



ESPINTRÓNICA: EL CAMINO A LA MINIATURIZACIÓN DE DISPOSITIVOS GENERA DESAFÍOS EN LA FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

**SPINTRONICS: THE PATH TO MINIATURIZATION OF DEVICES
CREATES CHALLENGES IN CONDENSED MATTER PHYSICS**

*Gabriel Fonseca**

Recepción 05/07/2011
Evaluación 12/09/2011
Aprobado 12/10/2011

Resumen

La gran velocidad con que se vienen desarrollando los avances tecnológicos basados en descubrimientos científicos, ha permitido un nivel muy alto de almacenamiento y procesamiento de información en dispositivos que, cada vez, presentan menor tamaño. Sin embargo, esta carrera de miniaturización encuentra varios límites al llegar a la escala nanométrica, ya que la microelectrónica aún se basa en la manipulación de la carga electrónica. Estos límites, al contrario de lo que intuitivamente se pensaría, son ventajas para el mundo científico y abren caminos a descubrimientos y avances en la

* Doctor Departamento de física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco 50670-901, Brasil. E-mail: blacksax18@gmail.com



física teórica y experimental de la materia condensada. En este artículo se presenta una revisión de la nueva perspectiva que brinda la espintrónica, la cual propone un nuevo tratamiento de la información, basado en una propiedad mecanocuántica del electrón: su espín y el correspondiente momento magnético de espín.

Palabras clave: Espintrónica, corrientes de espín, magnetorresistencia gigante.

Abstract

The high speed with which the technological advances based on scientific discoveries have been developed, has allowed a very high level of storage and information processing in devices which, increasingly, are smaller. However, this miniaturization race finds several limits when it comes to the nanometer scale, as microelectronics is still based on the manipulation of electronic charge. These limits, contrary to what we intuitively think, are advantages for the scientific world and provide a path to discoveries and advances in theoretical and experimental physics of condensed matter. This article presents a review of the new perspective provided by spintronics, which proposes a new information processing based on a quantum mechanical of the electron: its spin and the corresponding spin magnetic moment.

Keywords: *Spintronics, spin currents, giant magnetoresistance.*



Introducción

Desde el nacimiento de la electrónica con la invención del diodo de vacío por parte de John Ambrose Fleming en 1904, y hasta la década del setenta del siglo pasado (Gref, 2010), los dispositivos se basaron en el transporte de energía e información por parte de los electrones, mediante la manipulación de niveles de voltaje, carga y corriente e ignorando por completo una propiedad intrínseca del electrón, llamada espín, ya que al encontrarse orientado aleatoriamente en los dispositivos convencionales, el bajo efecto sobre las propiedades físicas del material hace que su importancia sea apantallada, de modo que el efecto neto es nulo.

En este camino, la miniaturización dio un gran salto con la aparición de los dispositivos semiconductores, especialmente del transistor en 1948 (Okamura, 1995). A partir de allí se desarrollaron circuitos integrados en chips semiconductores, duplicando el número de transistores y resistencias por unidad de área cada 12-18 meses (tendencia predicha por Gordon E. Moore el 19 de abril de 1965). En los últimos años esta integración se ha aproximado al orden de los nanómetros; sin embargo, un transistor convencional no puede ser más pequeño que un átomo, lo que da un límite natural a la industria electrónica, además de las dificultades que introduce el efecto Joule al generar un calor intenso en los dispositivos, que afecta su estabilidad estructural y dificulta el control de las propiedades electrónicas (Shen, 2008).

Estos hechos hacen necesario un cambio de perspectiva, una nueva forma de generar, almacenar y procesar información. Para ello se retorna a una propiedad descubierta desde el planteamiento de la mecánica cuántica relativista por parte de Paul A. M. Dirac, según la cual, el electrón posee un momento angular intrínseco llamado espín, que está cuantizado y tiene asociado un momento magnético de espín (Stern & Gerlach, 1922). Si se basa el transporte de energía e información en esta propiedad, se obtiene lo que se ha llamado espintrónica o magnetoelectrónica.

Magnetorresistencia gigante (GMR)

El surgimiento de la espintrónica se remonta a los trabajos realizados por Johnson y Silsbee (1985), quienes demuestran experimentalmente por primera vez, el acoplamiento entre transporte de carga y de espín en la interfaz entre un material ferromagnético y un metal paramagnético, logrando la inyección y direccionamiento de espín o magnetización en este último. Estos autores se basan en un método conceptualmente descrito por Aronov (1976), donde una corriente con una única polarización de espín es emitida desde un ferromagneto hacia un paramagneto, debido a que la superficie de Fermi en la estructura de bandas del ferromagneto está limitando totalmente una banda de dicho tipo de espín, permitiendo así inyectar una magnetización en el metal, proporcional a la corriente eléctrica I_e . Aunque, en la práctica, la superficie de Fermi contiene bandas de ambos tipos de espín, lo que ocasiona que se vea reducida la eficiencia η de la magnetización. Así, la corriente de magnetización está dada por:

$$I_m = \frac{\eta \beta I_e}{e} \quad (1)$$

Donde β es el magnetón de Bohr. Aunque Meservey, Paraskevopoulos y Tedrow (1976) ya habían hecho un experimento mediante tunelamiento en junturas tipo túnel entre una película superconductora, una barrera de óxido y un metal ferromagnético, con eficiencias entre 0,1 y 0,5, estas son demasiado grandes comparadas con las encontradas por Johnson y Silsbee con valores de $\eta = 0,060 \pm 0,008$ y $\eta = 0,081 \mp 0,010$. Por su parte, Grünberg, Schreiber, Pang, Brodsky y Sowers (1986) observan por primera vez el acoplamiento antiferromagnético entre láminas de Fe, separadas por láminas no magnéticas de Cr, y tomando como referencia interláminas de Au.

Estos trabajos sentaron las bases para el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (GMR) que fue efectuado simultáneamente por los grupos de investigación de Grünberg (según se cita en Baibich *et al.*, 1988) y de Fert (según se cita en



Binasch *et al.*, 1989), mereciéndoles en el año 2007 el Premio Nobel de Física. La magnetorresistencia (MR) es el cambio en la resistencia de un conductor cuando este es sometido a un campo magnético externo. En el caso de los ferromagnetos, dicho efecto también depende de la dirección del campo externo relativa a la dirección de la corriente, en este evento se denomina magnetorresistencia anisotrópica (Thomson, 1856). Tal efecto se debe al acoplamiento espín-órbita del electrón. Los cambios de resistencia generalmente son muy pequeños, sin embargo, han permitido avances tecnológicos importantes, sobre todo en el desarrollo de las cabezas lectoras para discos magnéticos, trabajando como sensores de campo, resaltando el permalloy $Fe_{20}Ni_{80}$.

Alrededor de 1980 se llega al consenso general de que no es posible mejorar los sensores magnéticos basados en la MR; no obstante, en los trabajos independientes de Grünberg (según se cita en Baibich *et al.*, 1988) y Fert (según se cita en Binasch *et al.*, 1989), se encuentra que al intercalar láminas ferromagnéticas con láminas no magnéticas de tamaño nanométrico, se obtienen grandes valores de magnetorresistencia. El primer grupo estudió un sistema trilaminar Fe/Cr/Fe a temperatura ambiente, mientras que el segundo se basó en multiláminas $(Fe/Cr)_n$, donde n es el número de láminas, y puede llegar a 60, a una temperatura de 4,2 K, logrando un decrecimiento de casi 50% en la resistencia. Estos resultados influenciaron las técnicas de almacenamiento de información; los sensores magnéticos y las investigaciones en magnetismo en películas delgadas se intensificaron enfocándose en el logro de progresos en magnetoelectrónica.

Efecto Hall de Espín (SHE)

Hall (1879) descubre el efecto que hoy lleva su nombre, utilizando una hoja de Au de aproximadamente 2cm de espesor y ca. 9cm de largo, montada sobre una placa de vidrio, con contactos de latón pulido en los extremos del Au, obteniendo una superficie efectiva de 5,5cm con resistencia de 2 Ω .

Perpendicular a esta se sitúa un galvanómetro de Thomson y, finalmente, el sistema se ubica sobre uno de los polos de un imán. Al dejar pasar la corriente a través de los electrodos de latón, los resultados experimentales en el galvanómetro son proporcionales al producto de la fuerza magnética por la corriente que atraviesa la lámina de Au. Así, el efecto Hall (HE) consiste en la aparición de un voltaje en un conductor, siendo perpendicular a la corriente eléctrica que lo atraviesa y al campo magnético externo aplicado.

Casi un siglo después, Dyakonov y Perel (1971) predicen teóricamente que un efecto similar al descubierto por Hall puede hallarse en semiconductores, se trata del denominado efecto Hall de espín (SHE), según el cual, una corriente eléctrica en un semiconductor está acompañada por un flujo de espín perpendicular a la corriente y dirigido desde el interior de la muestra hacia la superficie, lo que provoca acumulaciones de espín de orientaciones opuestas en lados opuestos de la muestra, todo debido a la dispersión de electrones por el acoplamiento espín-órbita. Al contrario del EH, el SHE no necesita un campo externo, de hecho, dicho campo anularía el SHE al generar precesiones del espín, quedando los electrones en la muestra con orientaciones aleatorias. Casi tres décadas después, Hirsch (1999) redescubre teóricamente estos resultados, enfocándose esta vez en el caso de metales paramagnéticos. Propone la aparición de un desequilibrio de espín transversal a una corriente de carga aplicada en un paramagneto, lo que genera un “voltaje Hall de espín”; asimismo plantea que la circulación de una corriente de espín genera un desequilibrio eléctrico que se traduce en un voltaje Hall electrónico, sin necesidad de una corriente de carga o un campo magnético externo, llamándose en este caso, efecto Hall de espín inverso (ISHE).

Las primeras observaciones experimentales del SHE en semiconductores, fueron realizadas por Kato, Myers, Gossard & Awschalom (2004) en el régimen débil del acoplamiento espín-órbita, por medio de un microscopio de efecto Kerr, en muestras de GaAs e InGaAs. En el caso de la muestra de InGaAs, las tensiones anisotrópicas internas sobre la acumulación de



espín con un valor nulo del campo magnético externo, son causadas por distorsiones de red en el proceso de crecimiento de los cristales y generan precesiones de espín en el proceso de inyección. Este efecto es originado por un campo magnético interno B_{int} perpendicular a la dirección de crecimiento del cristal y al campo eléctrico. Una posible explicación para tal comportamiento, es que la tensión induzca desdoblamiento de los términos de espín en el Hamiltoniano, lo que genera el efecto Hall de espín intrínseco (Bernevig & Zhang, 2005). Las observaciones muestran la posibilidad de manipular el espín del electrón en semiconductores no magnéticos sin recurrir a campos magnéticos externos; además, la supresión de la acumulación de espín por parte de B_{int} , posibilita el control del nivel de acumulación de espín por medio del voltaje.

Por su parte, Wunderlich, Kaestner, Sinova & Jungwirth (2005) encuentran evidencias del SHE en el régimen fuerte del acoplamiento espín-órbita en un sistema bidimensional de cavidades con acoplamiento espín-orbita. Cuando un campo eléctrico es aplicado mediante el sistema, se detecta una componente no nula del momento angular, cuyo signo depende de la dirección del campo eléctrico y es opuesto para ambos lados de la película. Para fundamentar este experimento, se hicieron cálculos de transporte cuántico. Vale anotar que este experimento adquirió singular importancia, porque el nuevo diseño planar permite la fabricación de microdispositivos más complejos que integran en un solo chip semiconductor la inducción y detección de polarización de espín.

Corrientes de espín

En el estudio de la espintrónica es importante entender lo que se conoce como corriente de espín J_{σ} . En teoría de muchos cuerpos, el hamiltoniano para el sistema está dado por:

$$H = \sum_{i,\sigma} \frac{1}{2m} \left(P_i - \frac{e}{c} A_{\sigma} \right)^2 + \sum_{i \neq j} V_{i,j}, \quad (2)$$

Donde el primer término corresponde a la energía cinética de la i -ésimo electrón de espín σ y el segundo a la interacción



de cada electrón i con los otros j o con el entorno, así los operadores de velocidad de los electrones son:

$$v_{\sigma} = \frac{1}{m} \sum_i \left(p_i - \frac{e}{c} A_{\sigma} \right) = -\frac{e}{c} \frac{\partial H}{\partial A_{\sigma}}, \quad (3)$$

donde $\sigma = \uparrow, \downarrow$, corresponden a las posibles orientaciones de espín. Debe notarse que el potencial vector A_{σ} se introdujo con dependencia del espín. Obteniendo los autovalores del sistema $E(A_{\uparrow}, A_{\downarrow})$, de modo que la corriente electrónica es calculada por medio de:

$$j_e = -e(v_{\uparrow} + v_{\downarrow}) = -e \left(\frac{\partial E}{\partial A_{\uparrow}} - \frac{\partial E}{\partial A_{\downarrow}} \right), \quad (4)$$

sin embargo, para un campo electromagnético, A_{σ} es independiente del espín y así j_e también lo es, de modo que no se tiene transporte de espín en situaciones convencionales, ya que $v_{\uparrow} = v_{\downarrow}$, lo que significa que igual número de electrones con cada tipo de espín se mueven en la misma dirección y, por tanto, se cancelan sus efectos. No obstante, si las velocidades para cada tipo de espín son diferentes, por ejemplo $v_{\uparrow} = -v_{\downarrow}$, entonces se obtiene un transporte efectivo de espín, aun cuando para este caso particular no haya transporte neto de carga eléctrica, dando como resultado una corriente pura de espín. Para dar una idea con fines didácticos, puede imaginarse un 50 % de electrones moviéndose hacia la derecha con $\sigma = \uparrow$ y el otro 50% moviéndose hacia la izquierda con $\sigma = \downarrow$, de modo que $j_e = 0$, pero un análisis cuidadoso muestra que como se invierte el espín y también la dirección del movimiento, el 100% de los electrones contribuyen con momento magnético en la misma dirección, teniendo $j_{\sigma} = \frac{\hbar}{2}(v_{\uparrow} - v_{\downarrow}) = \hbar v_{\uparrow}$ donde $\frac{\hbar}{2}$ es la unidad de espín. Si $v_{\uparrow} \neq \pm v_{\downarrow}$, se presentan valores no nulos para j_e y para j_{σ} , por tanto para tener corriente de espín es importante lograr que A_{σ} sea espín-dependiente. Al hacer las correcciones relativistas al sistema electrón-núcleo, se obtiene el acoplamiento espín-órbita, el cual, a pesar de ser muy pequeño en un átomo, al tener una red tridimensional periódica, como en el caso de un cristal, el efecto es magnificado. Efecto que puede ser observado en la estructura de bandas electrónicas en el espacio vectorial recíproco,



ESPINTRÓNICA: EL CAMINO A LA MINIATURIZACIÓN
DE DISPOSITIVOS GENERA DESAFÍOS EN LA FÍSICA
DE LA MATERIA CONDENSADA

en el caso de que el cristal no posea simetría de inversión. El acoplamiento es proporcional al gap de energía entre las bandas de conducción y de valencia. En estos sistemas, la velocidad de los electrones está dada por:

$$\vec{v} = -\frac{1}{m} \left(\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A}_\sigma \right); \quad \vec{A}_\sigma = \lambda \frac{mc}{e} \hat{z} \times \vec{\sigma} \quad (5)$$

y así el acoplamiento genera un vector potencial espín-dependiente (Shen, 2005).

De modo más general, la corriente de espín es un pseudotensor de orden dos, $J_\sigma^\alpha = \frac{\hbar}{2} \{ \sigma^\alpha, v \}$. Una propiedad interesante es que en una inversión temporal, la corriente eléctrica, la carga y la velocidad también invierten su signo, sin embargo el espín y la corriente de espín, permanecen invariantes, lo que implica que teóricamente J_σ^α es no disipativa o, por lo menos, muy poco disipativa, lo que presenta grandes ventajas. Por otro lado, la desventaja está en que la corriente de espín, a diferencia de la corriente electrónica, no se conserva, presentando distancias de coherencia de tan solo algunos cientos de micrómetros. Esto ofrece posibilidades de investigar materiales con longitud de coherencia súper-larga mayores de 10^{-3}m .

Aspectos importantes para investigar en espintrónica

Shen (2008) plantea los tópicos fundamentales de los desarrollos en espintrónica. Las tres características principales que deben cumplir los modernos dispositivos espintrónicos son:

- Se deben basar en portadores con polarización de espín o en el espín del electrón.
- El espín en movimiento del electrón debe poder transportarse coherentemente y tunelar las interfaces.
- El tiempo de coherencia del espín debe ser lo suficientemente largo para que puedan aplicarse las operaciones informáticas específicas, para las que se diseña el dispositivo.

Por su parte, los tres tópicos básicos de investigación en espintrónica son:

- Inyección de espín: aporta el elemento fundamental a los dispositivos, a través de las corrientes de espín.
- Manipulación de espines: es el punto esencial donde se llevan a cabo las operaciones de manipulación de información a través de campos externos.
- Detección de espines: necesaria para medir las consecuencias de las operaciones efectuadas.

Una consecuencia importante de lograr manipular el espín del electrón, es que al ser este un estado cuántico, es posible, teóricamente, generar infinitas superposiciones de los estados arriba y abajo. Estos estados de superposición se pueden definir sobre una esfera donde cada punto de la superficie representa una configuración particular y por tanto un bit cuántico de información o "Qbit". En esencia, esta es la misma idea que se utiliza en las investigaciones de computación cuántica. Si se piensa en el gran nivel de procesamiento y almacenamiento de información que se tiene actualmente, donde toda la tecnología se ha basado en dos bits 1 y 0, se obtiene una vaga idea de lo que puede lograrse contando con cientos de bits disponibles para cada partícula.

Conclusiones

La espintrónica es un tema actual de altísimo interés en el mundo. Su desarrollo está permitiendo el entendimiento de novedosos fenómenos en materia condensada, aprovechando los avances de los últimos años en producción y caracterización de nanomateriales, y los cálculos teóricos basados en métodos analíticos y computacionales inmersos en aspectos desconocidos de la teoría cuántica. Se tienen perspectivas de aplicación en campos que van desde encriptación de claves hasta computación de alto rendimiento para estudios en nanobiomedicina, que abren así enormes espacios de acción investigativa y laboral, en especial para los físicos; además, se rompen las barreras para la miniaturización.



Lista de referencias

- Aronov, A. G., (1976). *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 24 (37) [JETP Lett. 24 32 1976]
- Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F., Nguyen, Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A. & Chazelas, J. (1988). Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 61(21), 2472-2475. doi: 10.1103/PhysRevLett.61.2472. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.61.2472>
- Bernevig, B. A. & Zhang, S. C. (2005). Spin splitting and spin current in strained bulk semiconductors. *Phys. Rev. B* 72(11), 115204, doi: 10.1103/PhysRevB.72.115204. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.72.115204>
- Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F. & Zinn, W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer Exchange. *Phys. Rev. B.* 39(7), 4828-4830, doi: 10.1103/PhysRevB.39.4828. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.39.4828>
- Dyakonov, M. I. & Perel, V.I. (1971). Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors. *Physics Letters A*, 35(6), 459-460. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375960171901964>
- Gref, L. (2010). *The Rise and Fall of American Technology*. New York: Algora Publishing.
- Grünberg, P., Schreiber, R., Pang, Y., Brodsky, M. B. & Sowers, H. (1986). Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers *Phys. Rev. Lett.* 57 (19), 2442-2445, doi: 10.1103/PhysRevLett.57.2442. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.57.2442>
- Hall, E.H. (1879). On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics* 2, 287-292.
- Hirsch, J. E. (1999). Spin Hall Effect. *Phys. Rev. Lett.* 83, 1834-1837. doi: 10.1103/PhysRevLett.83.1834. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.83.1834>



- Johnson, M. & Silsbee, R. H. (1985). Interfacial charge-spin coupling: Injection and detection of spin magnetization in metals. *Phys. Rev. Lett.* 55 (17), 1790-1793. doi: 10.1103/PhysRevLett.55.1790. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.55.1790>
- Kato, Y. K., Myers, R. C., Gossard, A. C. & Awschalom, D. D. (2004). Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors. *Science* 306, 1910.
- Meservey, R., Paraskevopoulos, D. & Tedrow, P. M. (1976). *Phys. Rev. Lett.* 37, 858.
- Okamura, S. (1994). *History of electron tubes*. IOS Press.
- Shen, S. Q. (2005). Spin Transverse Force on Spin Current in an Electric Field *Phys. Rev. Lett.* 95,187203.
- Shen, S. Q. (2008). Spintronics and spin current. *AAPPS Bulletin*, 18 (5), 29-36.
- Stern, O. & Gerlach, W. (1922). *Zeitschrift f r Physik*, 9(1), 353-355.
- Thomson, W. (1856-1857). On the Electro-Dynamic Qualities of Metals: Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron. *Proceedings of the Royal Society of London*, 8, 546-550.
- Wunderlich, J., Kaestner, B., Sinova, J. & Jungwirth, T. (2005). Experimental Observation of the Spin-Hall Effect in a Two-Dimensional Spin-Orbit Coupled Semiconductor System. *Phys. Rev. Lett.* 94(4) 047204. doi: 10.1103/PhysRevLett.94.047204. Retrieved from: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.94.047204>