

# ESPINTRÓNICA, LA ELECTRONICA DEL ESPÍN

## SPINTRONICS, SPIN ELECTRONICS

Elmer Monteblando<sup>1</sup>, Christian Ortiz Pauyac<sup>2</sup>, Williams Savero<sup>3</sup>, J. Carlos Rojas Sanchez<sup>4</sup>,  
A. Schuhl<sup>5</sup>

### RESUMEN

*En la actualidad el desarrollo de la tecnología nos ha conducido a elaborar dispositivos nanométricos capaces de almacenar y procesar información. Estos dispositivos serían difíciles de imaginar en la electrónica, la cual se basa en la manipulación de la carga eléctrica del electrón. Sin embargo, gracias a los avances en la física teórica y experimental en el campo de la materia condensada, estos dispositivos ya son una realidad, perteneciendo a lo que actualmente se denomina la electrónica del espín o espintrónica, la cual basa su funcionalidad en el control del espín del electrón, una propiedad que sólo puede ser concebida a nivel cuántico. En el presente artículo revisaremos esta nueva perspectiva, describiendo la Magnetorresistencia Gigante y de Efecto Túnel, la transferencia de momento de espín y sus respectivas aplicaciones como son las memorias MRAM, nano-osciladores y válvulas laterales de espín.*

*Palabras clave.- Espintrónica, Magnetorresistencia, GMR, TMR, MRAM, Nano-osciladores, dinámica de magnetización, Efecto Hall de spin, Transferencia de torque de spin.*

### ABSTRACT

*Current technology seeks to develop nanoscale devices capable of storing and processing information. These devices would be difficult to make in the area of electronics, which is based on the manipulation of electric charge. However, thanks to advances in experimental and theoretical physics in the field of condensed matter, these devices are already a reality, belonging to the field of what we now call spintronics, which bases its functionality on the control of the electron's spin, a property that can only be conceived at the quantum level. In this article we review this new perspective, describing giant- and tunneling- magnetoresistance, the spin transfer torque, and their applications such as MRAM memories, nano-oscillators and lateral spin valves.*

*Key words.-Spintronics, Magnetoresistance, GMR, TMR, MRAM, Nano-oscillators, Magnetization dynamics, Spin Hall effect, Spin transfer torque.*

### INTRODUCCION

La espintrónica nace con el desarrollo de la nanotecnología y el estudio del transporte del electrón en sistemas mesoscópicos. Su origen se remonta a 1988, fecha en que Albert Fert y Peter Grünberg demuestran por separado [1], la existencia de un efecto que sería denominado: Magnetoresistencia

Gigante (GMR, por sus siglas en inglés) y por lo cual fueron galardonados con el premio Nobel en física en el año 2007. Para comprender este fenómeno, primero tenemos que entender que la resistencia eléctrica de un material aparece debido a las colisiones (scattering) que experimenta el flujo de electrones (corriente) que lo atraviesa;

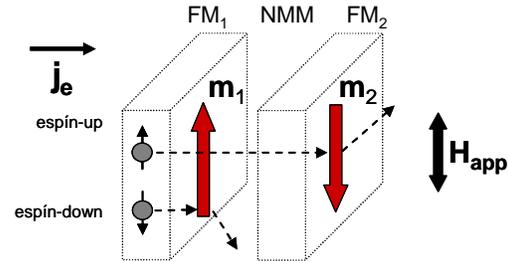
---

<sup>1</sup>MSc. y Lic en Física, SPINTEC, UMR CEA/CNRS/UJF-Grenoble I/Grenoble-INP, INAC, Francia. <sup>2</sup>MSc y Lic. en Física, King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Physical Science and Engineering Division, Saudi Arabia. <sup>3</sup>MSc en Física, NM/SP2M/INAC/CEA/UJF-Grenoble, Francia. <sup>4</sup>PhD en Física, NM/SP2M/INAC/CEA/UJF-Grenoble, Francia, France. <sup>5</sup>Univ. Grenoble, CNRS, Inst. NEEL F38052 Grenoble, France.

tales como las colisiones con impurezas, defectos, fonones, e inclusive otros electrones. Si en este alineado con la dirección de la corriente, la fuerza de Lorentz nos garantiza que electrón de conducción describirá una trayectoria helicoidal, resultando en un incremento en la probabilidad de scattering, por consiguiente, variando la resistencia eléctrica del material. Este fenómeno fue denominado Magnetoresistencia Ordinaria. Fue en 1856 que Thomson (Lord Kelvin) [2] descubrió un nuevo fenómeno, denominado Magnetoresistencia Anisotrópica (AMR, por sus siglas en inglés), al medir la resistencia eléctrica de Fe y Ni en la presencia de un campo magnético. En su informe reportó un incremento en la resistencia de 0.2%, cuando el campo magnético era aplicado longitudinalmente (en la dirección de la corriente) y un decremento de 0.4%, cuando el campo era aplicado en la dirección transversal. Posteriormente, esto fue explicado en términos de la interacción espín-órbita [3], el cual llegó con los avances teóricos en la mecánica cuántica y con los experimentos de la estructura fina [4] y el de Stern-Gerlach [5], demostrando que el electrón poseía un momento magnético ( $\mu_0$ ) cuyo vector buscaría alinearse o anti-alinearse en la dirección del campo magnético aplicado, y un momento angular intrínseco (denominado espín) cuyo vector apuntaría en la dirección opuesta del momento magnético y cuyo estado energético podía tomar únicamente dos valores, bautizados espín-up y espín-down.

Tras el descubrimiento del AMR y su posterior comprensión, la Magnetoresistencia volvió a cobrar importancia, y a pesar de las insignificantes variaciones en la resistencia eléctrica que se manifestaban por aquel entonces, los físicos consideraron factible la posibilidad de alcanzar altas variaciones haciendo uso del concepto del espín. Este gran avance dio luz en 1988, por tal motivo fue acuñado el nombre de "Magnetoresistencia Gigante". El modelo más simple de un sistema GMR, denominado válvula de espín (Spin Valve, SV), está formado por dos capas ferromagnéticas (FM) separadas por una fina barrera (de 1nm) de un material metálico no magnético (non magnetic metal, NMM), i.e. Fe/Cr/Fe, tal como se aprecia en la Fig. 1. La capa FM izquierda ( $FM_1$ ) presenta una magnetización fija, mientras que la orientación de la magnetización en la capa FM derecha ( $FM_2$ ) variará dependiendo de la dirección del campo

sistema incorporamos un campo magnético no magnético externo ( $H_{app}$ ), el cual define dos configuraciones en el sistema.



**Fig. 1** Sistema GMR de tres capas (FM/NMM/FM) en configuración AP.

En la presente convención,  $m_1$  y  $m_2$  representan la orientación del momento angular intrínseco del FM, cuya dirección es opuesta a la del momento magnético.

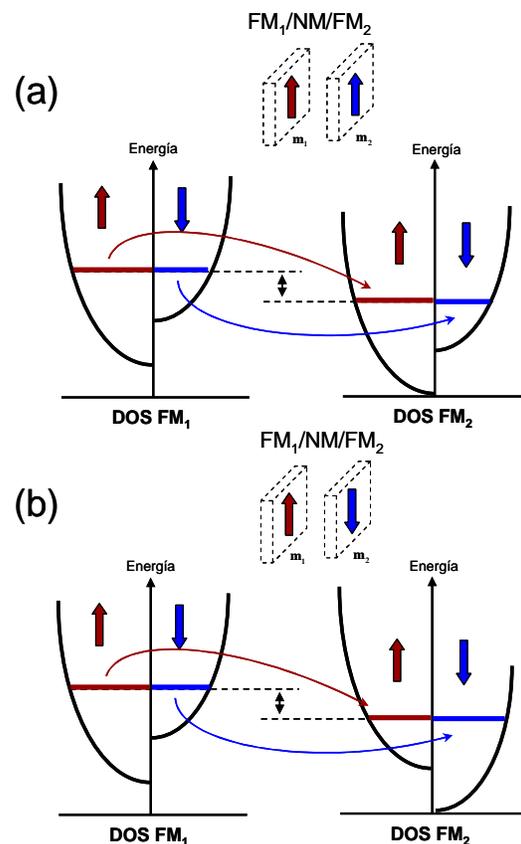
i) La configuración paralela (P), cuando ambas magnetizaciones,  $m_1$  y  $m_2$ , están alineadas y ii) la configuración anti-paralela (AP), cuando están anti-alineadas. Debido a la interacción de intercambio (exchange interaction) que presenta todo material FM, cuando un flujo de electrones ( $j_e$ ) la atraviesa, las bandas de energías para cada tipo de espín (espín-up y espín-down) se separan, es decir cada electrón, dependiendo de su orientación de espín, recorrerá un camino diferente al atravesar el material. Se determina que cuando el espín del electrón está alineado (anti-alineado) en la dirección del momento angular intrínseco del FM, las desviaciones – scattering – serán mínimas (máximas). Como consecuencia, un FM polarizará el flujo de corriente, es decir, el espín de los electrones de conducción al dejar el material, estará orientado mayoritariamente en una dirección. Debido a esto es que en una estructura GMR, el  $FM_1$  es denominado polarizador. En dicha estructura, los electrones inciden por la izquierda. En la configuración P, una dirección de espín no sufrirá scattering al pasar a través del sistema, ocasionando un flujo alto de corriente, mientras que en la configuración AP (mostrada en la Fig. 1) ambas direcciones de espines sufrirán desviaciones, ocasionando un bajo flujo de corriente. Esta variación en resistencia es alta comparada con la magnetoresistencia descrita por Lord Kelvin, permitiendo así el desarrollo de las válvulas de espín, las cuales encontraron

inmediatamente aplicaciones en los cabezales de lectura de discos duros y generaron la masificación de los dispositivos de almacenamiento de información (data storage), así como la reducción de sus dimensiones a escalas nanométricas. Sin embargo, unos años después, un fenómeno más poderoso basado en el efecto túnel fue descubierto, y reemplazó a los dispositivos basados en GMR, provocando el nacimiento de memorias MRAM y dispositivos lógicos magnéticos re-programables. Este fenómeno es denominado Magnetoresistencia de Efecto Túnel.

### Magnetoresistencia de efecto túnel

La comprensión del efecto túnel permitió el descubrimiento de la magnetorresistencia de efecto túnel (Tunnel Magnetoresistance, TMR) en junturas magnéticas (Magnetic Tunnel Junctions, MTJ). El sistema es idéntico al de una estructura GMR, salvo que la barrera es reemplazada por un material aislante no magnético (non magnetic insulator, NMI). Los primeros estudios fueron realizados por Julliere en 1975 [6], pero los resultados fueron obtenidos a bajas temperaturas (4K). Fue en el 2001 que cálculos teóricos y resultados experimentales mostraron que usando Fe como las capas FM y MgO como el NMI se podía ocasionar grandes variaciones en la magnetorresistencia a temperatura ambiente (300K), importante para el desarrollo de dispositivos. En este caso, los electrones pueden ir de la capa FM con magnetización fija a la capa libre por efecto túnel, esto es, la onda del electrón aproximándose por la izquierda se hace evanescente en la barrera aislante y decrece exponencialmente a través de ella. Sin embargo, la barrera, siendo bien delgada permite que la amplitud de la onda evanescente no desaparezca y emerja en la capa derecha para continuar propagándose. El cambio dramático en la corriente túnel está asociada al alineamiento de las magnetizaciones internas de las capas FM donde nuevamente definimos las configuraciones P y AP. Este fenómeno ocurre dada la diferencia electrónica en la densidad de estados (Density of States, DOS) al nivel de Fermi, entre electrones espín-up y espín-down presentes en las capas FM. Como los electrones preservan su orientación de espín durante el proceso de túnel, entonces ellos pueden viajar a la sub-banda de la misma orientación. Cuando el voltaje es aplicado a lo largo de la barrera, los electrones viajarán de

izquierda a derecha, dependiendo de la disponibilidad de estados libres para su orientación de espín. Por lo tanto, si dos FM están paralelos, ver Fig. 2(a), los electrones mayoritarios en uno encontrarán los mismos estados de la misma orientación en el otro, causando una gran corriente de túnel (una disminución en la resistencia total). Sin embargo, si son anti-paralelos, ver Fig. 2(b), ambas direcciones encontrarán dificultades, resultando en una resistencia mayor. Si nos remontamos a la historia, el año 1986, IBM presentó la primera computadora RAMAC, con la cual podríamos escuchar solo unos segundos de música en formato actual mp3, y diez años después, en 1996 los primeros cabezales de lectura (spin valves) basados en la GMR empezaron a comercializarse.



**Fig. 2** Esquema de la densidad de estados en las configuraciones P (a) y AP (b).

El día de hoy podemos transportar gigabytes de información en las pequeñas memorias de puerto USB. Esta comparación nos muestra la evolución en el desarrollo de la tecnología de

almacenamiento de datos. A continuación describiremos el funcionamiento de un dispositivo de almacenamiento de información, una memoria magnética basada en TMR.

### Memorias magnéticas no volátiles (MRAM)

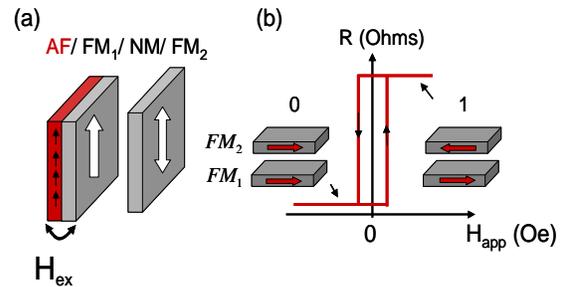
La memoria MRAM (Magnetic Random Access Memory), constituye uno de los más prometedores dispositivos en el camino de crear una memoria universal ya que combina rapidez, bajo consumo de energía, y la no volatilidad, esto quiere decir, que guarda la información así la fuente de energía sea cortada.

La estructura básica de una MRAM se muestra en el diagrama de la Fig. 3(a), la cual es del tipo AF/FM<sub>1</sub>/NM/FM<sub>2</sub>. Está compuesta por dos capas FM, de las cuales la primera (FM<sub>1</sub>), presenta su magnetización fija en una dirección debido a la interacción superficial de contacto con una capa antiferromagnética (AF). El campo que fija la dirección de la magnetización de FM<sub>1</sub> es conocido como el exchange bias field ( $H_b$ ).

Generalmente los materiales AF utilizados son IrMn o PtMn por presentar un alto campo  $H_b$  (500 Oe). La segunda capa ferromagnética, FM<sub>2</sub> es libre de girar hacia la dirección del campo externo aplicado. Estas nuevas memorias MRAMs basan su funcionamiento en la orientación relativa entre las magnetizaciones de las capas FM<sub>1</sub> y FM<sub>2</sub>, las cuales envuelven la barrera aislante en una SV o una MTJ. Esta posición relativa produce un estado de alta resistencia (estado antiparalelo) que puede codificarse como "1" o un estado de baja resistencia (estado paralelo) el cual puede codificarse como "0".

La amplitud de la TMR es un parámetro crítico, muy importante en estos dispositivos, es decir, cuanto mayor sea su magnitud, mejor será la visibilidad del estado 1 o 0 y evitará errores al momento de leer la información. Por otro lado, el campo magnético aplicado para lograr el salto de entre estos dos estados es conocido como el campo de escritura o switching, y se caracteriza por ser pequeño (del orden de la decena de Oe). El material magnético utilizado comúnmente como capa FM<sub>2</sub> se conoce como permalloy (Py), es una aleación de Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>. Buscando favorecer el salto de estado magnético (P hacia AP o viceversa), se construyen estructuras elípticas, pues la forma de

la estructura magnética genera un eje de fácil magnetización, (un eje donde la magnetización puede posicionarse con un costo muy bajo de energía), esto favorece a una escritura directa hacia el estado correcto sin perturbaciones o estados intermedios.



**Fig. 3** (a) Estructura de la SV o MTJ, compuesta por dos capas FM, separadas por una película NM. En (b), la curva resistencia versus campo magnético aplicado de la estructura, presenta los dos estados magnéticos, de alta (1) y baja resistencia (0).

En la Fig. 3(b) se presenta la curva resistencia versus campo magnético aplicado. Se puede observar los dos estados de resistencia (P y AP) los cuales permiten caracterizar la calidad del dispositivo mediante su TMR,

$$(TMR = (\Delta R_{AP-P} / R_P) \times 100\%).$$

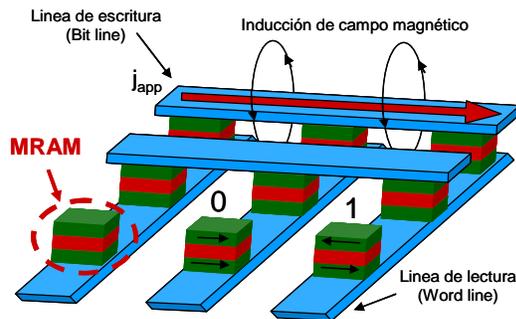
La evolución de las tecnologías de nanofabricación ha permitido el desarrollo de celdas de memorias MRAM, siendo un arreglo de conductores paralelos colocados en dos niveles perpendiculares entre sí, ver Fig. 4.

En los cruces de estos conductores se encuentran las MRAMs encargadas de guardar su estado magnético como información, llamado bit.

La estructura en forma de red con intersecciones favorece la selectividad de los bits, dado que a través de estas líneas conductoras, se hace transitar corriente eléctrica (bit line) para la inducción de campos magnéticos.

Estos campos de inducción magnética serán los responsables del cambio del estado 1 o 0, por lo tanto deben ser mayores que el campo de switching. De esta manera se guarda (escribe) la

información en el bit correspondiente. Para leer el estado magnético del bit, es necesario aplicar un voltaje entre las líneas (bit- y word- line) para medir su resistencia.



**Fig. 4** Celda básica de memorias MRAM.

La corriente aplicada  $j_{app}$ , a través de la línea de escritura genera un campo de inducción magnética responsable del cambio de estado paralelo "0" o antiparalelo "1" en la memoria MRAM. Para leer el bit es necesario aplicar un voltaje entre las líneas y medir la resistencia de la MRAM.

Lamentablemente esta celda de MRAMs produjo muchos problemas de grabación, dado que la capa FM libre cambia de estado con campos magnéticos parásitos o por agitaciones térmicas, es por ello que desde el 2006 una nueva versión de estructura MRAM fue propuesta, llamada "Toggle MRAM", donde se propuso la utilización de una película sintética ferrimagnética, (synthetic ferrimagnet, SyF) en remplazo de la película  $FM_2$ . Una Toggle-MRAM tiene la estructura  $FM_1/NMI/SyF$ , donde el SyF tiene una estructura  $FM_2/Ru/FM_3$ . Las capas  $FM_2$  y  $FM_3$  están acopladas antiferromagnéticamente por la acción de intercambio llamada RKKY [7], permitiendo que la configuración magnética del SyF, P o AP, dependa del espesor de la capa NMM, en este caso Ru.

El espesor se define en la fabricación del dispositivo y es fijo. Un ejemplo de SyF generalmente usado por la industria, es el CoFe/Ru/CoFeB.

En los últimos años, las investigaciones se han dirigido hacia otros mecanismos para el cambio de estado, 0 ó 1.

Por ejemplo el elevar la temperatura de una capa fija (TAS-MRAM), de tal manera que rompamos el  $H_b$  y su magnetización cambie de sentido por algún acople muy fuerte, por ejemplo RKKY. Otro mecanismo muy estudiado son las futuras memorias STT-MRAM, las cuales utilizan el efecto de transferencia de momento de espín (spin transfer torque, STT).

### Spin transfer torque

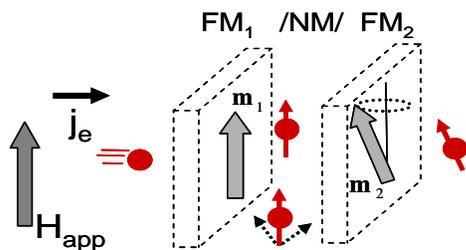
Un año después de la aparición de los dispositivos GMR (basados en el control del flujo de electrones  $j_e$  mediante la magnetización de capas FM) su efecto inverso, el control de la magnetización en capas FM utilizando una alta densidad de corriente polarizada en espín, fue descrita teóricamente por Slonczewski & Berger [8].

Este fenómeno llamado en inglés spin transfer torque (STT), fue observado experimentalmente en SVs algunos años después. Mas aún, el desarrollo de las MTJ utilizando AIO como NMI mostró que las excitaciones y el switching eran posibles utilizando el STT. Esto fue confirmado cuando la empresa Sony Corporation presentó la STT-RAM, memoria MRAM basada en STT como generador del switching.

Estas memorias son la evolución de las ya utilizadas memorias MRAM fabricadas por grandes empresas como Hitachi, Samsung Electronics, CROCUS Technology, Everespin Technology, etc, las cuales lideran el desarrollo de dispositivos espintrónicos en la actualidad. El STT ha generado una nueva rama de investigación dentro de la espintrónica, dirigida hacia el estudio y optimización de nuevos dispositivos basados en el comportamiento dinámico de la magnetización en capas delgadas.

En el esquema de la Fig. 5 se observa una estructura compuesta por dos capas FM cuyas magnetizaciones se encuentran canteadas. Aplicando un flujo de electrones a través de la estructura, estos llegan en primer lugar a la película  $FM_1$ .

Como se explicó en la introducción, el flujo se polariza en  $FM_1$ . y siguen el camino hacia la película  $FM_2$ .



**Fig. 5** Diagrama del paso de la corriente a través de una estructura  $FM_1/NM/FM_2$  compuesta por dos capas delgadas ferromagnéticas.

Una vez que la corriente polarizada en espín llega a la película  $FM_2$  interactuará nuevamente con la magnetización local, en este caso representada por  $\mathbf{m}_2$ . Los electrones que logran atravesar completamente la estructura, polarizarán su espín en la dirección de  $\mathbf{m}_2$ , y dado que el cambio en la dirección del espín es un intercambio de momento, este debe, por conservación, haber sido transferido al material, más específicamente a la magnetización local. Esta transferencia genera un torque en la magnetización  $\mathbf{m}_2$ , haciendo posible ahora, el control de la configuración magnética por medio de la corriente aplicada.

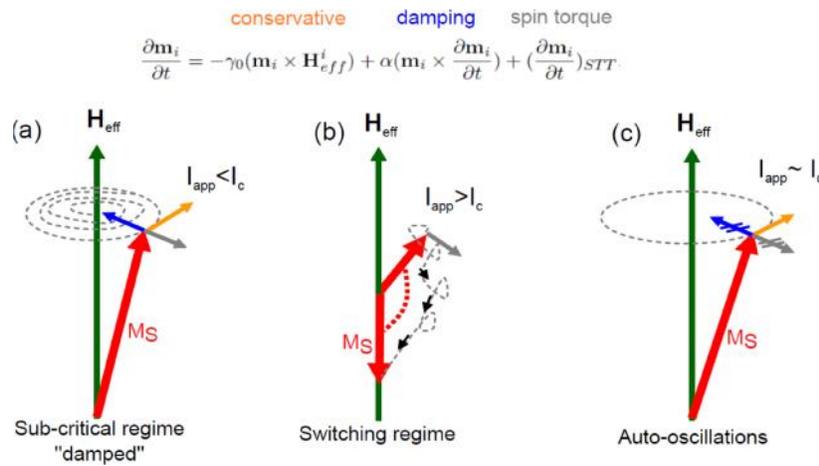
Este efecto se conoce como STT y generó toda una línea de investigación dentro de la espintrónica.

Ahora bien, la dinámica de magnetización, es decir, la evolución temporal de la magnetización en el material  $FM_2$ , es descrita por la ecuación de

Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (LLGS), la cual muestra la contribución del efecto de STT en la ecuación 1.

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\chi_0 (\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff}) + \Gamma \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} + \chi_0 j_{app} G(\gamma) \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{p}) \quad (1)$$

El detalle de las componentes de la ecuación está dado en estudios previos al nuestro [9], pero es importante mencionar que el vector unitario  $\mathbf{p}$  representa la dirección de polarización de los electrones que llegan a la capa  $FM_2$  (en la Fig. 5 correspondería al vector unitario en la dirección  $\mathbf{m}_1$ ). El primer término de la derecha corresponde al torque que genera la precesión de la magnetización alrededor de un eje de mínima energía o equilibrio, llamado campo efectivo,  $\mathbf{H}_{eff}$ . Dado que una precesión no puede producirse sin pérdidas de energía, tenemos el segundo término, correspondiente al amortiguamiento del movimiento (damping). El término de Slonczewski (tercer término de la ecuación) juega un rol fundamental, dado que depende del signo de la corriente aplicada, haciendo posible el contrarrestar o aumentar el amortiguamiento. Si se desea contrarrestarlo, el sistema debe recibir corriente por encima de un valor crítico. En la Fig. 6(a) observamos los vectores  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{H}_{eff}$  y las tres componentes de la ecuación LLGS dibujadas para ayudarnos a tener una idea del fenómeno. La evolución temporal de la magnetización, cuando la corriente aplicada es mayor que una corriente crítica puede tener como estado final una rotación total de la magnetización (switching) o una precesión temporal constante, ver Fig. 6(b)-(c).



**Fig. 6** Esquema de vectores de la ecuación LLGS. En (a) se muestra el campo efectivo  $H_{eff}$ , la magnetización  $m$  y las componentes vectoriales de la ecuación. En (b) se representa el switching de la magnetización debido a la gran densidad de corriente aplicada, fenómeno utilizado por las STT-MRAM. En (c) podemos apreciar las oscilaciones una vez contrarrestado el amortiguamiento natural del material.

### Nano-osciladores espintrónicos

Dentro de esta gama importante de nuevos dispositivos basados en el control del espín resalta un dispositivo llamado nano-oscilador espintrónico (Spín Transfer Torque Oscillator, STO), agrupando los tres fenómenos descritos previamente (GMR, TMR y STT) y los estudia mediante la dinámica de magnetización. Este dispositivo tiene muy buenas características de funcionamiento, debido a la no linealidad del sistema generando propiedades que podemos aprovechar. Esta no linealidad [10] es debido a que el campo efectivo, es función de la magnetización del sistema  $\mathbf{H}_{eff}(\mathbf{m})$ , lo cual genera soluciones que permite el control de la frecuencia en función de la corriente aplicada, además del campo magnético aplicado. Es por esta razón que los STO son los candidatos a reemplazar a los actuales osciladores controlados con voltaje o VCO (Voltage Control Oscillator), estos son los generadores de frecuencia en la electrónica convencional.

El más básico STO está basado en dos capas delgadas ferromagnéticas, una estructura similar a la que se muestra en la Fig. 7(a).

El principio de su funcionamiento de un STO es el siguiente: se aplica una corriente dc a través del STO, generando que el flujo de electrones interactúe con la magnetización de la estructura, polarizándose en  $FM_1$  y transfiriendo momento

angular en  $FM_2$ . Para una cantidad de corriente dc adecuada, se compensa el amortiguamiento y se generan las oscilaciones en  $FM_2$ .

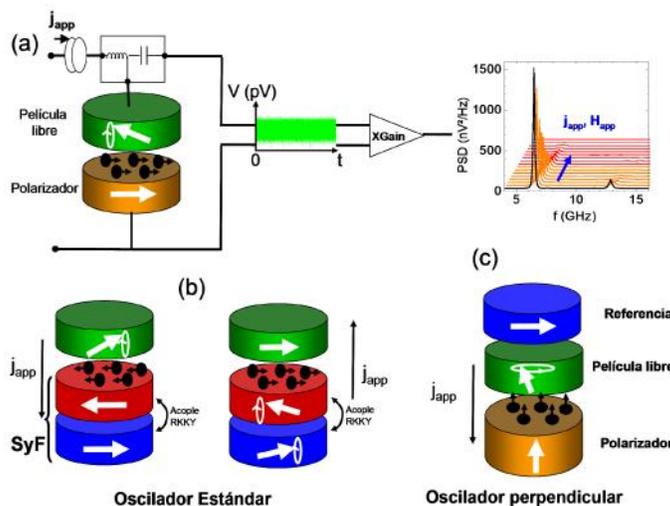
Ahora, debido al efecto de GMR o TMR, la resistencia de la estructura depende de la orientación relativa entre la magnetización,  $FM_1$  y  $FM_2$ , y dado que tenemos oscilaciones periódicas constantes en  $FM_2$ , la resistencia variará y; por consecuencia el voltaje de salida entre las capas superiores será alterno. Es posible utilizar este voltaje ac cuya señal es amplificada, y usando un analizador de espectros, obtener la frecuencia de oscilación. Al pico de la Fig. 7(a) le corresponde una power spectral density (PSD) con una frecuencia de oscilación en el orden de los GHz, siendo esta la frecuencia de oscilación de la magnetización. Esta señal puede ser aproximada a una lorentziana y obtener el ancho de banda  $\Delta f$  en el orden de decenas de MHz.

Otra ventaja de este nuevo dispositivo es la no necesidad de aplicación de campo magnético externo. Existen actualmente varios tipos de STO bajo investigación. Los más comunes son el oscilador estándar, ver Fig. 7(b), en el cual es posible cambiar el sentido de la corriente aplicada y así como excitar una capa FM simple o un SyF.

En el SyF se encontraron propiedades muy importantes, como es el cambio de la pendiente de la frecuencia con respecto a la corriente aplicada,

$df/dj_{app}$  negativo (redshift) hacia un  $df/dj_{app}$  positivo (blueshift), cambiando el valor del campo magnético aplicado [11]. El STO basado en un polarizador con magnetización perpendicular es

otro de los dispositivos en estudio dada su amplia gama de estados de oscilación como con oscilaciones fuera del plano, ver Fig. 7(c).



**Fig. 7** El sistema de funcionamiento de un STO es presentado en (a). Diferentes tipos de STOs estudiados actualmente como el oscilador estándar en (b) y el oscilador con polarizador perpendicular en (c).

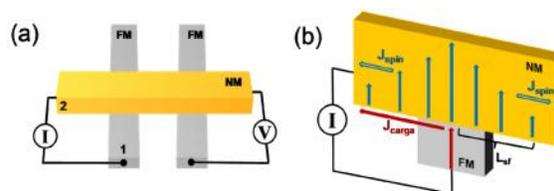
### GENERACIÓN DE CORRIENTE PURA DE ESPÍN EN ESTRUCTURAS LATERALES Y SUS APLICACIONES

Otro de los dispositivos que resalta por su potencial aplicación es la válvula lateral de espín (Lateral Spin Valve, LSV). Estos dispositivos han atraído mucha atención, desde el punto de vista fundamental, porque pueden ser utilizados para caracterizar las propiedades de transporte dependientes de espín de materiales no magnéticos y desde el punto de vista aplicativo, porque pueden ser empleados para la generación y detección no local de corriente pura en espín, favoreciendo así la implementación de dispositivos con un menor consumo de energía. La corriente pura en espín, es definida de manera general como el flujo de espines sin un flujo neto de carga eléctrica, es decir, dado un número de electrones de espín-up que se desplazan en determinada dirección, se tiene igual número de electrones espín-down que se desplazan en la dirección opuesta.

Esta importante característica reduce el calentamiento de la estructura debido al paso de corriente y detección no local asegura la obtención de una señal libre de otros efectos eléctricos. Esto

ha dado lugar a numerosos estudios realizados recientemente. [12].

Estos dispositivos, propuestos inicialmente por Johnson and Silbee [13], están conformados, en su forma más simple, por dos nanohilos ferromagnéticos (FM) paralelos (20x50nm de área lateral, y 1µm de largo) conectados a través de un nanohilo no magnético (NM) transversal, ver Fig. 8(a). Por simplicidad, en adelante denotaremos como inyector al nanohilo izquierdo, detector al nanohilo derecho y canal de espín al nanohilo no magnético.



**Fig. 8** (a), esquema representativo de una nanoestructura lateral y el método de detección no local. (b), representación del principio de inyección de espín a través de una interfase FM/NM.

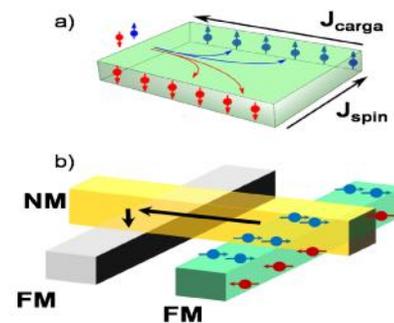
La generación de la corriente pura en espín en estos dispositivos se lleva a cabo principalmente mediante la aplicación de una corriente eléctrica entre el inyector y el canal de espín, contactos 1 y 2 en la Fig. 8(a). La transición de la región ferromagnética a la región no magnética, por parte de la corriente, genera una acumulación de espín en la vecindad de la interface que decae exponencialmente a lo largo de una longitud característica de cada material llamada longitud de difusión de espín ( $L_{sf}$ ).

La difusión de la acumulación de espín se lleva a cabo a ambos lados de la interface, dando lugar a una corriente pura de espín en el canal, Fig. 8(b). Para detectar la amplitud de la señal de espín, se aplica un campo magnético paralelo a los ejes de los nanohilos, de tal forma que la señal de espín (voltaje) que llega al detector es definida como la diferencia entre la señal en el estado paralelo y el estado antiparalelo del sistema (controlado por el campo externo aplicado). Este tipo de detección es llamada no local, debido a que la región en la cual la corriente es inyectada, está ubicada a cierta distancia del lugar de detección.

Sin embargo, a pesar de la gran ventaja que brindan estas estructuras al evitar la detección de otros efectos eléctricos de tipo magneto-resistencia anisotrópica, efecto Joule, campo de Oersted, etc. Estos dispositivos presentan aún una baja señal de magneto-resistencia, disminuyendo así su rápida inserción como componentes de los nuevos dispositivos espintrónicos. Por esta razón, diversos estudios teóricos [14] y experimentales, realizados en nuestro laboratorio, buscando optimizar su performance.

Otra forma eficaz de generar corriente pura en espín, en estos dispositivos, es a través del efecto Hall de espín (Spin Hall Effect, SHE) [15]. En este caso, materiales no magnéticos con un fuerte acople espín-orbita (interacción entre el espín electrónico y su momento magnético) son empleados, debido a que esta interacción produce una dispersión dependiente en espín cuando una corriente eléctrica es aplicada en el material. Desde su demostración experimental [16], este método ha generado mucha atracción debido a la posibilidad de la implementación de una nueva espintrónica sin el uso de materiales ferromagnéticos en la generación de corriente en espín. A diferencia del método clásico de inyección, en el cual la

acumulación de espín es generada sólo en la interface FM/NM, en este caso ésta se genera con la misma intensidad a lo largo de toda la superficie del material Fig. 9a lo cual puede ser empleado para manipulación de la magnetización de nano-objetos de forma simultanea. Fig. 9(b) muestra un ejemplo de detección empleando nano-estructuras laterales,



**Fig. 9** En (a) se observa la representación simplificada de la generación de la acumulación de espín ( $J_{spin}$ ), transversal a la dirección de la corriente eléctrica aplicada ( $J_{carga}$ ), en materiales no magnéticos debido a la interacción espín-orbita (efecto Hall de espín). b) Detección de la corriente de espín (representadas por las flechas), generada mediante el efecto Hall de espín, empleando nano-estructuras laterales.

Finalmente, en los últimos años diferentes grupos han demostrado que la corriente pura en espín puede también ser empleada en la manipulación de la magnetización a través del espín transfer torque STT. Este método, estudiado principalmente en estructuras SV o MTJ, ha sido aplicado con éxito, tanto para revertir la magnetización de una nanopartícula magnética [17] así como para desplazar una pared de dominio magnético [18].

Una pared de dominio es una zona de transición (de talla nanométrica) que separa dos regiones de magnetización uniforme y orientación opuesta (llamados comúnmente dominios magnéticos), en la cual la magnetización rota de forma continua de una orientación a la otra. Esta pared de dominio puede ser en un futuro una fuente de almacenamiento de información, es por ello que su detección y manipulación es tema prioritario de investigación.

Recientemente se ha demostrado experimentalmente, que la corriente pura en espín puede ser empleada en la detección precisa de la posición de una pared de dominio magnético así como de su estructura magnética (tipo de pared de dominio), dando lugar a la posibilidad de implementar nuevos dispositivos de manipulación de paredes de dominio magnético basado en las estructuras laterales [19].

Este es solo un ejemplo de una potencial aplicación en el desarrollo de la tecnología de la racetrack memory, basado en el movimiento de dominios magnéticos. Dicha tecnología, que compite con otras tecnologías de almacenamiento como las MRAM, STT-RAM y las flash memory viene desarrollándose en los laboratorios de IBM.

### **Estudio de efectos interfaciales y efecto Hall de espín mediante resonancia ferromagnética y espín pumping**

Uno de los elementos esenciales en el diseño de dispositivos espintrónicos es un material con fuerte interacción espín-órbita. Dichos materiales exhiben mejores tasas de conversión de corriente de espín en corriente de carga eléctrica (Direct SHE, DSHE) y viceversa (Inverse SHE, ISHE) Un parámetro clave que cuantifica dicha eficiencia, es el llamado ángulo Hall de espín ( $\theta_{\text{SHE}}$ ).

Entre los materiales de elementos simples que exhiben mayores  $\theta_{\text{SHE}}$  están el Pt (1.3%), -Ta (-2.2%), Pd (1%), Bi (~2%); y entre materiales compuestos se ha mostrado altos valores en aleaciones de CuBi (-22%).

Se predice altos valores también para aleaciones a base de Au. Uno de los recientes experimentos que se viene usando ampliamente para cuantificar  $\theta_{\text{SHE}}$  de diferentes tipos de materiales (metálicos y semiconductores) es el basado en el efecto inverso Hall de espín- espín pumping- resonancia ferromagnética (ISHE-SP-FMR, por sus siglas en inglés).

Desde un punto de vista fundamental, dicho experimento es rico porque combina diversos fenómenos físicos. Sin pretender entrar en detalles, brevemente se describe a continuación los principales fenómenos:

i) En un experimento típico de resonancia ferromagnética, (ferromagnetic resonante, FMR), una muestra FM (en nuestro caso una película delgada) se coloca dentro de una cavidad resonante. Se aplica un campo de radiofrecuencia  $h_{\text{rf}}$  (por ejemplo a 10 GHz) y a la vez se barre un campo magnético  $H_{\text{dc}}$  perpendicular a  $h_{\text{rf}}$ . Cuando se llega a la condición de resonancia, la muestra absorbe fuertemente la radiofrecuencia y la magnetización de la película FM precesa alrededor de su posición de equilibrio. Dicha precesión relaja con una constante de amortiguamiento  $\alpha$ .

Dicho parámetro adimensional es fundamental cuando se diseñan dispositivos donde se requiere mayor o menor velocidad de transferencia de información.

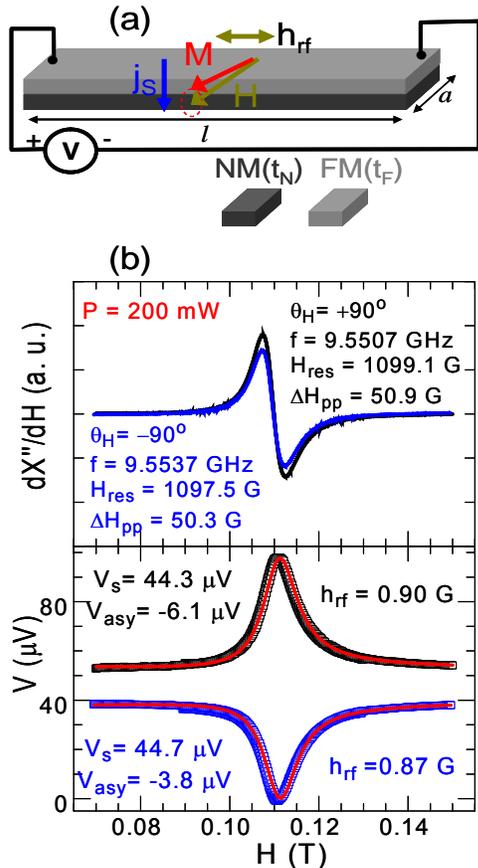
ii) Consideremos ahora la película delgada FM junto a otra película NM, es decir, la muestra es una bicapa FM/NM. Entonces, en la condición de resonancia, la precesión de la magnetización de la capa FM "bombea" espines a la capa NM, se produce una inyección de corriente de espín, (spin pumping, SP), desde la capa FM a la capa NM adyacente.

Esta capa NM puede absorber fuertemente o parcialmente dicha corriente de espín. Materiales con fuerte interacción espín-órbita son fuertes absorbentes de espín.

La teoría de espín pumping predice un aumento de la constante de amortiguamiento del sistema FM/NM comparado con la capa simple FM. Desde finales de los 90 e inicios de la década pasada se ha estudiado el efecto de SP en diversos sistemas midiendo la constante  $\alpha$  por resonancia ferromagnética.

iii) El ISHE convierte una corriente pura de espín en corriente de carga eléctrica, debido a la dispersión dependiente de espín en materiales NM con fuerte interacción espín-órbita. Es así que en la condición de resonancia ferromagnética, se inyecta una corriente de espín  $J_{\text{Spin}}$  desde la capa FM a la capa NM, ésta última puede convertir dicha corriente en corriente de carga  $J_{\text{Carga}}$  (que es perpendicular a  $J_{\text{Spin}}$  y a la magnetización de la película FM) debido al efecto ISHE.

Luego añadiendo contactos eléctricos, como se muestra en la Fig. 10(a), se puede medir el voltaje debido al efecto ISHE.



**Fig. 10** (a) esquema de una bicapa FM/NM bajo la acción de un campo magnético de radiofrecuencia  $h_{rf}$  y un campo magnético ( $H$ ) dc. (b) Arriba: espectro FMR típico donde se indica el campo de resonancia, el ancho de línea  $H_{pp}$ , y la frecuencia y la potencia de la microonda aplicada. Abajo: El voltaje transversal simultáneamente medido.

En la Fig. 10 (a) en la condición de resonancia se hace precesar la magnetización  $M$  de la capa FM y se inyecta una corriente de espín  $j_{spin}$  a la capa adyacente. Por el efecto inverso Hall de espín la capa NM convierte la  $j_{spin}$  en una corriente de carga eléctrica cuyo voltaje ( $V$ ) se puede medir como se indica.

En (b) la curva es una lorentziana cuyo pico coincide con el campo de resonancia. Se presentan

dos casos: aplicando el campo  $H$  paralelo (pico hacia arriba) y antiparalelo (pico hacia abajo). La muestra es una bicapa NiFe(15)/Pt(5) donde los espesores están en nm.

Midiendo entonces simultáneamente el espectro FMR y el voltaje transversal generado por ISHE en sistemas FM/NM se puede cuantificar  $\chi_{SHE}$  de la capa NM. Adicionalmente también, se pueden estudiar efectos de interfaces. Por ejemplo, se ha predicho teóricamente un fuerte efecto de interface (efecto Rashba) en el sistema Ag/Bi.

Otros estudios que se pueden realizar con esta técnica, es dentro del sub-campo de la espintrónica llamado caloritrónica de espín, donde la corriente de espín es creada por el efecto Seebeck debido a un gradiente de temperatura.

En el caso de un experimento con resonancia ferromagnética, la radiofrecuencia puede generar un gradiente de temperatura entre la superficie de la muestra y la interface con la(s) capa(s) adyacentes. Para discernir si el voltaje medido es debido a ISHE o a una corriente de espín Seebeck se necesita una muestra con una geometría diferente llamada de tres o cuatro terminales.

En ella se miden los voltajes entre los distintos terminales y se observa si existen o no asimetrías entre dichos valores.

## CONCLUSIONES

Nuestra generación ha sido testigo de la evolución de la tecnología en las últimas dos décadas sin estar del todo conscientes de la importancia y del rol que la espintrónica ha jugado en este desarrollo. Los dispositivos espintrónicos se encuentran actualmente en nuestra vida diaria, utilizándolos sin percatarnos. Componentes en teléfonos celulares, cámaras digitales, sensores en los automóviles, discos duros, son parte de todas las aplicaciones actuales en las que está envuelta la espintrónica.

Es por ello que no debemos extrañarnos si en algunos años más se empieza a comercializar productos biológicos basados en las películas delgadas FM para la lucha contra el cáncer, que los osciladores de radio frecuencia basados en STT se encuentren transmitiendo microondas desde nuestra laptop o teléfono celular, o que dejemos de

hablar de la memoria RAM y sea ahora una STT-MRAM, la que debamos comprar para mejorar la rapidez de nuestro ordenador.

Hoy en día, dada la gran inversión en investigación básica y aplicada en este campo, materiales ferroeléctricos, semiconductores y moléculas, se ha ido generando mucha más expectativa, dada la gran cantidad de aplicaciones que podrían surgir y hacer que esta rama de la física, en la cual nos desenvolvemos, trascienda en la historia del desarrollo tecnológico.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los miembros de la asociación francesa Puya Raimondi, en particular a Frederic Chandezon y Robert Baptist, por el inmenso apoyo brindado a los estudiantes peruanos en Francia., E. Monteblanco agradece al grupo de nano-osciladores de SPINTEC, en especial a Ursula Ebels, Directora de Tesis y responsable del grupo de nano-osciladores. Al PosDoc. Felipe García Sánchez por sus valiosos comentarios y discusiones., C. Ortiz Pauyac agradece a SPINTEC-CEA Grenoble, Francia y MSE-KAUST, Arabia Saudita., J. C. Rojas Sánchez agradece al programa CEA-Eurotalents por la beca de posdoctorado., igualmente W. Savero y J. C. Rojas agradecen a Laurent Vila, Director de Tesis y responsable del grupo "Nano-structures et Magnetisme" del CEA Grenoble por el apoyo brindado en todo momento.

### REFERENCIAS

- Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Nguyen van Dau, F., Petroff, F., Eitenne, P., Creuzet, G., Friederich, A., Chazelas, J.**, "Phys. Rev". Lett. 61, 2472 (1988), G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B 39, 4828 (1989).
- Thomson, W.**, "Proceedings of the Royal Society of London", 8, 546-550 (1856-1857).
- Smit, J.**, "Physica", 17, 612 (1951).
- Sommerfeld, A.**, "Atomic Structure and Spectral Lines", trad. de la 3ª edición Alemana por H. L. Brose, New York, E.P. Dutton, 1923.
- Gerlach, W., & Stern, O.**, "Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld". *Id.Z. Phys.* 9, 349-352 (1922).
- Julliere, M.**, "Phys Lett". A, 54, 225 (1975)
- Bruno, P., Chappert, C.**, "Phys. Rev". Lett, 67, 1602 (1991).
- Slonczewski, J. C., Magn. Magn, J.**, "Mater. 159", L1 (1996); J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* 195, 261 (1999). L. Berger, *Phys. Rev. B* 54, 9353 (1996).
- Gusakova, D., Houssameddine, D., Ebels, U., Dieny, B., Buda-Prejbeanu, L., Cyrille, M. C., Delaet, B.**, "et al., *Phys.* Rev. B 79, 104406 (2009).
- Slavin, A. N., Tiberkevich, V.**, "IEEE Trans". *Magn.* 45, 1875 (2009).
- Houssameddine, D., Sierra, J. F., Gusakova, D., Delaet, B., Ebels, U., Buda-Prejbeanu, L. D., Cyrille, M.-C., Dieny, B., Ocker, B., Langer, J., Maas, W.**, "Appl. Phys". Lett. 96, 072511 (2010).
- Kimura and T., Otani, Y.**, "PRL 99, 196604" (2007); J. Jedema et al, *Nature* 2001; P. Laczkowski et al. *Appl. Phys. Exp.* 4 063007 (2011); A. Jain et al. *APL* 101, 202402 (2012); N. Tombros et al. *Nature* 2007.
- Johnson, M., Silsbee, R. H.**, "Phys. Rev". Lett. 55, 1790 (1985).
- Takahashi, S., Maekawa, S.**, "Phys. Rev". B 67 052409, 2003.
- Hirsch, J. E.**, "Phys. Rev". Lett. 83, 1834 (1999).
- Kato et al.** "Science 306, 1910 (2004)"; O. Valenzuela and M. Tinkham, *Nature* 2006
- T. Kimura, Y. K., Otani, Y., Hamrle, J.**, "PRL 96,037201" (2006); T. Yang, T. Kimura and Y. Otani 2008 *Nature Phys.* 4 851.
- D. I Igaz** "et al, PRL 105", 076601 (2010).
- W. Savero**, por publicarse.

Correspondencia: nmonteblanco@cientificos.pe

Recepción de originales: enero 2013

Aceptación de originales: julio 2013