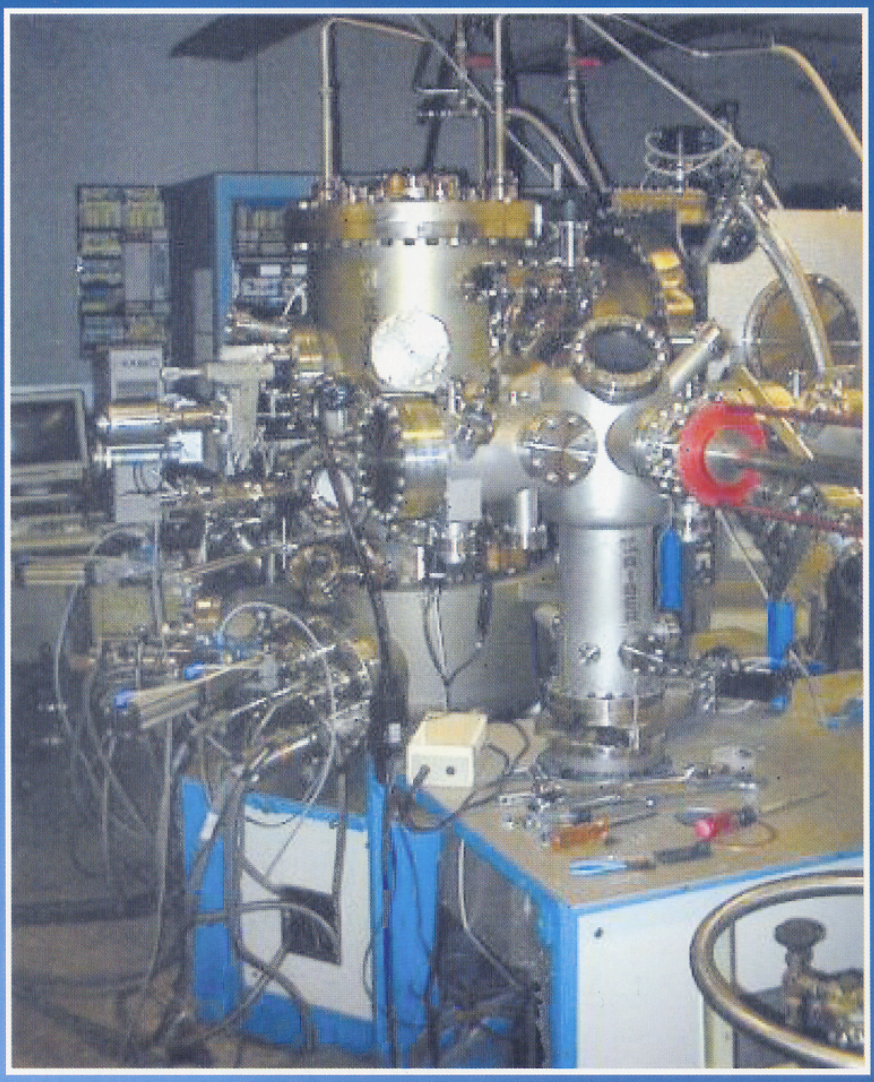
REVISTA ESPAÑOLA DE

FISICA

VOLUMEN 17, NUMERO 2, 2003

1903-2003

CENTENARIO DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA



REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA

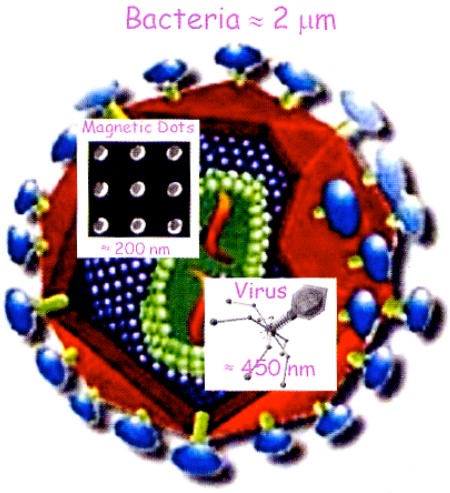
Nanoestructuras: un viaje de tres a cero dimensiones

M. Isabel Montero e Ivan K. Schuller

En este trabajo, revisamos diferentes métodos de preparación de nanoestructuras, su caracterización estructural, la importancia de ésta para el entendimiento de sus propiedades y algunos ejemplos de sistemas nanoestructurados que exhiben propiedades novedosas atribuibles al confinamiento de las estructuras.

1. Introducción

El estudio de las propiedades físicas de nanoestructuras es un campo intensamente investigado en la actualidad. El confinamiento en tamaños comparables a longitudes características de alguna propiedad física de interés, como el magnetismo y la superconductividad hace que las nanoestructuras presenten propiedades interesantes y novedosas, no observadas en materiales naturales. Nuevas técnicas de litografía en combinación con métodos de deposición modernos han permitido la preparación de estructuras cada vez más pequeñas, variando su dimensionalidad desde tres a cero dimensiones. Tecnológicamente, estas estructuras se han vuelto cada vez más importantes ya que proveen nuevas funcionalidades (por ejemplo, en la grabación magnética) y permiten la miniaturización. A través de estos estudios estamos viviendo tiempos interesantísimos en la historia de la ciencia, en la cual se vislumbra la creación artificial de materiales realmente nuevos a partir de constituyentes nanoestructurados. Quizás lo más importante es la inspiración profética que nos dejó Ramón y Cajal hace casi 100 años: "...la ciencia está en un estado de flujo perpetuo, progresa y crece continuamente, y todos nosotros podemos contribuir con un grano de arena al imponente monumento del progreso si realmente estamos resueltos a hacerlo" [1].



La física del estado sólido moderna está principalmente basada en el descubrimiento de nuevos materiales que exhiben propiedades inesperadas y nuevas funcionalidades. En general, estos materiales son complejos y contienen más de un elemento, en geometrías inusuales [2]. Una de las vías más fructíferas para el descubrimiento de nuevos fenómenos físicos se basa en la preparación de materiales a partir de los elementos, arreglándolos en geometrías que no existen en la naturaleza. Este tipo de materiales puede consistir en pequeños cúmulos organizados en geometrías regulares ("arrays") [3;4], películas delgadas en contacto directo con otras películas ("heteroestructuras") [5-7] o repetidas periódicamente (multicapas y "superredes") [8;9]. Generalmente, estos materiales exhiben propiedades interesantes cuando su tamaño a lo largo de una o varias dimensiones es comparable (o menor) a longitudes características de alguna propiedad física de interés como la superconductividad, el magnetismo, la elasticidad, etc [10-12]. En general, las longitudes características de interés son del orden de 1 a 10.000 nanómetros (nm) y por eso, estos materiales son conocidos como "nanoestructuras". Inicialmente, este tipo de investigación comenzó con la preparación de "superredes". Estas superredes son multicapas de dos materiales diferentes que exhiben coherencia estructural en la dirección perpendicular al sustrato, como se ilustra en la Figura 1.

En principio, existe una gran variedad de técnicas experimentales que permiten la preparación de nanoestructuras con un alto grado de control. En la práctica, las propiedades de interés están fuertemente afectadas por el desorden inherente e inevitable, independientemente, del tipo de preparación de estas nanoestructuras. Cambios de tipo estructural incluso pueden ocurrir después de la preparación de las nanoestructuras. Por esta razón, es de suma importancia caracterizar las nanoestructuras a escala atómica, cuantitativamente, después de su preparación.

Las propiedades físicas de nanoestructuras exhiben comportamientos interesantes que no existen en los materiales naturales, incluyendo efectos de dimensionalidad reducida, una variedad de efectos de proximidad [13-15], magnetorresistencia gigante [16], anomalías mecánicas [17;18], etc. Este artículo se limita a describir algunos ejemplos de nanoestructuras preparadas artificialmente por métodos físicos y sus propiedades más novedosas.

Preparación

Hay varios métodos para preparar nuevos materiales del tipo mencionado en la introducción. Existen métodos químicos que están basados en la autoagregación de ciertas moléculas que contienen los compuestos o elementos de interés y métodos metalúrgicos basados en el control del crecimiento y la nucleación en fases heterogéneas. Aquí nos limitamos a describir resultados de métodos físicos que quizás son más flexibles que el resto de los métodos mencionados. Generalmente, estos últimos consisten en la combinación de algún proceso de crecimiento de películas delgadas con métodos

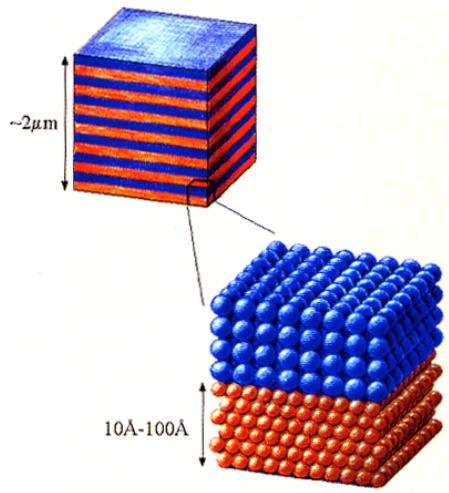


Figura 1. Concepto de una superred a finales de los años 70s.

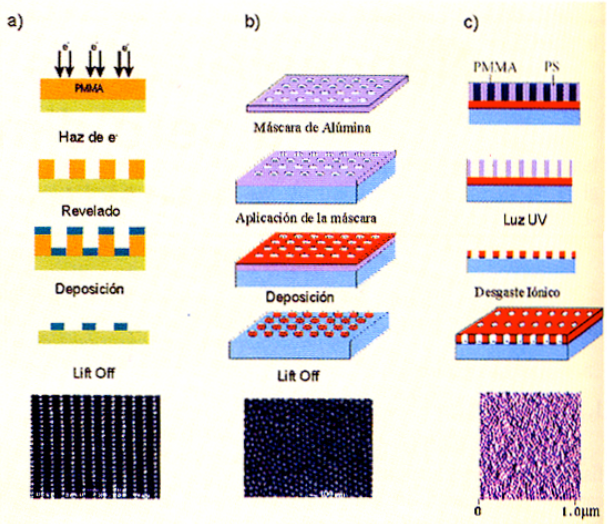


Figura 2. Esquemas de los procesos de fabricación de nanoestructuras mediante: a) litografía por haz de electrones, b) máscara de alúmina porosa (ref. [21]) y c) autoagregación de polímeros (diblock copolymer).

de litografía. Casi todos los procesos de crecimiento de películas delgadas han sido aplicados a la preparación de nanoestructuras, pero principalmente dos de ellos han sido enfatizados: la pulverización catódica (sputtering) y la epitaxia de haces moleculares (MBE).

Los métodos de litografía, habitualmente, consisten en la preparación de una máscara que contiene agujeros con las geometrías deseadas. La preparación de estas máscaras puede hacerse de diferentes maneras [19]. Así, por ejemplo, la litografía de haz de electrones (o rayos X) consiste en un proceso parecido a la fotolitografía, pero usando haces de electrones (o rayos X), para afectar las propiedades químicas de la máscara (Fig. 2a). En este caso, la máscara consiste de un polímero, como el polimetilmetacrilato (PMMA) usado comúnmente, que es sensible a la radiación empleada (electrones, rayos-X, iones, etc.). Máscaras de óxido de aluminio poroso, con agujeros regulares, se pueden preparar empleando métodos electroquímicos (Fig. 2b). Utilizando la autoagregación de la mezcla de dos polímeros (diblock copolymer) se produce una máscara con agujeros muy pequeños sobre superficies macroscópicas (Fig 2c). El grado de control de cada método (regularidad, tamaño mínimo y forma del agujero, tamaño máximo que se puede cubrir convenientemente, geometrías, etc) es, actualmente, un tema de intensa investigación. Una vez que el sustrato está cubierto con la máscara, el material deseado es depositado sobre toda la máscara. Un proceso de "eliminación" ("lift-off") permite quitar la máscara y el material superfluo, dejando sólo las nanoestructuras que están en contacto directo con el sustrato.

Sistemas

Una gran variedad de sistemas intermedios, entre el átomo y el bulto, ha sido preparada y estudiada, como por ejemplo, heteroestructuras, multicapas y superredes. Las "heteroestructuras" son películas delgadas de una variedad de materiales que tienen propiedades regidas por la dimensionalidad restringida de cada uno de los constituyentes, por las superficies y por las interfaces. Una "multicapa" periódica se puede construir al repetir periódicamente en una dirección dos materiales. Si al mismo tiempo la multicapa exhibe coherencia estructural en la dirección de la modulación quimica, la multicapa se denota como una "superred" (Fig. 1) [20].

Pequeños cúmulos con tamaños nanométricos se pueden preparar en una gran variedad de geometrías. Principalmente este tipo de estructuras ha sido preparado en redes bidimensionales sobre un sustrato, como se observa en la figura 2.

Caracterización

La caracterización estructural es esencial para entender las propiedades físicas de estos materiales. Debido a que los átomos superficiales o interfaciales constituyen una gran proporción de la totalidad de los átomos, las variaciones en concentración y los defectos tienen efectos relevantes y a veces dominan las propiedades físicas. Por esta razón, es crucial utilizar técnicas cuantitativas que permitan determinar a escala atómica propiedades como la expansión de la red, la rugosidad, la interdifusión, los defectos, etc.

La dispersión ("scattering") de rayos X o neutrones ha sido utilizada con mucho éxito para determinar cuantitativamente las propiedades estructurales de los sólidos. Para determinar cuantitativamente la posición atómica y la composición de materiales complejos en bulto, es necesario emplear las llamadas técnicas de refinamiento estructural. La más conocida de éstas es la técnica de refinamiento de Rietveld [22]. En esta técnica, los datos de difracción de rayos X (o neutrones) son ajustados numéricamente (empleando optimización no lineal) utilizando modelos con parámetros estructurales y composicionales como los parámetros ajustables. Este método, considerado standard, ha sido utilizado para la determinación de la estructura de materiales complejos en bulto, como por ejemplo el superconductor de alta temperatura $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [23]. El uso de rayos X para la determinación cuantitativa de la estructura de sistemas de películas delgadas o nanoestructuras ha sido mucho más

limitado. Hay dos razones para esto: 1) los materiales nanoestructurados sólo han sido preparados en los últimos 25 años aproximadamente, y 2) las técnicas de refinamiento de bulto (como la de Rietveld) no son directamente aplicables a películas delgadas o nanoestructuras. La razón es que en las películas delgadas los parámetros de interés son diferentes y como consecuencia de esto el formalismo matemático cambia sustancialmente.

En los últimos 10 años, algunas técnicas de refinamiento (como el SUPREX [24]) han sido desarrolladas específicamente para películas delgadas [24;25] y han sido aplicadas a películas nanoestructuradas como las superredes [26]. En estos casos, los parámetros de interés son típicamente la rugosidad, la interdifusión, el parámetro de red como función de la distancia, etc. La figura 3 muestra un ejemplo de refinamiento de la estructura de una tricapa de Fe-FeF2-Ag (Fig. 3a) y la de una superred de Fe/Cr (Fig.3b). En ambos casos, los datos experimentales están indicados como puntos y los resultados del refinamiento vienen dado por las líneas continúas. Obviamente, es posible ajustar los datos en varios órdenes de magnitud de la intensidad con alta precisión. Lo difícil es asegurar que el resultado del refinamiento es un mínimo absoluto del espacio de parámetros [25] y es allí donde hay que invertir considerable esfuerzo experimental y computacional. Nótese además, que la difracción de rayos X describe un promedio de las estructuras.

Por otro lado, si es de interés determinar las características individuales de cada una de las interfaces de una superred, el problema se complica. Especialmente, cuando la superred está formada por dos elementos próximos en el sistema periódico (Fe y Cr, por ejemplo), y por lo tanto exhiben poco contraste para la difracción de rayos X o para la microscopía de transmisión (TEM). Una manera de resolver estos problemas es agregando algún método inelástico para permitir la caracterización individual de cada elemento de la superred. Uno de estos métodos ha sido aplicado recientemente para la determinación cuantitativa de la rugosidad interfacial en una superred de Fe/Cr [30]. Esta técnica es conocida en la literatura como EFTEM (Energy Filtered Transmission Electron Microscopy). En esta técnica los dos elementos se pueden identificar individualmente y por lo tanto se genera una redundancia que permite asegurar que la medida está correctamente hecha. La figura 4 ilustra una serie de muestras de Fe (30 Å)/Cr(12 Å) que han sido analizadas de esta manera. Nótese que con esta técnica es posible medir la rugosidad de cada capa individualmente, estudiar si la rugosidad se reproduce de capa a capa, y medir la longitud de coherencia de la rugosidad.

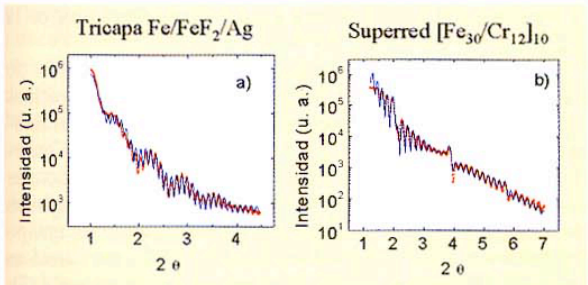


Figura 3. Diagramas de difracción de rayos X (puntos) y refinamiento (línea) de: a) una tricapa $Fe/FeF_2/Ag$ y b) una superred [Fe (30 Å)/Cr (12 Å)]$_{10}$. Figuras tomadas de las referencias [28] y [29].

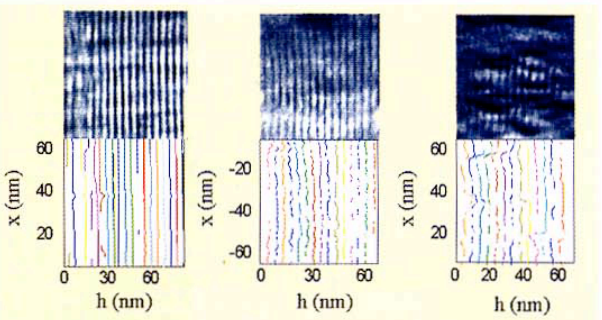


Figura 4. Imágenes EFTEM de tres superredes [Fe (30 Å)/Cr (12 Å)]$_{20}$ crecidas por MBE. Figuras tomadas de la referencia [29].

Una serie de técnicas de microscopías también ha sido utilizada para determinar semi-cuantitativamente la estructura de materiales nanoestructurados. Las técnicas comunes de microscopia electrónica (de barrido SEM y de transmisión TEM) y las técnicas de barrido (STM, AFM, MFM) se combinan con métodos de simulación numérica y con mediciones inelásticas, para obtener la estructura de los materiales nanoestructurados. Como se ha mencionado anteriormente lo difícil es demostrar que las soluciones así obtenidas son únicas y que, en efecto, reflejan la estructura real del sólido nanoestructurado. Un ejemplo de microscopía electrónica de barrido (SEM) aplicado a materiales nanoestructurados se puede observar en la figura 2. Estas técnicas son más o menos comunes y por lo tanto no vamos a dar detalles sobre ellas.

Fenómenos físicos

Los fenómenos físicos que ocurren en este tipo de estructuras se pueden clasificar, principalmente, en dos grupos. En el primer grupo, las propiedades cambian debido a que la geometría del material está restringida sea a cero, una o dos dimensiones. Junto con esta restricción, el hecho de que el material tenga una fracción importante de los átomos en la superficie hace que los efectos superficiales dominen las propiedades. En el segundo grupo, el hecho de que las nanoestructuras están, en general, en contacto directo con otro materiales, y al mismo tiempo, una gran fracción de los electrones está fuera de la estructura física, produce la aparición de "efectos de proximidad" de todo tipo. Esto incluye fenómenos clásicos de proximidad superconductora [11], efectos de proximidad magnéticos (predichos hace muchos años pero poco explorados), [13] y efectos más nuevos como el anclaje colectivo de la red de vórtices superconductores [2]. En superredes, las expectativas originales eran que una superred (que exhibe coherencia estructural) también va a exhibir efectos de superred (efectos colectivos) de las propiedades físicas, como el transporte, el magnetismo, la superconductividad, etc. Por ejemplo, en una superred metálica se espera que la periodicidad adicional producida por el crecimiento abra mini-brechas ("mini-gaps") en la superficie de Fermi. Esta simple predicción no ha sido observada. Probablemente, el origen de esto último se deba a que las longitudes características que rigen la coherencia estructural son diferentes a las longitudes características que rigen las propiedades electrónicas. Este es un problema interesante desde el

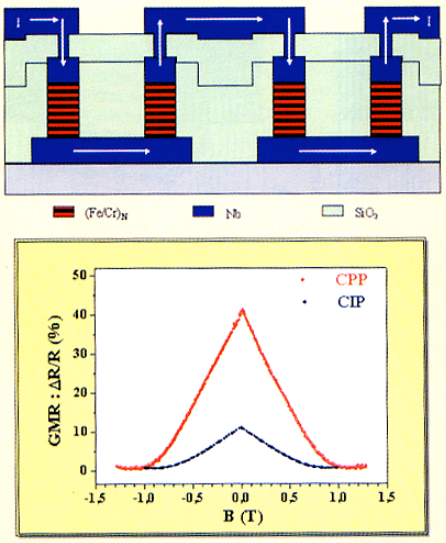


Figura 5. a) Esquema de la sección transversal de una muestra para medidas CPP. b) Magnetorresistencia de una superred [Fe (30 Å)/Cr (12 Å)]$_{10}$ medida en CPP y CIP. Figuras tomadas de las referencias [9].

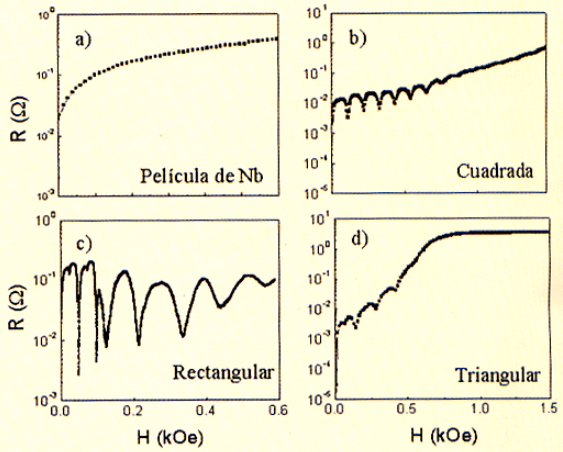


Figura 6. Resistividad en función del campo magnético para: a) una película uniforme de 100nm de Nb, b) una película de 100 nm de Nb con una red cuadrada (400 nm) de puntos de Ni, c) una película de 100 nm de Nb con una red rectangular (400 nm x 900 nm) de puntos de Ni y d) una película de 100 nm de Nb con una red triangular (400 nm) de puntos de Ni. Figuras tomadas de las referencias [10, 35-37].

punto de vista técnico y no ha sido explorado en detalle. Aunque efectos más complicados inducidos por la periodicidad de la superred han sido explorados [31].

Obviamente, en un resumen tan corto es imposible cubrir todos los aspectos de un campo tan amplio. Así que, sólo vamos a presentar ejemplos que ilustran brevemente los dos tipos de fenómenos físicos que son posibles usando este tipo de materiales; el transporte anisotrópico en superredes metálicas y la física de vórtices en superconductores usando nanoestructuras como fuentes de anclaje.

Uno de los fenómenos más espectaculares que ha salido de la física de superredes es el descubrimiento de la Magnetorresistencia Gigante (GMR: Giant Magnetoresistance) en superredes ferromagnéticas (Fe)/normales (Cr) [14]. En este tipo de superredes, para un grosor particular de los dos constituyentes las capas magnéticas se ordenan "antiferromagnéticamente" [32-34] (cuando el campo magnético H=0); o sea, cada capa tiene su momento magnético apuntando alternadamente en dirección opuesta. Para campos magnéticos altos, las capas se ordenan ferromagnéticamente y la resistencia disminuye. Debido a este ordenamiento y a la existencia de dispersión dependiente del espín, la magnetorresistencia (el cambio de R con H) de estos materiales es mucho más grande que la que se observa típicamente (< 1%) en un metal. Este efecto ha llevado muy rápidamente a aplicaciones prácticas en una gran variedad de áreas como la grabación magnética, sensores, detectores, etc. Este es un ejemplo clásico en el cual, en un periodo del orden de 10 años, un descubrimiento en ciencia básica lleva a aplicaciones prácticas en el mercado consumidor.

Las superredes, debido a su estructura, son intrínsicamente anisotrópicas en la mayoría de sus propiedades. En particular, las propiedades de magnetotransporte son anisotrópicas; por ejemplo, la magnetorresistencia en la dirección paralela a las capas se espera que sea diferente que en la dirección perpendicular. Generalmente, las medida más fáciles de hacer son aquellas con la corriente eléctrica fluyendo paralela a las capas, y por eso la mayoría de los trabajaos publicados en este tema son en esta dirección (convencionalmente designadas como CIP-Current In the Plane). Las medidas con la corriente fluyendo perpendicular a las capas (convencionalmente, designadas como CPP-Current Perpendicular to the Planes) son mucho más difíciles de hacer debido que la resistencia absoluta a medirse es muy pequeña (del orden de unos pocos mΩ). Por otro lado, desde el punto de vista conceptual y teórico esta geometría (CPP) es mucho más fácil de entender y estudiar. La figura 5a muestra un método para medir la resistividad en superredes metálicas empleando electrodos superconductores [9]. Este método está basado en el uso de litografía selectiva para conectar con electrodos superconductores (Nb) una serie de columnas del material de interés (una superred de Fe/Cr en este caso). La figura 5b muestra el resultado de la medida de la magnetorresistencia gigante en las dos direcciones. Nótese que la resistividad en la dirección perpendicular a las capas (CPP) es cuatro veces mayor que en la dirección paralela a las capas. Por supuesto, la magnitud de la magnetorresistencia también depende de las propiedades interfaciales como la rugosidad y la interdifusión [38] y por lo tanto los estudios de este tipo deben incluir una descripción cuantitativa de la estructura.

Como mencionamos en la introducción, la función de onda de los electrones y los campos eléctricos y magnéticos asociados en las nanoestructuras, se extienden fuera del límite físico de ésta. Por los tanto, las propiedades de otros materiales que están en proximidad física con las nanoestructuras son fuertemente modificadas. Por ejemplo, las propiedades de transporte de una película superconductora en un campo magnético pueden ser modificadas sustancialmente si está en proximidad con una red de nanoestructuras de níquel [37]. La figura 6 compara la resistividad, como función del campo magnético, de una película de Nb sola, con películas de Nb que están en proximidad con una variedad de redes nanoes-

tructuradas de Ni en diferentes geometrías. La resistividad "de flujo" (flux flow) que tiene una dependencia monótona en el caso del Nb solo, exhibe una serie de mínimos profundos cuya dependencia esta regida por la geometría de la red de nanoestructuras. La interpretación inicial es bastante directa: los mínimos se deben a un ajuste quántico entre la red de vórtices y la red de puntos magnéticos que sirven de sitios de anclaje. La interpretación detallada es mucho más compleja y todavía no ha sido solucionada en detalle. Por ejemplo, no está claro porqué con la red triangular (cuadrada) aparecen mínimos de segundo (tercer) orden, cuál es el origen de la dependencia del fondo residual, qué determina el número y la profundidad de los mínimos, etc.

Conclusiones y Futuro

Una de las (o quizás la más) importantes direcciones de la física del estado sólido es la preparación, la caracterización y el estudio de materiales con dimensionalidad reducida, con tamaños que son comparables a las longitudes características de fenómenos físicos importantes. Estas longitudes características (longitud de coherencia superconductora, longitud de canje magnético, longitud dipolar magnética, etc) son nanométricas y por lo tanto estas estructuras son denominadas nanoestructuras. Como en estos casos la función de onda electrónica, los campos magnéticos y eléctricos asociados se extienden una distancia apreciable fuera del tamaño físico de las nanoestructuras, los efectos de proximidad son sumamente importantes. Aunque este es un campo de investigación básica, varias aplicaciones importantes han surgido (como sensores, cabezales magnéticos, óptica nano-métrica, etc) que impactan la industria de alta tecnología.

En el futuro es importante enfatizar los estudios cuantitativos de la estructura y su conexión con las propiedades físicas. Desde el punto de vista teórico es importante aclarar el efecto del desorden en las propiedades físicas, especialmente, cuando hay un desorden sustancial en las nanoestructuras. Otro problema importante tanto teórico como experimental es aclarar y estudiar las longitudes características que controlan la física y comparar ésta con las longitudes características del desorden que está siempre presente. Obviamente el estudio de diferentes geometrías va a ser un área muy fructífera. En particular, la creación de un sólido tridimensional a partir de nanoestructuras es un área que vale la pena investigar y que está completamente abierta por el momento.

Claramente, empujando el estudio de estructuras nanométricas, en diferentes geometrías, en proximidad, etc va a producir mucha ciencia y va a dar luz a nuevas e inesperadas tecnologías en el futuro. Este campo ilustra muy claramente que la investigación básica produce resultados interesantes y útiles, pero sin la posibilidad de predecir a priori donde buscar estos resultados. Como muy bien lo dijo Machado "caminante no hay camino, se hace camino al andar" [34].

Agradecimientos

Agradecemos nuestros colaboradores, a lo largo de muchos años, mencionados en las referencias. Este trabajo no se hubiera realizado sin el apoyo económico de NSF, DOE, ONR, AFOSR, NATO, la Fundación del Amo y la Universidad de California. Gracias a M. Kiwi y R. Ramírez por leer críticamente este manuscrito.

Referencias

[1] S. Ramón y Cajal, Advice for a young investigator. MIT Press, Cambridge (1999) pág. 146.
[2] Véase, por ejemplo, A. Hernando and J.M. Rojo, Física de los Materiales Magnéticos. Editorial Síntesis, Madrid (2001) Cap. 7.
[3] Y. Otani, B. Pannetier, J.P. Nozières y D. Givord, J. Mag. Mag. Mat. 126, 622 (1993).
[4] J.I. Martín, M. Vélez, J. Nogués e Ivan K. Schuller, *Revista Española de Física* **12**, 21 (1998).
[5] J. Nogués e Ivan K. Schuller, *J. Mag. Mag. Mat.* **192**, 203 (1999).
[6] Ivan K. Schuller, J. Guimpel e Y. Bruynseraede, *Mat. Res. Soc. Bull.* XV-2, 29 (1990).
[7] Ivan K. Schuller, S. Kim y C. Leighton, *J. Mag. Mag. Mat.* **200**, 571 (1999).
[8] J. Santamaría, J.L. Vicent e Ivan K. Schuller, *Revista Española de Física* **16**, 12 (2002).
[9] M.C. Cyrille, S. Kim, M.E. Gómez, J. Santamaría, K.K. Krishnan e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 62**, 3361 (2000).
[10] A. Hoffmann, P. Prieto e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 61**, 6958 (2000).
[11] S.O. Demokritov, B. Hillebrands y A.N. Slavin, *Phys. Rep.* **348**, 441 (2001).
[12] T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto y T. Ono, *Science* **289**, 930 (2000).
[13] A. Gilabert, *Ann. Phys.* **2**, 203 (1977).
[14] J.J. Åkerman, I. Guedes, C. Leighton, M. Grimsditch e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 65**, 104432 (2002).
[15] M. Kiwi y M.I. Zuckermann, *AIP Conf. Proc.* **18**, 347 (1973).
[16] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich y J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
[17] Ivan K. Schuller y A. Rahman, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 1377 (1983).
[18] Ivan K. Schuller, A. Fartash y M. Grimsditch, *Mat. Res. Soc. Bull.* **XV**, 33 (1990).
[19] J.I. Martín, J. Nogués, K. Liu, J.L. Vicent e Ivan K. Schuller, *J. Mag. Mag. Mat.* (en prensa)
[20] Ivan K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* **44**, 1597 (1980).
[21] K. Liu, J. Nogués, C. Leighton, H. Masuda, K. Nishio, I.V. Roshchin e Ivan K. Schuller, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4434 (2002).
[22] H.M. Rietveld, *J. Appl. Cryst.* **2**, 65 (1969).
[23] M.A. Beno, L. Soderholm, D.W. Capone II, D.G. Hinks, J.D. Jorgensen, Ivan K. Schuller, C.U. Segre, K. Zhang y J.D. Grace, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 57 (1987).
[24] Para obtener una copia gratuita del SUPREX véase http://ischuller.ucsd.edu.
[25] H. Vanderstraeten, D. Neerinck, K. Temst, Y. Bruynseraede, E.E. Fullerton e Ivan K. Schuller, *J. Appl. Cryst.* **24**, 571 (1991).
[26] E.E. Fullerton, Ivan K. Schuller, H. Vanderstraeten e Y. Bruynseraede, *Phys. Rev.* **B 45**, 9292 (1992).
[27] M.-C. Cyrille, S. Kim, M.E. Gómez, J. Santamaría, C. Leighton, K.K. Krishnan e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 62**, 15079 (2001).
[28] M.E. Gómez, *Tesis Doctoral*, Universidad del Valle. Cali, Colombia (2001).
[29] J. Nogués, D. Lederman e Ivan K. Schuller, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3186 (1996).
[30] J. Santamaría, M.E. Gómez, J.L. Vicent, K.K. Krishnan e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 190601 (2002).
[31] J.M. Gallego, D. Lederman, S. Kim e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4515 (1995).
[32] Para un primer informe en Cu/Ni véase W.-S. Zhou, H.K. Wong, J.R. Owers-Bradley y W.P. Halperin, *Physica* **B 108**, 953 (1981).
[33] En Fe/Cr, P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M.B. Brodsky y H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
[34] En Co/Cu, A. Cebollada, J.L. Martínez, J.M. Gallego, J.J. de Miguel, R. Miranda, S. Ferrer, F. Batallan, G. Fillion y J.P. Rebouillat, *Phys. Rev.* **B 39**, 9726 (1989).
[35] J.I. Martín, M. Vélez, J. Nogués, A. Hoffmann, Y. Jaccard e Ivan K. Schuller, *J. Mag. Mag. Mat.* **177-181**, 915 (1998).
[36] O.M. Stoll, M.I. Montero, J. Guimpel, J.J. Åkerman e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 65**, 104518 (2002).
[37] J.I. Martín, M. Vélez, J. Nogués e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev. Lett. 79*, 1929 (1997).
[38] J. Santamaría, M.E. Gómez, M.-C. Cyrille, C. Leighton, K.K. Krishnan e Ivan K. Schuller, *Phys. Rev.* **B 65**, 012412 (2002).
[39] A. Machado, Campos de Castilla. *Ediciones Cátedra*, Madrid (1989).

M.I. Montero e Iván K. Schuller
están en el Dpto. de Física. Universidad de California. San Diego