificados como de mayor importancia es la aplicación de tecnologías avanzadas de la información en las actividades y métodos de trabajo de los Institutos Nacionales de Metrología. Otros campos de creciente impacto en la sociedad, que requieren cada vez mayor atención en cuanto a las necesidades de exactitud y trazabilidad de las mediciones son los relacionados con la metrología en cuestiones ambientales, en química, en biotecnología y en alimentos en general.

No menos importante, inclusive por su relación con todos los temas anteriormente mencionados, va siendo el de la metrología en el ámbito de la nanotecnología.

NANOTECNOLOGÍA: HACIA UNA NUEVA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Se podrían establecer diversos puntos de partida para la nanotecnología. En muchos artículos se cita una ahora famosa conferencia de Richard Feynman³ quien, bajo el título "There is Plenty of Room at the Bottom", en 1959 comenzaba a imaginar la fabricación de materiales y dispositivos átomo por átomo. Lo cierto es que el instrumento que hizo posible esta idea fue el Microscopio de Efecto Túnel, conocido como STM (Scanning Tunneling Microscope)⁴, con todas las variantes (SXM) que posteriormente se desarrollaron.

La capacidad de producir imágenes superficiales, barriendo sin contacto un área con resolución atómica, por medio de una punta adecuadamente comandada, condujo a la posterior manipulación selectiva de átomos individuales. Para ello se los separa de a uno de su sitio original, con la misma punta del STM utilizada para visualizar su posición, y se los implanta en otro lugar predeterminado de la red que oficia de sustrato.⁵

Según el campo de aplicación, se comenzó a desarrollar una nanoelectrónica, nanobiología, o nanoquímica, como ramas de la nanotecnología.

Entre los desafíos más tangibles se incluye la construcción altamente eficiente de nuevos materiales y moléculas átomo por átomo, pudiendo ser concebidos para poseer propiedades únicas, como ser extremadamente resistentes y livianos al mismo tiempo. Esto podría dar lugar, por ejemplo, a la fabricación de vehículos de bajísimo consumo. Nuevas drogas y agentes de contraste podrían ser diseñados a escala nanométrica, con capacidad de penetrar en el cuerpo humano hasta los lugares de más difícil acceso, para identificar células y tumores, pudiendo modificar o destruir selectivamente tejidos. Ya es previsible el desarrollo de nuevas sustancias para eliminar los más minúsculos contaminantes del aire y del agua. La compactación de información a escala atómica conducirá a una nueva tecnología informática. Otras aplicaciones de más largo alcance se orientan a copiar la forma como actúa la naturaleza para autoreproducir estructuras, con consecuencias revolucionarias para la agricultura. Hasta se piensa en fabricar ejércitos de nanorobots que se autoreproduzcan y que tengan la capacidad de ejercer masivamente funciones predeterminadas.

Todas estas potenciales aplicaciones conducen, más que a una miniaturización (construcción top - down), a un nuevo concepto de producción (bottom - up) partiendo de la escala atómica y molecular. Es por ello que se anuncia una nueva revolución industrial, donde la nanotecnología habrá de cambiar en las décadas venideras la naturaleza de casi todos los objetos fabricados por el hombre.⁶

NANOTECNOLOGÍA Y NANOMETROLOGÍA

En realidad, el desarrollo del STM fue acompañado tempranamente por algunos metrologos. Inclusive la primera revista internacional sobre nanometrología que apareció fue por iniciativa surgida de la comunidad metroológica. En efecto, en 1990 salía a la luz NANOTECHNOLOGY, editada por H. Kunzmann

(PTB), V. S. Lukyanov (VNIIMS), C. Teague (NIST) y K. Iizuka (Yoshida Nanomechanism Project). La edición 1991/92 de METROLOGIA (28) estuvo totalmente dedicada a nanometrología.

En principio el STM se mostraba como una herramienta ideal para operar como rugosímetro sin contacto, en el intervalo del submicrómetro. Claro que una cosa era utilizar el microscopio para producir imágenes y otra bastante distinta usarlo como instrumento de medición. La correcta caracterización de los actuadores piezoeléctricos que comandan el movimiento de la punta del STM requería desarrollar nuevos objetos patrones, que cubrieran la brecha existente entre las redes atómicas, que podían servir de referencia en la escala del nanometro y subnanometro, hasta llegar a los micrometros. Algunos Institutos Nacionales de Metrología se ocuparon del desarrollo de estos "nanostandards" y continúan los desarrollos de estructuras tridimensionales de geometría controlada con trazabilidad hasta redes cristalinas, en el ámbito de la metrología dimensional, o de la metrología mecánica.

Sin embargo, la nanotecnología se hace presente en prácticamente todas las ramas de la metrología, en la óptica, en los láseres, en la química, en la electricidad, en la electrónica, etc.⁷ Basta con observar los procedimientos de fabricación de nanoestructuras con deposición atómica por láseres focalizados, o el desarrollo en los laboratorios de metrología de nanocapacitores, o nanotransistores, buscando aprovechar sus particulares características en condiciones de bloqueo coulombiano para dar lugar a procesos de conducción eléctrica por efecto túnel de electrones de a uno (Single Electron Tunneling - SET). Y se está prestando especial atención a los nuevos fenómenos de crecimiento cuasi espontáneo de nanoestructuras auto-organizadas (self-assembly), donde aparecen puntos cuánticos con forma de islas, pirámides o anillos del tamaño de unos pocos nanometros, discutiéndose sus posibles nuevas aplicaciones metroológicas.⁸

Al lograr "pararnos" con una punta sobre un átomo, pasear sobre el mismo y extraerle información, nos encontramos ya confrontados con un acercamiento a los límites cuánticos que era insospechable algunos años atrás. Esto va abriendo el camino al descubrimiento de nuevos efectos físicos, que también podrían tener consecuencias metroológicas. Antes los nuevos resultados de la física cuántica producían sorpresivamente resultados metroológicos. Ni Brian Josephson, ni Klaus von Klitzing estaban buscando escalones de significación metroológica cuando investigaban las propiedades de la materia en determinadas situaciones. Hoy sabemos que ese tipo de efectos se ponen de manifiesto cuando nos acercamos a los límites cuánticos, estando más

alertas a la aparición de escalones extremadamente estables o de saltos muy bruscos en las curvas características en relación con las constantes fundamentales.

Considérese, por ejemplo, lo que ocurre al trabajar con un nanocapacitor de capacidad C cuando sólo un electrón viaja entre los electrodos. Sea ΔV la tensión aplicada, i la intensidad de la corriente establecida, R la resistencia eléctrica observada, e la carga del electrón y $\Delta\tau$ el tiempo de tránsito del electrón entre ambos electrodos. Entonces, se tiene:

$$\Delta V = e / C \quad (1)$$

$$i = \Delta V / R \quad (2)$$

$$i = e / RC \quad (3)$$

$$i = e / \Delta\tau \quad (4)$$

De donde, $\Delta\tau = RC \quad (5)$

La energía capacitiva es $\Delta E = e^2 / 2C \quad (6)$

Según el principio de incertidumbre, debe ser

$$\Delta E \cdot \Delta\tau \quad , \quad (\quad = h/2\pi) \quad (7)$$

Cuando un electrón viaja entre los electrodos de un nanocapacitor, el tiempo $\Delta\tau$ se torna muy pequeño. Para que el ensanchamiento de energía sea entonces compatible con $\Delta\tau$, debe ser

$$(e^2 / 2C) \cdot RC \quad (8)$$

O sea, $R \geq 2 / e^2 \quad (9)$

valor este de resistencia eléctrica que guarda cierta proporcionalidad con el de la constante $h/2e^2$ (aproximadamente 12 900 ohm) que encontrara von Klitzing. No obstante, en este caso no aparecen saltos abruptos que permitan una aplicación metrológica, como sí ocurre en el caso del efecto Hall cuántico. Análogamente en los "atomic wires", como el desarrollado en el NIST, la conductancia eléctrica varía entre aproximadamente una y dos unidades cuánticas de conductancia, al pasar de un átomo al siguiente.

En general, cuando el canal de conducción eléctrica se angosta en los dispositivos de estructura mesoscópica⁹, se pone de manifiesto la naturaleza ondulatoria del electrón, dando lugar a curvas características en forma de escalera, donde los escalones de conductancia eléctrica se corresponden con múltiplos de $2e^2/h$. Estos ejemplos muestran que, al trabajar con nanodispositivos, hay que abandonar conceptos de la física clásica, para confrontarse con nuevos efectos físicos.

NANOMETROLOGÍA EN LOS PAÍSES EN DESARROLLO

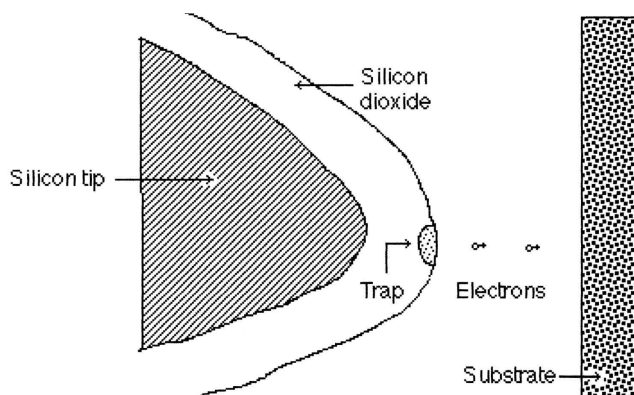
En la convocatoria a la 21a. Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), que tuviera lugar del 11 al 15 de octubre de 1999 en París, se hacía mención a los requerimientos cada vez más exigentes en el campo de la metrología dimensional, extendiéndose desde el dominio de la nanotecnología hasta el de la geofísica. En consecuencia, se recomendaba a los laboratorios nacionales el mantener una amplia base de investigación en metrología de longitudes. Llegado el momento de la votación se produjo un interesante debate, entre quienes reclamaban una recomendación más explícita referente a la nanometrología, y quienes consideraban que todavía era temprano para abordar ese tema, ya que los Institutos Nacionales de Metrología (NIMs) de países en desarrollo estaban aún muy lejos de poder asumir investigaciones en nanometrología. La discusión sobre esta cuestión ha quedado abierta a la comunidad metrológica hasta la próxima CGPM.

Mientras tanto, cabe hacer notar que en los países más desarrollados ya no existen dudas sobre el rol preponderante que tendrá la nanotecnología en los años venideros y comienzan a asignarse progresivamente mayores fondos a los programas nacionales o regionales de nanotecnología, incluyendo los destinados a nanometrología. Durante 1997 las inversiones gubernamentales más importantes ascendían a 116 millones de dólares en los Estados Unidos, 127 en Japón, 128 en Europa Occidental y 70 en el conjunto de otros países que invierten en este campo. El presupuesto de Estados Unidos asignado a nanotecnología para el año 2000 fue ya de 270 millones de dólares. Y el 21 de enero del año 2000, en un discurso pronunciado en el California Institute of Technology el ex Presidente William Clinton anunció el lanzamiento de la "National Nanotechnology Initiative", con un presupuesto de 495 millones de dólares para el año 2001. El NIST incrementó en 125 % los fondos destinados a nanotecnología, de 8 millones de dólares en el año 2000 a 18 en el año 2001.⁶

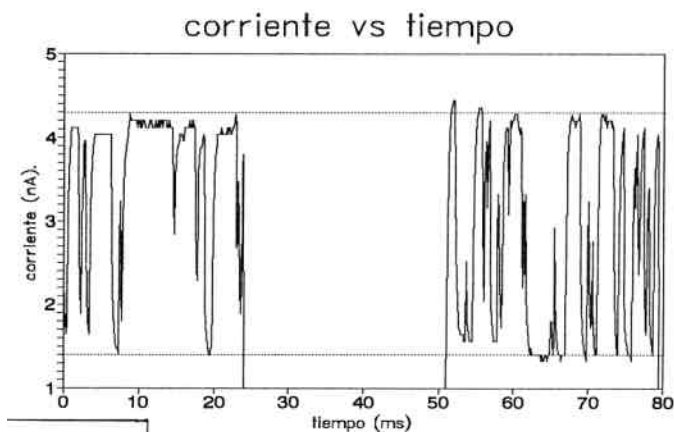
¿Qué se puede hacer en los países en desarrollo para no quedar al margen de esta realidad?. Veamos qué es lo que se ha hecho hasta ahora, a la luz de los casos de México y Argentina, ya que este proceso comenzó hace más de 15 años. Dos artículos, que datan de 1985 y 1987, con contribución de autores mexicanos el primero¹⁰ y argentinos el segundo¹¹, son citados en la bibliografía, destacando que la microscopía de efecto túnel abrió las puertas a la medición de texturas superficiales en una escala mucho menor a lo anteriormente alcanzado¹². De la cooperación metrológica entre ambos grupos surgió también el primer STM de Latinoamérica, con un diseño que permitía operar con baterías y con el cual se obtuvieron imágenes de resolución atómica¹³.

Luego en el INTI se comenzó a trabajar tempranamente en Single Electron Tunneling utilizando ese STM. Paseando “a ciegas” sobre nanopartículas metálicas embebidas en óxidos aislantes se relevaban curvas características I-V. Ocasionalmente se registraron escaleras coulombianas, aunque inestables. Esto era una fuerte indicación de la posibilidad de observar SET a temperatura ambiente, algo que hubiera sido revolucionario en caso de haber podido construir las nanoestructuras en forma controlada.

Otra línea de trabajo posterior, para seguir experimentando con recursos limitados, fue la de observar el comportamiento de una trampa interfacial (trap) en óxido nativo de una punta de silicio colocada en el STM (Fig. 1). De este modo se eliminaba el “paseo a ciegas”, ya que la punta del STM podría estar fija, o derivar por efectos térmicos, sobre el sustrato, pero manteniendo el trap en su ápex. Se eliminaría así la necesidad de estabilizar el sistema a bajas temperaturas y de trabajar en vacío. La presencia del trap sería acusada claramente en la curva I – t de intensidad de corriente en función del tiempo (Fig. 2).



Punta de silicio oxidada, con un trap interfacial en el ápex.



Curva I – t Emisión y captura de electrones de a uno por un trap aislado y a temperatura ambiente. La unidad electrónica de control trabaja en forma de “sample and hold”, por lo cual se interrumpe la curva entre 25 y 50 ms (sample).

Las oscilaciones de corriente observadas entre dos valores corresponden a trap lleno o trap vacío. Estos resultados muestran una forma de obtener una “ametralladora” de electrones de a uno y a temperatura ambiente. Ya que la captura y emisión de electrones por ese trap aislado no se revelaba como algo extremadamente regular, aún no era útil para su aplicación como un patrón de corriente. Por otro lado, la desventaja era que no se tenía una forma controlada para posicionar un trap justo en el ápex de la punta del silicio, por lo cual había que experimentar con gran paciencia, cambiando permanentemente de punta hasta encontrar el efecto. Y una vez logrado, duraba muy poco tiempo, ya que la estructura no es muy estable y se va recomponiendo lentamente el orden atómico en la superficie de la punta.

Se llegaba así a los límites de lo que es dable esperar sin contar con la infraestructura necesaria para diseñar y fabricar nanoestructuras perfectamente caracterizadas y reproducibles. A partir de allí, se ponía en evidencia que este tipo de investigaciones requiere importantes inversiones para poder avanzar. Paralelamente, los institutos más importantes de metrología iban construyendo una muy costosa infraestructura que les permitiría justamente no trabajar “a ciegas”. Así, por ejemplo, el NIST desarrollaba su Laboratorio de Ultra-alto Vacío donde hoy se experimenta en las más sofisticadas aplicaciones electrónicas del STM. El PTB construía el Centro de Espacios Limpios (Reinraum Zentrum). En ese Centro actualmente se fabrican puntos cuánticos (quantum dots) que ya permiten observar efectos de SET a temperaturas de 50 K. Para llegar al intervalo de temperatura ambiente las nanopartículas deberían tener tamaños de 1 a 3 nm.

Si hoy se pueden construir moléculas átomo por átomo, así como “quantum wires” átomo por átomo, sería interesante construir un trap átomo por átomo, alimentarlo continuamente con electrones y comandar con tensiones eléctricas la apertura y cierre espontaneos del trap, de modo que los electrones sean emitidos ininterrumpidamente a intervalos de tiempo regulares.

El primer paso para un NMI sin experiencia previa en nanometrología bien puede consistir en adquirir un microscopio de efecto túnel con otras variantes SXM, para comenzar a caracterizar superficies (p.ej. bloques patrones, lentes, espejos, improntas de ultramicrodureza sobre recubrimientos delgados, etc.). Podría también adquirir o recibir de otro NMI nanopatrones para brindar servicios de calibración de SXM de terceros. Pero, para dedicarse a la investigación y desarrollo de nanodispositivos, debería pensarse en fuertes inversiones en laboratorios y equipamiento específico, o bien trabajar en forma asociada con universidades u otros NMIs que ya posean esas facilidades.

CONCLUSIONES

La nanotecnología tendrá un impacto profundo en los principios del siglo XXI, tal vez comparable al de la tecnología de la información, o al de la biología genética y molecular. Más aún, el carácter profundamente interdisciplinario de la nanotecnología permite suponer que todas esas disciplinas estarán estrechamente vinculadas entre sí por metodologías de fabricación y formas de medir en la escala del nanometro.

Así como el desarrollo de la microelectrónica y la computación dieron origen a una nueva instrumentación y a nuevas formas de medir, la irrupción de la nanotecnología también habrá de ocasionar algo similar. Esto significa que los NMIs no solamente habrán de utilizar nuevos patrones en metrología dimensional, si no que prácticamente en todas sus secciones podrían aparecer nuevas generaciones de instrumentos, tanto propios como de terceros, en correspondencia con los cambios que se espera que afecten a casi todos los productos, incluyendo entre ellos a los instrumentos de medir.

Los NMIs y los Servicios Nacionales de Calibración de los países en desarrollo seguramente habrán de recibir también el impacto de esta realidad, tal como ocurrió con los cambios tecnológicos precedentes. Para dedicarse a la investigación y desarrollo de nanodispositivos, deberán contar con laboratorios y equipamiento específico, eventualmente en asociación con los de universidades u otros NMIs.

REFERENCIAS

- [1] Besoins nationaux et internationaux dans le domaine de la métrologie. Rapport préparé par le CIPM pour les Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre. 1998 Bureau International des Poids et Mesures.
- [2] Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie. Paris, le 14 octobre 1999.
- [3] R. Feynman. There's Plenty of Room at the Bottom. Talk at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology, given on Dec. 29th 1959, first published in the February 1960 issue of Caltech's *Engineering and Science*. Disponible en la WEB en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [4] G. Binning & H. Rohrer, IBM J. Res. Develop., vol. 30, no. 4, p. 355 (1986)
- [5] D. M. Eigler & E. K. Schweizer. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, vol. 344, 5 April 1990.
- [6] *National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution*, report prepared by the Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN) of the National Science and Technology Council's Committee on Technology. 7 February 2000. Washington, D.C. Disponible en la WEB (<http://www.nano.gov>).
- [7] Ver, por ejemplo, en la página WEB del NIST (<http://www.nist.gov>) como los hipervínculos de nanotecnología conducen a gran cantidad de sitios de sus distintas actividades.
- [8] Ver, por ejemplo, Seminario del PTB: Selbstorganisierte Halbleiter-Nanostrukturen, Grundlagen und Anwendungen (Nanoestructuras semiconductoras auto-organizadas, fundamentos y aplicaciones). 1 de febrero de 2001. Informaciones: klaus.pierz@ptb.de
- [9] K. Hess & G. J. Iafrate. Approaching the quantum limit. *IEEE Spectrum*, p. 44, July 1992.
- [10] N. García, A. M. Baró, R. Miranda, H. Rohrer, Ch. Gerber, R. García Cantú and J. L. Peña, *Metrologia*, vol.21, p.135 (1985).
- [11] J. Valdés, E. Löbbe, M. Porfiri, *Surface Science*, vol.181, p.262 (1987).
- [12] S. Chesters, Hwa-Chi Wang, G. Kasper, *Solid State Technology*, p.73, Jan. 1991.
- [13] J. Valdés, J. Kohanoff, E. Löbbe, R. López Bancalari, M. Porfiri & R. García Cantú. *Journal of Microscopy*, vol. 152, Pt 3, p. 675, (1988).
- [14] J. Valdés, E. Choleva, E.Löbbe, A. Bragas & M. Porfiri. *Improved proposal for the realization of a dc quantum standard*. CPEM 92, Conference on Electromagnetic Precision Measurements. Poster Session, not submitted for publication. Paris, Jun. 1992.

