

Nuevas propiedades físicas de materiales nanoestructurados

Andrés I. Oliva Arias¹

Recibido: 13 de julio de 2005 - Aceptado: 25 de noviembre de 2005

RESUMEN

En este trabajo se presentan las propiedades físicas que se han determinado en los materiales cuando son fabricados a escala nanométrica. Se detallan los esfuerzos que se realizan para entender el comportamiento de los nuevos dispositivos, así como las aplicaciones que podrían en un futuro dominar el mercado internacional. Los nuevos campos de acción que se vislumbran tendrían orientaciones más amplias y podrían ser aplicados en diversas disciplinas. Se revisan algunos avances más recientes de estas aplicaciones, así como los esfuerzos realizados en nuestro laboratorio para estudiar las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de nanoestructuras metálicas de Au, Al y Cu. En especial se estudian los efectos de la resistividad eléctrica, el coeficiente térmico resistivo, el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación como función del espesor de las nanocapas depositadas por evaporación térmica.

Palabras clave: nanotecnología, nanoestructuras, propiedades físicas, nuevos materiales.

New physical properties of nanostructured materials

ABSTRACT

In this paper the new physical properties of the materials when they are prepared in the nanometer scale are discussed. Current efforts towards the achievement of a better understanding of their behavior in new devices and future applications that eventually could dominate the international market are reviewed. The new fields of action that are foreseen would have wider orientations and could be applied to a variety of disciplines. Recent advances of these applications and the efforts made in our laboratory to study for better understanding of the electrical, thermal and mechanical properties of Au, Al, and Cu metallic nanostructures are reviewed. The electrical resistivity, the resistive thermal coefficient, the modulus of elasticity, and the coefficient of elasticity are studied as a function of the nanofilms thickness deposited by thermal evaporation.

Keywords: nanotechnology, nanostructures, physical properties, new materials.

¹ Profesor Investigador. Departamento de Física Aplicada. Cinvestav IPN-Unidad Mérida. oliva@mda.cinvestav.mx

INTRODUCCIÓN.

Los enormes avances en la miniaturización de dispositivos para aplicaciones en la ciencia y la tecnología, se han dado principalmente en los últimos cincuenta años. La rápida desaparición de los llamados bulbos al vacío (tubos de rayos catódicos) inició con la invención del transistor de estado sólido [Bardeen, 1947]. Este dispositivo vino a reducir no sólo las dimensiones de los dispositivos, sino también el consumo de energía utilizado para su funcionamiento. La escala milimétrica (10^{-3} m), se redujo a la micrométrica (10^{-6} m) y su aplicación en los dispositivos electrónicos dio origen a lo que hoy conocemos como la microelectrónica. Sin embargo, la reducción no ha terminado aún, pues las escalas micrométricas, se han reducido ya a las conocidas como escalas nanométricas (10^{-9} m). Esta reducción no sólo es de tamaño, sino que se ha entrado a un rango dimensional que está en los mismos órdenes de magnitud que las distancias de ordenamiento entre planos atómicos en un material sólido, lo cual nos lleva a estudiarlos desde un punto de vista cuántico.

Pero esta reducción no puede ser considerada únicamente como una simple continuación de la miniaturización, sino como una condición que muestra claras diferencias de los materiales en cuanto a sus nuevas propiedades físicas que pueden presentar en comparación con sus propiedades en volumen (bulk). Por ello, los tecnólogos coinciden en asegurar que la transición de micro a nano es una etapa disruptiva; esto es, la continuidad se ve interrumpida por un cambio abrupto en cuanto a su comportamiento. Suena raro, pero podemos definirla como una tecnología con continuidad discontinua.

Una nueva serie de conceptos está siendo necesario definir para poder conocer y entender los nuevos comportamientos dimensionales de los materiales. La nanotecnología involucra una transición de la mecánica clásica a la mecánica cuántica. El contar con materiales de dimensiones cercanas a las distancias interatómicas, pone de manifiesto la necesidad de atender conceptos de uniones químicas, fuerzas de interacción y fuerzas de enlace, lo cual implica trabajar con sistemas más complejos.

Las propiedades físicas de un material, dependen del ordenamiento de sus átomos, sus enlaces, las condiciones ambientales (presión y temperatura) a las que está sometido y por supuesto de la densidad de cargas eléctricas en el material.

La trayectoria libre media de una carga eléctrica se define como la distancia promedio que tiene que desplazarse la carga “golpeando” a otras para poder fluir en el interior del material. Dicha carga requiere de un espacio para poder desplazarse. El confinamiento del espacio físico para el movimiento de las cargas da lugar a que las propiedades físicas del material sufran modificaciones.

La Figura 1 muestra una secuencia gráfica de simplificación de escala y de dimensionalidad que pueden sufrir los materiales. En la Fig. 1a, los átomos se encuentran dispersos en todo el gran volumen del material y las cargas se mueven en un espacio infinito. Las propiedades físicas en estas condiciones son las que tradicionalmente encontramos reportadas en los manuales y libros de materiales y son conocidas como propiedades volumétricas (bulk). Si reducimos una dimensión, por ejemplo el espesor (Fig. 1b), hasta una tal que los átomos se encuentran confinados a moverse prácticamente a lo largo y ancho del material, entonces tendremos el caso de materiales en geometría de capa delgada.

Las propiedades de estos materiales, han sido encontradas ser muy diferentes a las volumétricas. Así por ejemplo, el semiconductor CdS cuyo ancho de banda prohibida es de 2.42 eV (volumétrica), puede presentar valores de hasta 3.8 eV [Oliva et.al., 2001], cuando son preparados con algunos nanómetros de espesor. En forma similar, la resistividad eléctrica de los metales en capas delgadas se ha demostrado que presenta valores mucho mayores que su valor volumétrico [Zhang et.al., 2004]. Más recientemente, se han realizado experimentos reduciendo dos dimensiones del material (Fig. 1c) hasta formar lo que se conoce como hilos cuánticos [Steinhogel, 2002], de forma que las cargas únicamente pueden moverse en una dimensión: la longitud del hilo. Todavía más interesante, resulta confinar el material en las tres dimensiones de forma que las cargas queden atrapadas en un punto (Fig. 1d). En este caso, se estaría hablando de puntos cuánticos y es una de las geometrías de gran atracción por las propiedades físicas y aplicaciones futuras que pueden generarse para la nanotecnología. En este último aspecto, muy recientemente [Terabe et.al., 2005] han desarrollado un interruptor atómico de dos terminales separados por una distancia de 1 nm, que funciona a temperatura ambiente y presión atmosférica a una velocidad de 1 MHz usando únicamente un potencial de operación de 0.6 V.

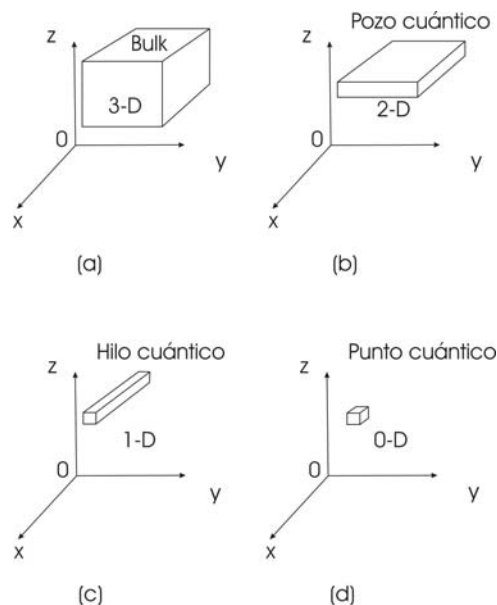


Fig. 1. Esquema del avance en la miniaturización de escala de los materiales. Nuevas propiedades son esperadas en las nanoestructuras. Material en (a) volumen, (b) capa delgada, (c) hilo cuántico y (d) punto cuántico.

Actualmente el mundo científico se encuentra en la etapa de intentar reproducir los dispositivos que ya conocemos a escala macroscópica, pero a una escala nanoscópica de forma que la resolución y las consecuencias de dicha miniaturización no son tan obvias o escalables en forma directa. Un claro ejemplo es el reciente nanocantilever fabricado de Al de 5-6 μm de largo y 500 nm de ancho desarrollado para detectar cambios de masa en forma similar a una balanza de cuarzo, usando el principio de disminución de la frecuencia de oscilación con el incremento de masa, con sensibilidad del orden de 2 atto g/Hz (2×10^{-18} g/Hz) [Davies y Boisen, 2005], que representa una resolución jamás antes concebida. En este trabajo se hace una revisión de los resultados de los últimos años en cuanto a las propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas de capas nanoestructuradas de Al, Au y Cu depositadas por evaporación térmica en nuestro laboratorio.

METODOLOGÍA

Con la finalidad de estudiar estas nuevas propiedades en nanoestructuras de Au, Cu y Al, es necesario contar con una técnica de preparación en forma controlada para así medir sus propiedades adquiridas. Estudiar con detalle una sola de estas propiedades puede llevarnos muchos años de esfuerzo, pero con la gran seguridad de encontrar resultados con aplicaciones tecnológicas sorprendentes. Para ello, en el Departamento de Física Aplicada se cuenta con una serie de técnicas de preparación y se han implementado técnicas de medición para la

determinación de propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas de las capas delgadas metálicas depositadas con diferentes espesores. Estas técnicas se encuentran disponibles para ser utilizadas en posibles colaboraciones en diversos proyectos de investigación con colegas de otras instituciones. Se hará mención de las más importantes, así como sus alcances y limitaciones de trabajo.

a) *Sistema de evaporación térmica.*

Consiste de una cámara de vacío cilíndrica de 60 cm de alto y 15 cm de diámetro. Una bomba mecánica de paletas y una bomba turbomolecular evacúan la cámara hasta alcanzar una presión de vacío de 10^{-5} Torr en aproximadamente 25 minutos. Crisoles de W y Mo con diferentes geometrías sirven para fundir el material a través de una fuente de corriente alterna capaz de proporcionar hasta 300 A. EL sistema está equipado con sensores para medir la presión interior en el rango de bajo ($760 \cdot 10^{-2}$ Torr) y alto ($10^{-2} \cdot 10^{-7}$ Torr) vacío y una entrada para introducir gas inerte y controlar un nivel de vacío requerido. Un sensor de cristal de cuarzo de 6 MHz y un controlador Maxtek TM-400 se utilizan para monitorear *in situ* el espesor de la capa depositada con una resolución de 0.1 nm. El equipo es utilizado también para depositar recubrimientos de protección y espejos de primera superficie para aplicaciones ópticas. La Figura 2 muestra una imagen del sistema de evaporación térmica construido.

b) *Propiedades eléctricas.*

Usando una cabeza comercial Jandel se implementó la técnica de cuatro puntas colineales para medir la resistividad eléctrica ρ en capas delgadas metálicas. La Fig. 3 muestra nuestro diseño implementado y el arreglo de las cuatro puntas. Una fuente de corriente HP 6643A y un multímetro HP 3458A se utilizan con ayuda de un programa desarrollado en LabView 7.0 para medir la corriente aplicada y el voltaje generado.

Por otro lado, también es posible medir las variaciones de resistencia eléctrica de las primeras monocapas metálicas mientras son depositadas en el interior de la cámara de vacío con el fin de estudiar el comportamiento oscilatorio observado [Shoji, et.al., 1995] como función del espesor de la capa depositada.



Fig. 2. Sistema térmico de evaporación diseñado íntegramente en el Cinvestav Unidad Mérida.

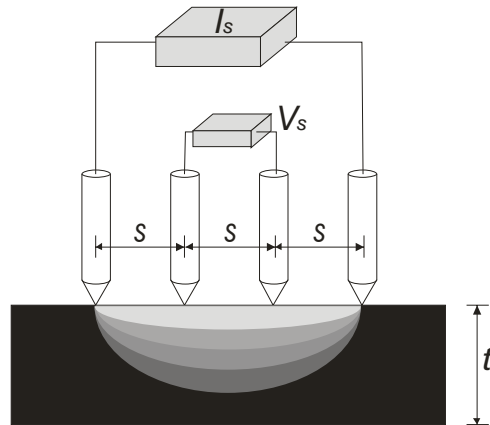
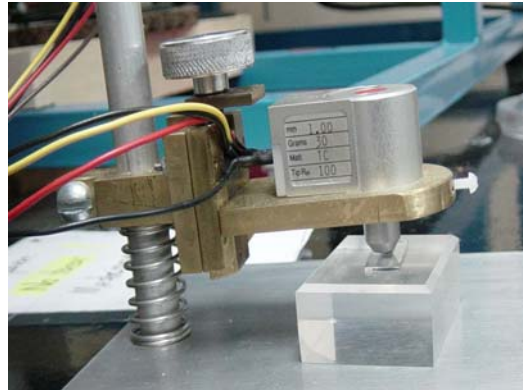


Fig. 3. Medidor de cuatro puntas para determinar la resistividad eléctrica en capas delgadas.

c) **Propiedades térmicas.**

A las capas metálicas depositadas se les colocan contactos eléctricos con plata coloidal conductora y se someten a calentamiento Joule haciéndoles fluir una corriente eléctrica entre 0.1 y 0.6 A en forma controlada. Se capturan los perfiles de calentamiento de la película metálica y del sustrato como función del tiempo con alta precisión usando termopares de masa pequeña tipo K apoyándose con un software de diseño propio en LabView. Con ayuda de un modelo analítico desarrollado en nuestro laboratorio, [Oliva et.al., 2005] se pueden calcular estos perfiles térmicos y compararlos con los perfiles medidos

experimentalmente para de ahí determinar el coeficiente de convección h del medio, las pérdidas de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, el tiempo de difusión de calor, la resistencia térmica de contacto, y el coeficiente térmico resistivo del sistema bimetálico formado por la capa delgada y el sustrato.

d) **Propiedades mecánicas.**

Cuando dos materiales diferentes se unen físicamente para formar un sistema bimetálico, en virtud de sus propiedades diferentes, se generan una serie de esfuerzos en la interfase cuando son sometidos a

esfuerzos mecánicos y/o térmicos. Nuestro caso de interés, está relacionado con los esfuerzos térmicos que se generan al paso de una corriente y los consiguientes fenómenos asociados. Un análisis mecánico cuidadoso del sistema bimetálico formado, indica que el módulo de elasticidad E , el coeficiente de dilatación α_t , y el esfuerzo de cedencia σ_y son función del espesor y temperatura de la película depositada, así como de las características del sustrato. En virtud de la falta de técnicas implementadas para determinar estas propiedades nanoestructurales en forma experimental, se han desarrollado metodologías para tal propósito, haciendo uso de la alta resolución vertical del microscopio de fuerza atómica (MFA) al medir las deformaciones *in situ* producidas por el calentamiento Joule al mismo tiempo que se obtiene una imagen en el MFA [Oliva et al., 1999]. Con esta deformación cuantificada es posible determinar el radio de curvatura generado, a partir del cual es posible calcular los valores de E , α_t y σ_y en la película como función de su espesor y del tipo de sustrato utilizado.

RESULTADOS

A continuación, se mencionan algunos resultados obtenidos producto de esfuerzos a lo largo de varios años al estudiar capas delgadas de Au, Al y Cu en los aspectos eléctricos, térmicos y mecánicos. El lector puede consultar la bibliografía mencionada para mayor detalle de los trabajos.

a) Propiedades eléctricas.

En términos simples, la resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca del material, por lo que no debería de depender de las dimensiones del material. Sin embargo, la realidad ha sido diferente para materiales en capa delgada cuyo espesor es menor a los 100 nm. Desde los primeros esfuerzos realizados en 1901 por entender estos efectos de tamaño en la resistividad eléctrica ρ propuestos por Thomson

[Thomson, 1905] usando teoría clásica, hasta los modelos más sofisticados de F-S [Fuchs, 1938 y Sondheimer, 1957] y de M-S [Mayadas y Shatzkes, 1969 y 1970] usando física estadística, han habido varios intentos para explicar tanto en forma teórica como en forma experimental, el porqué esta propiedad eléctrica se incrementa enormemente al disminuir el espesor del material. Hoy en día se acepta que el método de preparación de las películas delgadas juega un papel importante en el valor de ρ medido ya que depende fuertemente de los efectos superficiales y más aún del tamaño de grano y las fronteras entre ellos. Un estudio muy reciente (Camacho y Oliva, 2005) realizado en capas de Au, Al y Cu con espesores nanométricos demostró que las fronteras de grano son los elementos que más influencia tienen sobre el alto valor de ρ medido. Para ello, se depositaron capas de diferentes espesores usando la técnica de evaporación térmica y con ayuda de imágenes de alta resolución obtenidas con el MFA, se implementó una técnica para medir el tamaño de grano cuya función analítica es introducida en el modelo M-S para cuantificar los efectos de las fronteras de grano y comparar con los efectos de superficie. Se sabe que en geometría de capa delgada, los electrones sufren un confinamiento cuántico que les dificulta su movimiento para desplazarse por el material, incrementando su energía. La Figura 4 muestra los valores experimentales de ρ como función del espesor del material depositado para capas delgadas metálicas de Cu, Al y Au. Note que los valores de ρ medidos son cerca de dos órdenes de magnitud mayores que el valor volumétrico. La Figura 5 muestra los efectos cuantitativos de la superficie y las fronteras de grano en la ρ medida sobre la resistividad medida, como función del espesor, quedando demostrado que las fronteras de grano son las principales causantes de los altos valores de ρ en estas nanoestructuras.

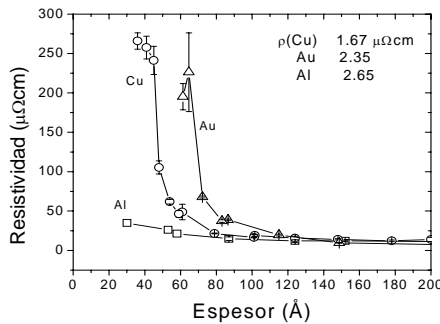


Fig. 4. Valores de resistividad eléctrica medidas para diferentes espesores de Al, Au y Cu. Se muestran los valores del bulo.

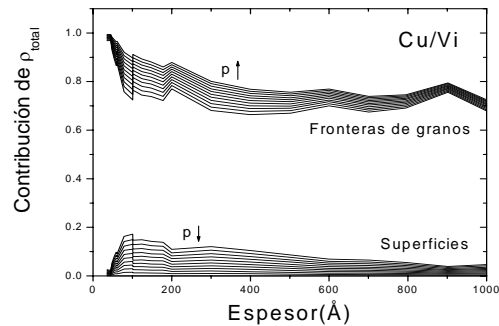


Fig. 5. Razón de contribución de las fronteras de grano y de las superficies del sistema Cu/vidrio sobre la resistividad eléctrica.

b) Propiedades térmicas.

Aunque hace ya mucho tiempo se conocen los coeficientes de dilatación de los metales en volumen y pueden encontrarse en los libros de texto y manuales, estos valores muestran cambios significativos cuando los espesores están en el rango nanométrico. Usando difracción de rayos X en la modalidad de haz rasante, recientemente hemos encontrado que, para el caso del aluminio, estos valores son ligeramente mayores que los del volumen. Al calentar *in situ* aplicando diferentes valores de corriente eléctrica sobre la capa delgada del material, el pico de difracción (111) desplazado inicialmente hacia la derecha del valor estándar (significando esfuerzos de tensión), muestra un desplazamiento hacia la izquierda, tendiendo hacia el valor estándar. Estos desplazamientos medidos con alta resolución, nos permiten determinar el parámetro de red del material y las deformaciones de la red cristalina. Un comportamiento de estos valores para una capa delgada de Au de 0.11 μm de espesor (0.5x2.0 cm² de área) depositada sobre un sustrato de vidrio (0.1

cm de espesor) se muestra en la Fig. 6. La densidad de corriente aplicada en este caso osciló entre 9x10⁴ A/cm² y 3x10⁵ A/cm². Un comportamiento opuesto fue medido para el coeficiente térmico resistivo donde se determinaron valores menores al valor del volumen cuando los espesores de las capas disminuyen. La Tabla I muestra este comportamiento para capas de Au y Al con diferentes espesores.

Por otro lado, midiendo los perfiles térmicos con alta resolución durante el proceso de calentamiento por efecto Joule, hemos implementado una metodología para estimar el coeficiente de convección, la resistencia térmica de contacto y la constante de tiempo de difusión del calor en un sistema bimaternal Au/vidrio.

Una revisión más amplia sobre el transporte térmico a escala nanométrica puede ser consultada en un trabajo de revisión publicado recientemente [Cahill, et.al, 2003].

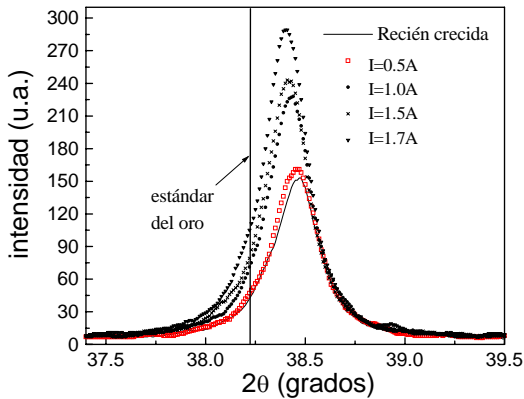


Fig. 6. Desplazamiento del pico de difracción (111) del Au cuando se aplican distintos valores de corriente eléctrica en la película.

b) Propiedades mecánicas.

Esta es un área reciente que ha iniciado su estudio con el objetivo de proponer aplicaciones usando nanoestructuras metálicas. Pocos esfuerzos experimentales se han realizado para medir estas propiedades, por la enorme dificultad de contar con una técnica adecuada para medir ciertas propiedades mecánicas. Basándonos en que una capa depositada sobre un sustrato sufre esfuerzos en la interfase de unión de acuerdo con la ecuación de Stoney [Stoney, 1909], es posible medir deformaciones muy pequeñas en las capas delgadas usando el MFA, cuando éstas se

Tabla I. Valores de ρ y de α_r obtenidos para diferentes espesores de capas delgadas de Al y Au.

Material	Espesor (μm)	ρ (μΩ-cm)	α _r (°C ⁻¹)
Au	0.11	-	0.0017
	0.32	10.20	0.0018
	0.5	10.80	0.0020
	0.68	9.45	0.0022
	0.88	4.79	0.0029
	Bulto	2.44	0.0034
Al	0.18	2.72	0.0041
	0.51	3.53	0.0041
	1.02	-	0.0043
	1.98	-	0.0043
	Bulto	2.83	0.0039

someten a diversos flujos de corriente controlados. Estas deformaciones térmicas son luego relacionadas con los radios de curvatura, a partir de los cuales se pueden estimar los parámetros mecánicos E, α_t y σ_y. Se han dado los primeros pasos sugiriendo modelos teóricos que nos permitan cuantificar con un par de experimentos los valores de estos parámetros [Hu y Huang, 2004]. Resultados preliminares se muestran en la Figura 7 donde se observa el comportamiento del módulo de Young como función del espesor de la película depositada. Del comportamiento se observa que el valor de E se incrementa en forma importante

al reducirse el espesor de la capa metálica e incrementarse la razón de los radios de curvatura de los materiales generados por temperatura o por esfuerzo mecánico. Por otro lado, se ha encontrado que el coeficiente de expansión térmica del material se incrementa en forma casi linealmente inversa con el espesor, tal como se muestra en la Fig. 8, donde se

han calculado los valores del coeficiente de dilatación para diferentes espesores de capa metálica de oro. Esto implica una mayor deformación térmica para espesores cada vez menores. Un límite físico es necesario agregar al modelo, en virtud de la imposibilidad de algunos comportamientos en la vida real.

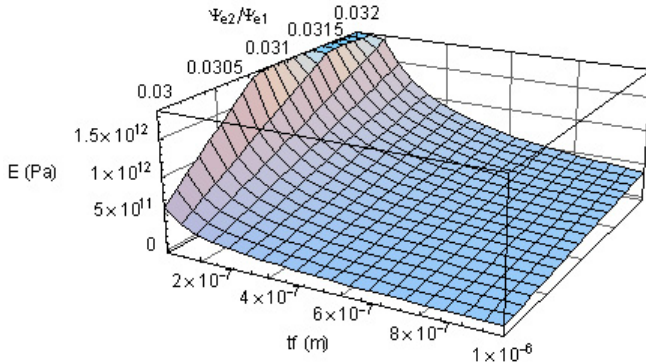


Fig. 7. Módulo de elasticidad E como función del espesor de la película delgada t_f y la relación de curvaturas de dos sistemas bimetálicos (ψ_{e2}/ψ_{e1}).

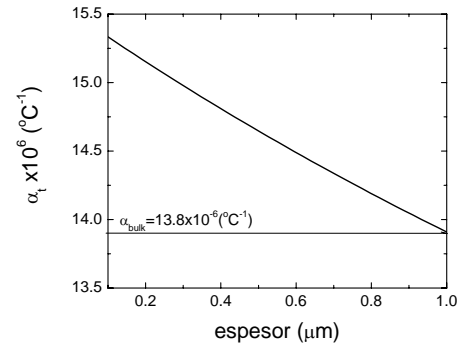


Fig. 8. Comportamiento del coeficiente de expansión térmica como función del espesor de la película delgada de Au.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Por todo lo expuesto en este trabajo puede concluirse que las nuevas propiedades de los materiales, por efecto de sus dimensiones del orden de las distancias entre átomos, podría significar el inicio de una nueva era tecnológica similar a la ocurrida con la invención del transistor de estado sólido en la segunda mitad del siglo XX. La cada vez mayor miniaturización de los nuevos dispositivos, lleva implícito un ahorro del material utilizado, un ahorro de energía para su funcionamiento y una mayor capacidad de uso en virtud de las nuevas propiedades que se han encontrado y por aquellas que prometen determinarse en un futuro inmediato. Esto implica realizar una amplia revisión de las propiedades ya conocidas de los materiales en volumen, para determinar sus nuevos valores pero en la escala nanométrica. En forma paralela, es urgente desarrollar nuevas metodologías para determinar y cuantificar estas

nuevas propiedades en virtud de los comportamientos cada vez más complejos que transitan entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica. Nuevos conceptos han de surgir de estos esfuerzos que contribuirán al mejor entendimiento de los nuevos materiales y sus aplicaciones a futuro. Con base en esto, ha surgido actualmente una nueva disciplina basada en el desarrollo de estas nuevas propiedades: la de los dispositivos MEM's (microelectromechanical devices).

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo otorgado por el CONACyT a través del proyecto 38480-E. Expreso mi agradecimiento a los estudiantes de posgrado han participado a lo largo de estos cuatro años de esfuerzos: Francis Avilés, Oscar Ceh, Manuel Camacho, Thelma Novelo, Rubén Domínguez Maldonado y Eduardo Huerta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Bardeen, Bell Lab. (1947). Nobel Prize in Physics, 1956 y 1972
- [2] A.I. Oliva, O. Solís-Canto, R. Castro-Rodríguez, P. Quintana. (2001). "Formation of the band gap energy on CdS thin films growth by two different techniques". *Thin Solid Films* 391, 28-35.
- [3] W. Zhang, S.H. Brongersma, O. Richard, B. Btjjs, R. Palmans L. Froyen, K. Maex. (2004). "Microstructure and resistivity characterization of AuCu I superlattice formed in Cu/Au thin films". *J. Vac. Sci. Technol. B*, 22, 2715.
- [4] W. Steinhogel, G. Schindler, G. Steinlesberger, M. Engelhardt, (2002). "Size-dependent resistivity of metallic wires in the mesoscopic range". *Phys. Rev. B*. 66, 075414.
- [5] T. Terabe, T. Hasegawa, T. Nakayama, M. Aono. (2005). "Quantized conductance atomic switch". *Nature* 433, 47.
- [6] Z. J. Davis, A. Boisen. (2005). "Aluminum nanocantilevers for high sensitivity mass sensors" *Appl. Phys. Lett.* 87, 013102.
- [7] Iida Shoji, Abe Sinji, Hidemura Yoshikazu. (1995). "Resistivity oscillation of Ti film during growth". *Jpn. J. Appl. Phys.* 34, 4087.
- [8] A.I. Oliva, R.D. Maldonado, O. Ceh, J.E. Corona, H.G. Riveros, (2005). "Study of a bimaterial system by an improved dynamical thermal model". *Surf. Rev. Lett.* 12 (2), 289.
- [9] A. I. Oliva, P. Quintana, O. Ceh, E. Corona, M. Aguilar. (1999). "Current induced effects in aluminum thin films". *Thin Solid Films*. 353 (1-2), 1.
- [10] J.J. Thomson, (1901) *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 11, 120.
- [11] K. Fuchs, (1938). *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 34, 100; E.H. Sondheimer, (1952) *Advan. Phys.* 1, 1.
- [12] A. F. Mayadas, M. Shatzkes, J.F. Janak, (1969). "Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of specular reflection at external surfaces". *Appl. Phys. Lett.* 14, 345; A. F. Mayadas, M. Shatzkes, (1970) "Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces". *Phys. Rev. B* 1, 1382.
- [13] Juan M. Camacho, A. I. Oliva. (2005). "Morphology and electrical resistivity of metallic nanostructures". *Microelectronics Journal* 36 (3-6), 555.
- [14] D.G. Cahill, W.K. Ford, K.E. Goodson, G.D. Mahan, A. Majumdar, H.J. Maris, R. Merlin, S.R. Phillpot. (2003). "Nanoscale thermal transport" (Review) *J. Appl. Phys.* 93, 793.
- [15] G.C. Stoney. (1909). *Proc. Royal Soc. London A*32, 172.
- [16] Y. Y. Hu & W. M. Huang, (2004). "Elastic and elastic-plastic analysis of multilayered thin films: closed-form solutions". *J. Appl. Phys.* 96, 4154; and W. M. Huang & Y. Y. Hu. (2004) "A simple approach to determine five thermomechanical properties of thin ductile films on an elastic substrate". *Appl. Phys. Lett.* 85, 6173.