

LA TRAZABILIDAD AL SI DE LAS MEDICIONES DE LONGITUD PARA LAS NANOTECNOLOGÍAS

Rubén J. Lazos-Martínez
Centro Nacional de Metrología, México
km 4.5 Carretera a Los Cués. Mpio. El Marques, Qro., México
+52 (442) 2110575, rlazos@cenam.mx

Resumen: Este trabajo revisa el estado actual de la trazabilidad metrológica al SI de las medidas de longitud, las cuales se llevan a cabo con resultados dependientes del método de medida, con aplicabilidad limitada e incertidumbres de medida aún no apropiadas para las aplicaciones tecnológicas.

1. INTRODUCCIÓN

Son ampliamente conocidos los beneficios de utilizar una referencia única para expresar los resultados de mediciones. De esta manera los últimos dos siglos han sido testigos de la evolución de lo que ahora se denomina Sistema Internacional de Unidades, el SI. Con la intención de fortalecerlo, el SI se encuentra en proceso de evolución para expresar sus referencias en términos de las llamadas constantes fundamentales como la velocidad de la luz, la carga del electrón, la constante de Planck, el Número de Avogadro, etc.

Las nanotecnologías representan una de las tecnologías emergentes más dinámicas cuyo pleno desarrollo se ha observado esencialmente en las dos últimas décadas. Afincada entre las dimensiones atómicas y moleculares y las del mundo macroscópico, su ámbito queda definido por la nanoescala, el intervalo de dimensiones entre 1 nm y 100 nm aproximadamente [1]. En este intervalo se presentan efectos provocados no por las características individuales de átomos y moléculas sino por el comportamiento colectivo de sus agrupamientos en la nanoescala, entes complejos cuyo entendimiento es todavía parcial y algunos de sus comportamientos no tienen paralelo en los ámbitos microscópico ni macroscópico, los que por tanto propician aplicaciones novedosas.

Las características de los fenómenos que apoyan a las nanotecnologías se miden en términos de las mismas unidades del SI aunque los intervalos de medida sean distintos de los habituales: se requiere medir tamaños del orden de decenas de nanómetros, dos órdenes de magnitud por encima de las dimensiones de los átomos y de muchas moléculas, y un orden de magnitud por debajo de las aplicaciones industriales de mayor precisión; esta situación es similar para otras magnitudes como masa, fuerza, presión, concentración, etc., que por el momento quedan fuera del alcance de este trabajo.

Debe reconocerse que la alta velocidad de desarrollo de las nanotecnologías no ha permitido la extensión apropiada de los intervalos de medida habituales.

Este trabajo discute dos de los enfoques para ofrecer trazabilidad metrológica a las mediciones dimensionales en la nanoescala.

2. DESARROLLO

La realización de la unidad de longitud, el metro, en forma de patrones de medida se ha logrado sistemáticamente desde ya más de dos décadas. Con ello se ofrecen servicios de calibración de manera cotidiana esencialmente a la industria metal mecánica en los intervalos que requiere, cuyo valor inferior se encuentra en el orden de décimos de micrómetro, justo en la parte superior de la nanoescala, la que sin embargo coincide con la región inferior de aplicación de la interferometría óptica, técnica ampliamente utilizada en mediciones de longitud de alta exactitud aunque con limitaciones para medir en la nanoescala, ya sea por el ruido estadístico [2] o por limitaciones en los modelos disponibles para interpretar los efectos de difracción cuando las características del cuerpo bajo medición son mucho menores que la longitud de onda de la luz utilizada.

Se distinguen dos maneras principales de abordar la trazabilidad metrológica en la nanoescala: mediante artefactos dimensionados con trazabilidad y por el uso de cristales con parámetros dimensionales bien estudiados.

El primer enfoque, que podría denominarse de arriba-abajo, está basado en un método directo constituido por la realización del metro diseminada mediante un interferómetro óptico acoplado a un microscopio por barrido con sonda, como un microscopio de fuerza atómica [3]. Con este sistema se mide dimensionalmente un artefacto construido conteniendo elementos precisos a la nanoescala, el cual entonces se utiliza como patrón de medida

para la calibración dimensional de instrumentos tales como otros microscopios por barrido tanto con sonda como con electrones, cuyos modelos más avanzados pueden alcanzar resoluciones en la región de los subnanómetros. Este enfoque, aún en las últimas fases de desarrollo, tiene perspectivas amplias de aplicaciones prácticas en valores de incertidumbre del orden de pocos nanómetros, aunque por el momento falta por obtener mediciones independientes del método.

El segundo enfoque, que denominamos abajo-arriba, tiene un potencial más amplio aunque aún presenta detalles de aplicabilidad y sobre su trazabilidad al SI cuya solución requiere mayores esfuerzos; es significativo que la norma ISO 29301 [4] sólo aluda a la utilización de materiales de referencia certificados para calibrar la magnificación “cuando sea posible”. La idea es aprovechar las dimensiones de estructuras cristalinas, en este caso las del silicio [5].

Para ello se utiliza un interferómetro de rayos X y un interferómetro óptico acoplados de modo que los desplazamientos detectados por rayos X son medidos por interferometría óptica. No obstante que las longitudes de onda de estas dos técnicas difieren por alrededor de cinco órdenes de magnitud, el espaciado entre franjas de interferometría de rayos X dependen más de las características dimensionales de la red cristalina que de la longitud de onda de los rayos X [2]. Se encuentran resultados de mediciones de distancias interplanares con baja incertidumbre, por ejemplo, el valor de CODATA [6] para el espaciado de red d_{220} del silicio es 192 015.5714 fm con una incertidumbre de medida de 0.0032 fm; en contraste con uno de los valores reportados en [7] de 192 015.569 fm con incertidumbre de 0.006 fm. Muy recientemente se ha demostrado [8] la equivalencia de los resultados de ambos enfoques. Sin embargo, estas bajas incertidumbres en determinaciones dimensionales en la región subnanométrica aún dependen de una instrumentación específica para tal propósito, cuya construcción está al alcance de muy pocos laboratorios y que se aplicación requiere de condiciones estrictas de posicionamiento del cristal y ambientales, por lo que su utilización aún es muy limitada.

3. RESULTADO

Se encuentran dos enfoques principales para lograr que las mediciones de longitud en la nanoescala sean trazables al SI, requiriendo ambos algunos problemas por resolver para su cabal aprovechamiento. En el arriba-abajo los valores de

incertidumbre son relativamente altos en contraste con la resolución de los modelos de vanguardia de los instrumentos de medida. El enfoque abajo-arriba aprovecha la baja incertidumbre en las determinaciones de distancias entre planos cristalinos del silicio por difracción de rayos X, quedando sin embargo dificultades por resolver para su aplicación amplia.

4. CONCLUSIONES

La trazabilidad metrológica de las mediciones de longitud en la nanoescala es conceptualmente clara, y se ha desarrollado a lo largo de dos líneas, una como extensión de las mediciones a nivel macro, y la otra que parte de determinaciones en la región subnanométrica. En ambos casos se requiere continuar los esfuerzos para lograr mediciones de longitud trazables al SI y con la incertidumbre requerida para aplicaciones tecnológicas e industriales.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a uno de los revisores por haber llamado su atención a la referencia [8].

REFERENCIAS

- [1] NMX-R-27687-SCFI-2013. Nanotecnologías – Terminología y definiciones para nano-objetos – Nanopartícula, nanofibra y nanoplaca.
- [2] V. Nascov. How statistical noise limits the accuracy of optical interferometry for Nanotechnology. En G. Wilkening and L. Koenders, eds., *Nanocalibration standards and methods*. Wiley-VCH, 2005.
- [3] Haycocks J & Jackson K (2005) Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy *Prec. Eng.* 29 168-175J.
- [4] ISO 29301:2010 Microbeam analysis – Analytical transmission electron microscopy – Methods for calibrating image magnification by using reference materials having periodic structures.
- [5] Basile G., Bergamin A., Cavagnero G., Mana G., Vittone E., Zosi G., Measurement of Silicon (220) Lattice Spacing, *Phys. Rev. Lett.*, 1994 (72) 3133-3136
- [6] CODATA, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>, consultado en junio de 2016.
- [7] J. Martin, U. Kuetgens, J. Stümpel and P. Becker, *Metrologia*, 1998, 35, 811-817.
- [8] G. Dai, L. Koenders, J. Fluegge, H. Bosse, *Opt. Eng.* 55(9), 091407 (2016),