

Electrónica del espín (espintrónica)

Laura Steren

Instituto Balseiro y Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica

Integrar el magnetismo en los dispositivos electrónicos conocidos es uno de los grandes desafíos que existen en el área de la nanociencia y nanotecnología. Hablamos de la magnetoelectrónica, también llamada espintrónica (término que hace alusión al espín, una suerte de movimiento intrínseco de rotación del electrón; ver 'Espín de los portadores de carga' figura I). Hoy en día se están haciendo esfuerzos importantes para estudiar estructuras híbridas que combinen semiconductores con materiales magnéticos. El motivo central es sencillo. El magnetismo ha desempeñado un papel fundamental en el almacenamiento de información desde la construcción de las primeras computadoras, y se anticipan aumentos dramáticos de la capacidad de almacenamiento con estas técnicas.

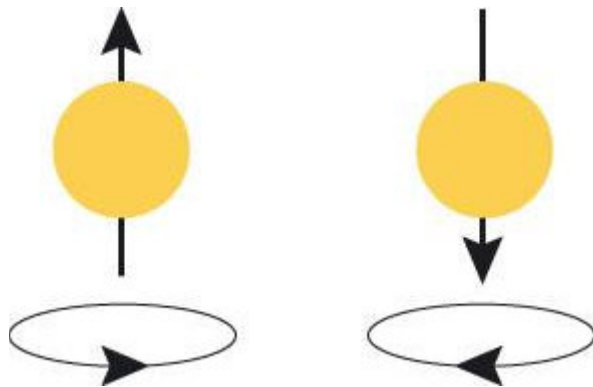


Figura I. Espín de los portadores de carga. Además de su masa y carga eléctrica los electrones tienen una cantidad intrínseca de momento angular, denominado el espín. Es como si fueran pelotitas cargadas que rotan sobre su eje. Podrían hacerlo de este a oeste y de oeste a este (a estas dos direcciones se les asigna por convención \uparrow y \downarrow respectivamente). En presencia de un campo magnético H , los electrones con espín \uparrow tienen distinta energía que los que tienen espín \downarrow , respecto de la orientación de H . En un circuito eléctrico ordinario, los espines de los electrones están orientados al azar y no poseen ningún efecto sobre la corriente. En los dispositivos espintrónicos, en cambio, se crean corrientes polarizadas en espín, donde ahora sí el espín controla el transporte (filtrando corriente, haciendo de llave si-no, etc).

La investigación de fenómenos de transporte eléctrico afectado por el magnetismo de materiales se remonta a los años 70. En general, los metales comunes tienen la misma cantidad de electrones con espín 'arriba' que con espín 'abajo' \downarrow y esta propiedad no afecta la corriente eléctrica (ver 'Resistencia eléctrica', figura II) que pueda fluir por ellos. En cambio, en los materiales ferromagnéticos que poseen una magnetización neta, los electrones que fluyen a través de ellos tienen una resistencia diferente a moverse si su espín apunta para arriba que la que encuentran si lo hacen para abajo. El avance impresionante de técnicas de preparación de muestras llevado a cabo en los 80, abrió las puertas al estudio de estos fenómenos en materiales nanoestructurados y al descubrimiento de nuevos efectos. A fines de los años 80, el grupo de Albert Fert, de la Universidad Paris-Sud, Francia, en colaboración con investigadores de la empresa Thales (entonces Thomson LCR), descubrieron un efecto nuevo al que

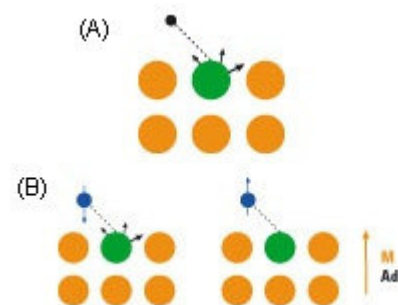


Figura II.

A) La resistencia eléctrica de un metal se origina en los numerosos choques que sufren los electrones que participan en la corriente, al circular por el material (con

denominaron 'magnetorresistencia gigante' (MRG) en estructuras de multicapas ferromagneto-metal (ver 'Multicapas', figura III). Se llama magnetorresistencia a la variación de resistencia eléctrica, R , de un material cuando está en presencia de un campo magnético, H . ¿Por qué 'gigante'? Porque mientras hasta ese momento los efectos magnetorresistivos medidos en materiales no superaban el 6%, en las nuevas estructuras artificiales se reportaban efectos de más del 100% (ver 'Magnetorresistencia gigante', figura IV).

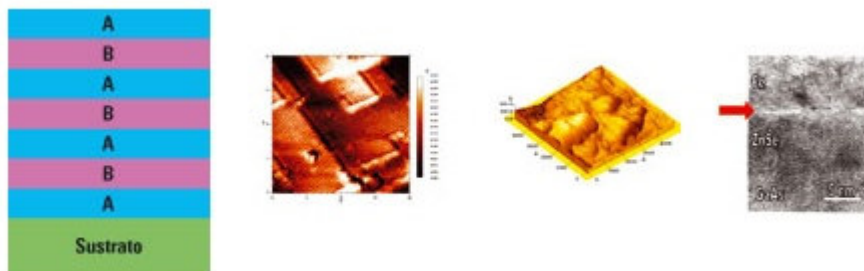


Figura III. Multicapas. A y B son películas delgadas de algunas capas atómicas que se alternan en una secuencia A/B repetida decenas de veces para formar una multicapa. En las multicapas metálicas se combinan capas A ferromagnéticas, formadas, por ej. por cobalto, hierro o níquel, con capas B de metales tipo plata, oro, cobre. En el mejor de los casos la rugosidad consiste en un desnivel de una capa atómica, como se ve en la capa de hierro (figura a). Si no se ven lomas y valles de tamaños variables, en el caso de la muestra de la figura b de decenas de nanómetros de altura y tamaños característicos de miles de nanómetros. La frontera entre A y B se denomina interfaz y tiene cierta rugosidad; es decir el cambio de materiales no se da de manera abrupta.

impurezas, átomos vibrando por efectos de temperatura, etc.).

B) En un ferromagneto, los choques también dependen de la dirección del espín del electrón respecto de la magnetización neta del material.

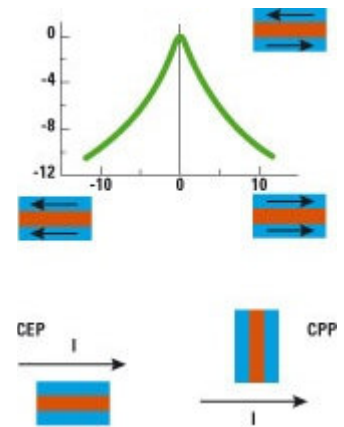


Figura IV. Magnetorresistencia gigante es la inesperada variación de la resistencia eléctrica, R , de un material cuando está en presencia de un campo magnético, H . ¿Por qué 'gigante'? Porque mientras hasta ese momento los efectos magnetorresistivos medidos en materiales no superaban el 6%, en las nuevas estructuras artificiales se reportaban efectos de más del 100%.

Desde entonces se ha trabajado intensamente para comprender este efecto diseñando y fabricando sistemas modelos. Se lo atribuye principalmente al hecho de que los choques de los electrones –portadores de carga– contra las interfaces ferromagneto-metal y en el interior de las capas ferromagnéticas dependen de la dirección relativa del espín de los electrones y el de la magnetización de las capas. Estos mecanismos que y se habían observado en materiales macizos mostraban ahora, en las estructuras artificiales, una respuesta controlada y aumentada. Es que el efecto más importante proviene de las interfaces (figura V). La mayor parte de las experiencias fueron realizadas con la corriente eléctrica fluyendo en el plano de las capas de la estructura (CEP). La medición del efecto MRG con la corriente aplicada en la dirección perpendicular al plano de las muestras (CPP) conlleva una complicación técnica suplementaria puesto que el efecto a observar sería muy pequeño respecto a la resistencia de los contactos del dispositivo. Para resolver este problema se han fabricado multicapas pilares de secciones micrométricas, de manera de aumentar notablemente la resistencia de la estructura (disminuyendo la sección atravesada por la corriente eléctrica). Las así llamadas 'válvulas de espín' son dispositivos que funcionan a MRG, y que se emplean como cabezales lectores en los discos rígidos de las actuales computadoras de escritorio y portátiles.

Más tarde se ideó la juntura túnel (JT), reemplazando el metal no magnético con un aislador (ver la figura V). Las JT están constituidas de dos capas ferromagnéticas o electrodos, separados por una barrera aisladora. En la JT los electrones se encuentran con una barrera muy alta (el aislador) que dificulta su paso de un lado hacia el otro de la misma o sea de un ferromagneto al otro. Solo algunos electrones logran pasar a través de la barrera, por efecto túnel cuántico, cuando la magnetización de los dos ferromagnetos están alineadas; este estado es de baja resistencia eléctrica. En cambio, cuando las magnetizaciones de ambas capas están orientadas de manera opuesta, la corriente es prácticamente nula definiendo un estado de alta resistencia eléctrica. Se dice que la corriente eléctrica neta que atraviesa la barrera aisladora está polarizada en espín. Los resultados muestran la existencia de dos estados resistivos claramente distinguibles, alta-baja, que puede asociarse a estados SI-NO. Esta propiedad hace de estos materiales sistemas de alto interés tecnológico. Se prevé la aplicación de conjuntos de junturas como memorias MRAM, por ejemplo. El magnetismo de los electrones del metal que se utiliza como electrodo, así como las características de las interfaces entre el metal y el aislador definen principalmente la importancia del efecto.

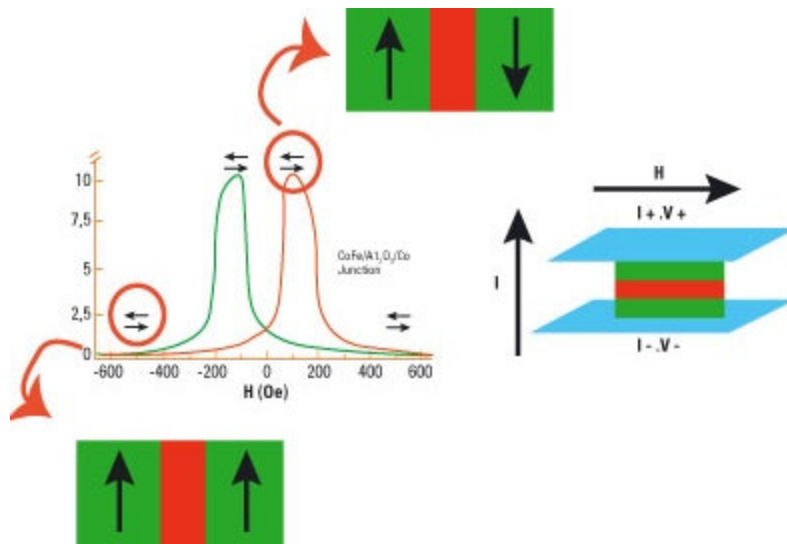


Figura V. Medida de magnetorresistencia en función de campo magnético realizada en una juntura túnel, cuyo esquema se muestra a la derecha.

Actualmente se trata de integrar en estas estructuras mixtas, semiconductores con materiales magnéticos. Los semiconductores son los materiales que la electrónica utiliza en dispositivos que controlan desde equipos médicos y nuestro televisor hasta la calculadora de bolsillo. La inserción del espín en transistores y otros dispositivos le agrega una variable más al problema e incorpora nuevas posibilidades todavía no implementadas prácticamente pero ya presentes en la mente de científicos y tecnólogos. La generación de flujos de corrientes polarizadas en espín de forma controlada y la manipulación del espín en forma más general, permitirían no solamente incursionar en tecnología sino construir herramientas para explorar propiedades físicas fundamentales. Las fuentes de corrientes polarizadas en espín pueden provenir de dispositivos de transporte eléctrico u ópticos. Hay materiales que intrínsecamente aportan al transporte electrones con una determinada polarización en espín. En general, los metales ferromagnéticos contribuyen al transporte con un número de electrones con espín \uparrow distinto al número de electrones con espín \downarrow . Estos últimos materiales son los óptimos para utilizar como electrodos en junturas túnel y otros dispositivos magnetorresistivos.

Una vez generadas las corrientes polarizadas en espín (CPS), se necesita inyectarlas en otros materiales y detectarlas. ¿Cómo se logra esto? La inyección de una CPS se logra, por ejemplo, poniendo en contacto un metal ferromagnético con un metal o semiconductor. En la interfaz se produce una 'acumulación de espín', originada en el cambio de naturaleza de los materiales a un lado y al otro de la misma. La polarización en espín de la corriente se va atenuando dentro del material no-magnético por sucesivos choques que hacen perder a los electrones la memoria sobre su espín. Si la polarización de la corriente persiste hasta encontrar otra capa magnética, en la interfaz opuesta de un dispositivo, podrá transmitir esta información y ser detectada a través de medidas eléctricas. La polarización de la corriente en una región no-magnética es el parámetro típicamente utilizado para describir la eficiencia de la inyección electrónica de espín. Se han propuesto dispositivos ópticos y resistivos para medir la existencia de esta polarización. Las válvulas de espín MRG y las junturas túnel, descritas más arriba, son algunos ejemplos de los dispositivos de transporte.

Para integrar semiconductores y materiales magnéticos, a nivel experimental, hay todavía problemas prácticos que deben ser resueltos:

¿Cómo hacer crecer estructuras ferromagneto/semiconductor sin mezclar los distintos materiales? En la mayoría de los casos, los semiconductores, desde el silicio hasta el arseniuro de galio, forman numerosas aleaciones con los metales magnéticos utilizados habitualmente en las nanoestructuras (hierro, cobalto o níquel). Es por ende difícil hacer crecer multicapas con interfaces definidas. Además, la gran diferencia de impedancias (resistencia al paso de la corriente) entre ambos componentes hace que el efecto de polarización de espín de la corriente sea bajo.

¿Y si se utilizan semiconductores magnéticos en lugar de los ferromagnetos metálicos? Esto serviría para mejorar la calidad de estas estructuras y disminuir el contraste entre las impedancias de los dos materiales. Se está realizando un importante esfuerzo en buscar materiales que tengan estas características y otra fundamental para las aplicaciones: que trabajen a temperatura ambiente.

Quedan otros aspectos a resolver de aquí a los próximos años, entre otros: ¿cómo lograr que la corriente eléctrica recuerde la información magnética a lo largo del dispositivo? Se deben diseñar nuevos dispositivos, eléctricos, ópticos y otros, para medir la polarización en espín de las corrientes eléctricas; también debe medirse la acumulación de espín en las interfaces ferromagneto/ semiconductor.

Como se ve, ha habido en los últimos años un avance notable en el diseño y fabricación de nanoestructuras artificiales. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas de grabado de motivos micrométricos y submicrométricos. El área conocida como ingeniería de materiales permite hoy en día elaborar dispositivos para explorar fenómenos específicos, implementar con nanoestructuras aplicaciones tecnológicas novedosas, comprobar efectos previstos por la mecánica cuántica hace más de ochenta años, plasmar imaginados efectos en experiencias concretas y, finalmente, dar la posibilidad de ¡crear nueva física!



Laura Steren

Doctora en Física, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo.
Profesora Adjunta, Instituto Balseiro. Investigadora Independiente,
CONICET. steren@cab.cnea.gov.ar
www.cab.cnea.gov.ar

Lecturas sugeridas

AWSCHALOM DD, FLATTÉ ME AND SAMARTH N, 'Spintronics', Scientific American, Jun. 2002.

BARTHÉLÉMY A, FERT A, MOREL R, STEREN L, 'Giant steps with tiny magnets', Physics World, Nov. 1994.

HAGELE D, OESTREICH M, 'Magnetoelectronics enhance memory', Physics World, Dic. 2003.

'Magnetoelectronics', Physics Today, Abr. 1995, número especial.

<http://www.almaden.ibm.com/st/magnetism/ms/>