

# UNA INTRODUCCIÓN A LA ESPINTRÓNICA

## INTRODUCTION TO SPINTRONICS

**Manuel Villarreal<sup>1,2</sup>, Pedro Grima<sup>2</sup>, Jesús Briceño<sup>1</sup>, Hebert Lobo<sup>1</sup>, Jesús Rosario<sup>1</sup>,  
Juan Díaz<sup>1</sup>, Gladys Gutiérrez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Científica y de la Enseñanza de la Física (GRINCEF), Núcleo Universitario Rangel Rangel, Universidad de Los Andes, Código Postal Trujillo 3102, Venezuela.

<sup>2</sup> Centro de Estudios en Semiconductores (CES), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, La Hechicera, Mérida 5251, Venezuela. Email: [mavu@ula.ve](mailto:mavu@ula.ve), [peg@ula.ve](mailto:peg@ula.ve), [jesusb@ula.ve](mailto:jesusb@ula.ve), [hlobo@ula.ve](mailto:hlobo@ula.ve), [jrosario@ula.ve](mailto:jrosario@ula.ve), [juand@ula.ve](mailto:juand@ula.ve), [gladysg@ula.ve](mailto:gladysg@ula.ve)

### Resumen

Los investigadores de la comunidad Espintrónica (nombre dado a la electrónica del espín) esperan que mediante la comprensión del comportamiento del espín del electrón en los materiales, se pueda aprender algo fundamentalmente nuevo sobre la Física del Estado Sólido que conduzca a una nueva generación de dispositivos electrónicos basados en el flujo del espín, además del flujo de la carga eléctrica. Una ventaja del espín sobre la carga es que el espín puede manipularse fácilmente por campos magnéticos externos aplicados, una propiedad ya en usos en la tecnología de almacenamiento magnético. Otra propiedad del espín más sutil, pero potencialmente significativa, es su coherencia o tiempo de relajación, una vez creada tiende a permanecer así durante mucho tiempo, a diferencia de los estados de carga, los cuales son fácilmente destruidos por dispersión con defectos, impurezas u otras cargas. Realmente, el sueño de la Espintrónica es una perfecta integración multifuncional de electrónica, opto-electrónica y magneto-electrónica en un único dispositivo que pueda realizar mucho más de lo que es posible en los actuales dispositivos microelectrónicos. El propósito de este trabajo, enmarcado en el ámbito de una investigación analítica y bibliográfica, es presentar una descripción sobre los desarrollos recientes en la Espintrónica.

**Palabras clave:** Electrónica, Magnetismo, Espintrónica, Física del Estado Sólido

### Abstract

The community researchers Spintronics (name given to the electronic spin) hope that by compressing the behavior of the electron spin of the electron in materials, you can learn something fundamentally new about solid state physics, leading to a new generation of electronic devices based in the flow of spin in addition to the flow of charge. One advantage of spin over charge is that spin can be easily manipulated by externally applied magnetic fields, a property already in use in magnetic storage technology. Another more subtle (but potentially significant) property of spin is its long coherence, or relaxation, time-once created it tends to stay that way for a long time, unlike charge states, which are easily destroyed by scattering or collision with defects, impurities or other charges. In fact, the spintronics dream is a seamless integration of electronic, optoelectronic and magnetoelectronic multifunctionality on a single device that can perform much more than is possible with today's microelectronic devices. The purpose of this study framed in the field of analytical and literature research is to present an overview on recent developments in Spintronics.

**Keyboards:** Electronic, Magnetism, Spintronics, Solid State Physics

**Recibido: 24/05/2011 - Aprobado: 29/02/2012**

## **Introducción**

La última mitad del siglo XX, con considerable justificación, podría ser llamada la era de la microelectrónica. Durante ese período de 50 años, el mundo atestiguó una revolución basada en una lógica digital de los electrones. Desde el transistor hasta el microprocesador, la mayoría de los dispositivos electrónicos han utilizado circuitos que expresan los datos como dígitos binarios o bits, unos y ceros representados por la existencia o ausencia de carga eléctrica. La comunicación entre los dispositivos microelectrónicos ocurre por el flujo de cargas eléctricas. La tecnología que surgió de la lógica simple ha creado una industria global de billones de dólares por año. El crecimiento implacable de la microelectrónica a menudo es resumido en la ley de Moore, que sostiene que los microprocesadores duplicaran su capacidad cada 18 meses con dispositivos electrónicos que reduzcan su tamaño y contengan más lógica embalada en cada chip.

Por esta razón y también para mejorar la multifuncionalidad de los dispositivos, los investigadores han estado impacientes por explotar otra propiedad del electrón, una característica conocida como el espín (Das Sarma, 2001). El espín es un fenómeno puramente cuántico que se asemeja al comportamiento direccional de una brújula. Los electrones tienen una especie de giro en el que su aguja de la brújula puede señalar, ya sea hacia arriba o hacia abajo en relación a un campo magnético aplicado. El espín, por lo tanto, se presta elegantemente para un nuevo tipo de lógica binaria de unos y ceros (figura 1). El movimiento del espín, al igual que el flujo de carga, también puede llevar información entre los dispositivos. La manipulación y el tiempo de coherencia del espín son características que abren la posibilidad de desarrollar dispositivos que podrían ser más pequeños, consumir menos electricidad y ser más potentes para ciertos tipos de cálculos que son posibles actualmente con los sistemas basados en la carga del electrón.

## **La Espintrónica**

La Espintrónica, la interfase entre el magnetismo y la electrónica es un nuevo campo de investigación en expansión considerable (Wolf y col., 2001). El concepto básico de la Espintrónica es la manipulación de corrientes de espín, contrario a la electrónica convencional en la que se omite el espín del electrón. Agregar un nuevo grado de libertad, el espín, produce nuevos efectos, nuevas capacidades y nuevas funcionalidades. Más allá de las aplicaciones en los discos duros y memorias, el potencial de la Espintrónica es muy prometedor para los nuevos avances e importantes impactos en la ciencia y la tecnología del siglo XXI.

La influencia del espín en las propiedades de transporte electrónico de los materiales ferromagnéticos se conoce desde hace mucho tiempo. La existencia de corrientes polarizadas en espín, fue sugerida por primera vez por Sir Mott en los años 70, y han sido demostradas experimentalmente y descritas teóricamente hace unos treinta años (Fert y col., 2003). En metales como el hierro y el cobalto, las corrientes portadoras de electrones con “espín mayoritario” y “espín minoritario” pueden ser diferentes en más de un orden de magnitud. Esta conducción dependiente del espín proviene de la división de las bandas de energía de “espín mayoritario” y “espín minoritario” y de la sección transversal de algunos defectos o impurezas.

Con el rápido progreso en la miniaturización de los dispositivos en la electrónica convencional (electrónica de semiconductores), los científicos e ingenieros están obligados a tratar con el régimen de la nanoescala. El que la electrónica se aventure en el régimen de la nanoescala, significa no solo la utilización y el tratamiento de las leyes de la física clásica, sino también los efectos mecánico cuánticos. Mientras muchos ven esto como un obstáculo para desarrollar nuevas tecnologías, otros buscan en el encuentro con la física cuántica la oportunidad de realizar métodos profundos y extraordinarios para construir nuevos dispositivos. Específicamente, el área de la Espintrónica es un campo que traerá nuevas tecnologías y reconstruirá una era de expansión innovadora.

### ¿Qué es el espín de un electrón?

Además de un momento angular orbital, un electrón tiene un momento angular intrínseco llamado momento angular de espín. Este es conocido simplemente como espín, y puede denotarse por el vector  $\vec{S}$ . Otras partículas elementales, tales como los protones, también tienen espín. El espín está asociado con el momento dipolar magnético de espín de una partícula,  $\vec{\mu}_s$ . El vector  $\vec{S}$  y el momento  $\vec{\mu}_s$  están relacionados mediante la expresión:

$$\vec{\mu}_s = -e/m \vec{S} \quad (1)$$

donde:  $e$ , es la carga elemental y  $m$ , la masa del electrón.

Por otra parte, el vector  $\vec{S}$  no puede medirse directamente; sin embargo su componente a lo largo de cualquier eje puede medirse. Cuando esto se hace, su componente, llamada  $S_z$  cuando se mide en la dirección del eje z, se encuentra cuantizada. Así, la componente  $S_z$  tiene solo dos valores posibles, específicamente:

$$S_z = m_s \hbar \quad (= m_s \hbar) \quad (2)$$

donde:  $\hbar$ , es la constante de Planck y  $m_s$ , el número cuántico magnético de espín, siendo

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Si  $m_s = \frac{1}{2}$ , entonces  $S_z$  es paralela al eje z y el electrón se dice a estar en su estado de espín hacia arriba.

Si  $m_s = -\frac{1}{2}$ , entonces  $S_z$  es antiparalela al eje z y el electrón se dice a estar en su estado de espín hacia abajo.

El propósito de la Espintrónica es utilizar estos dos estados para desarrollar nuevos dispositivos que puedan detectar, filtrar, o usar los electrones de un estado de espín particular. La mayoría de los dispositivos convencionales ignoran tales estados y consisten de electrones cuyos estados de espín son fortuitos. Sin embargo, el área de los discos magnéticos para almacenamiento de datos es un campo que ha usado estos estados de espín. Específicamente, el efecto de Magnetoresistencia Gigante (GMR) se ha utilizado para crear sensores ultrasensitivos de dominio magnético en los cabezales lectores de los discos duros. El aumento de

la sensibilidad en un cabezal lector permite mayores densidades de datos en un disco duro. La Memoria de Acceso Aleatorio Magnética (MRAM) tiene la característica de no-volátil pero con la ventaja de contar con una ultra-alta conmutación y tasas altas de reescritura.

Los investigadores han propuesto tres categorías de Espintrónica a ser desarrolladas. La primera categoría incluye los dispositivos que consisten solo de aleaciones ferromagnéticas tales como la MRAM y otros dispositivos que utilizan la GMR. La segunda categoría consiste en la incorporación de materiales ferromagnéticos en los semiconductores a fin de inyectar y utilizar las corrientes polarizadas en espín. Esto permitiría la continua expansión de la industria de los semiconductores. Una tercera categoría de dispositivo implica la manipulación de los estados cuánticos del espín de los electrones, para el desarrollo de dispositivos como compuertas lógicas cuánticas que serían parte integral en el desarrollo de los ordenadores cuánticos. La investigación actual en este campo todavía está en su infancia, pero las ganancias significantes se han realizado en los modelos teóricos de la computación cuántica.

### La Magnetoresistencia Gigante (GMR)

Un aspecto excitante de la Física del Estado Sólido es el descubrimiento y el estudio de nuevos materiales y combinaciones de materiales con nuevas propiedades, que no caen dentro de cualquier categoría de materiales simples (metales y/o semiconductores) que han sido extensamente estudiados teórica y experimentalmente. Cuando nuevos dispositivos puedan ser creados basados sobre estas propiedades físicas, existe un interés adicional.

Un ejemplo de tales descubrimientos, es el fenómeno de la Magnetoresistencia Gigante (GMR). La GMR ha sido establecida como un fenómeno único que combina propiedades de materiales metálicos y magnéticos a otra nueva clase de materiales. Se han encontrado diversas aplicaciones y se ha extendido, siendo usada en la industria, principalmente como componente básico de cabezales lectores en los discos duros.

La historia de la GMR comienza cuando el grupo de Grunberg<sup>1</sup> (Grunberg y col., 1986) descubrió, mediante el uso de dispersión de luz, que las capas monocristalinas de Hierro (Fe) por crecimiento epitaxial, pueden acoplarse antiferromagnéticamente a través de una intercapa de Cromo (Cr) de espesor adecuado (figura 2). Poco después, Carbone y Alvarado (Carbone y Alvarado, 1987) verificaron mediante el uso de difracción de electrones de baja energía de espín polarizado (SPLEED) que las capas de Fe se acoplaban antiferromagnéticamente cuando están separadas por una intercapa de Cr de espesor dado.

En 1988, el grupo de Fert<sup>2</sup> (Baibich y col., 1988) encontró un gran cambio en la resistencia de las multicapas de Fe/Cr, cuando un campo magnético externo era aplicado. La GMR se define (Theodoropoulou, 2002) como la razón de la diferencia  $(R)$  entre la resistencia cuando no se aplica el campo magnético,  $R(\mathbf{0})$ , y la resistencia saturada cuando existe un campo magnético externo,  $R(H_s)$ , sobre la resistencia sin campo externo, esto es:

$$GMR = (R(\mathbf{0}) - R(H_s)) / R(\mathbf{0}) = (R/R(\mathbf{0})) \quad (3)$$

1 Peter Grunberg: Físico Alemán, Premio Nobel de Física 2007

2 Albert Fert: Físico Francés, Premio Nobel de Física 2007

La GMR a 4,2 K fue tan alta como 40%. Ellos interpretaron sus resultados en términos de una transmisión entre las capas ferromagnéticas, dependiente del espín. En esta fase, el acoplamiento antiferromagnético no fue observado directamente, pero se observó una disminución del campo de saturación  $H_s$  (el campo en el que la magnetoresistencia no cambia con el incremento del campo magnético) en los datos de la magnetización, cuando el espesor de las intercapas de Cr se incremento de 9 hasta 60 Å. Luego, un acoplamiento antiferromagnético fue observado en la tricapa de Fe/Cr/Fe (Binasch y col., 1989) mediante el efecto Kerr magneto-óptico (MOKE). Sin embargo, el efecto de la magnetoresistencia fue bajo, del orden del 1 al 2%.

Los primeros resultados en GMR mostraron que la resistencia de las estructuras era mayor cuando los momentos magnéticos en las películas vecinas de Fe están antiparalelos, y menor cuando están paralelos. Las multicapas mostraron mayor magnetoresistencia que las estructuras de sándwich simple. Además, la disminución de la temperatura desde ambiente hasta 4 K aumento el efecto de la magnetoresistencia en un factor de 2 a 3.

El efecto de válvula de espín, efecto de la magnetoresistencia entre dos capas ferromagnéticas de Ni/Fe desacopladas con anisotropía en el plano, separadas por una capa metálica no-magnética (figura 3), fue descubierto por el grupo de Dieny (Dieny y col., 1991). La orientación de la magnetización de una de las capas ferromagnéticas se “fija” (mediante la anisotropía de intercambio a través de un contacto antiferromagnético de 50% Hierro-50%Manganeso,  $Fe_{50}Mn_{50}$ ), mientras que la magnetización de la otra capa se deja libre, originando la estructura de válvula de espín. Ellos observaron grandes efectos de magnetoresistencia con Cobre (Cu), Plata (Ag) y Oro (Au) como intercapa, mientras que no encontraron ningún efecto con Aluminio (Al) y Tantalio (Ta).

Unos de los primeros intentos de estudiar el papel que juega la rugosidad en la GMR fueron realizados por el grupo de Fullerton (Fullerton y col., 1992). Las multicapas de Fe/Cr fueron crecidas usando deposición por pulverización a corriente directa (sputtering deposition dc) en condiciones controlables. Variaron la rugosidad de la intercara de tres formas independientes: cambiando la presión del gas de sputtering, variando la potencia de sputtering, e incrementando el espesor total de la superred. Demostraron que al aumentar la presión del Argón (Ar), disminuye la potencia del Fe y aumenta el número de bicapas, aumentaron la rugosidad, y en todos los casos se obtuvo una mayor magnetoresistencia. No obstante, en las multicapas de Cobalto/Rutenio (Co/Ru) el efecto opuesto fue observado: aumentando el ancho de la región de la intercara mixta, la magnitud de la GMR disminuye.

### **La Memoria de Acceso Aleatorio Magnética, MRAM**

La Espintrónica también está abriendo el camino a las tecnologías de almacenamiento más refinadas. La Memoria de Acceso Aleatorio Magnética (MRAM), es una tecnología en desarrollo que llegará al mercado en los próximos años. La MRAM tendrá la ventaja de ser una forma de memoria no-volátil (como la memoria flash) y poseer tasas de reescritura que desafían a la memoria convencional volátil, la RAM.

Los planes iniciales fue usar eventualmente la MRAM como sustituto de otros tipos de memoria no-volátil a fin de aumentar las velocidades de reescritura, pero debido a estas altas velocidades de reescritura también se ha sugerido que la MRAM sustituya la RAM

convencional que es típicamente volátil. Esto permitirá que el estado completo de software de una computadora se conserve después que el computador sea apagado. Tras el encendido de la computadora, todas las configuraciones de software estarían presentes. En consecuencia, la utilización de la MRAM virtualmente eliminaría el tiempo de arranque.

En los tipos más comunes de memoria, tal como la Memoria de Acceso Aleatorio Dinámica o DRAM, un bit es almacenado como un voltaje en un condensador. La conmutación de esta tensión de mayor a menor o de menor a mayor, se realiza por medio de un transistor. Uno de los conceptos básicos usados en la MRAM es la histéresis, mediante el uso de de dos o más cables de transporte de corriente para almacenar un bit de datos. Esto implica la aplicación de un campo magnético a un material ferromagnético para magnetizarlo. Esto representaría un “1”. Después de que el material ha sido magnetizado por primera vez, se requiere no solo la ausencia de campo, previo a desmagnetizar el material, sino la aplicación de un campo con la polaridad opuesta. El material desmagnetizado representaría un “0” (figura 4).

Con el descubrimiento de la GMR, los investigadores se interesaron en la manera de utilizarla como un medio de lectura en una celda de MRAM. Una de las últimas técnicas a usar GMR es mediante el dispositivo de Tunelamiento Dependiente del Espín (SDT). Estos dispositivos son normalmente llamados Uniones de Túnel Magnéticos (MTJ) y son una mejora de la llamada estructura de “sándwich”. La idea es básicamente la misma, excepto que ahora la capa que previene el acoplamiento magnético entre la capa libre y la capa fija es un dieléctrico delgado, o material aislante. Esto elimina la corriente convencional y por lo tanto, la única corriente que pasa a través de la estructura es la corriente túnel. Cuando las capas libres son paralelas entre sí, la probabilidad de tunelamiento es alta y existe una resistencia relativamente baja. Cuando las capas libres son antiparalelas, la probabilidad de tunelamiento es muy baja y resulta una resistencia muy alta.

Los últimos estudios han indicado que los dispositivos SDT resultan en magnetoresistencias de más de 40%. En otras palabras, la resistencia del material cambia en un 40% (Daughton, 2000). Este valor es muy superior a los encontrados en estructuras sándwich o pseudo-estructuras válvulas de espín. Tales porcentajes tan altos en el cambio, resultan en señales más fuertes y por lo tanto en velocidades de lectura más rápidas. Existen otras ventajas para utilizar un dispositivo SDT como una celda MRAM. Es relativamente fácil de manipular la magnetoresistencia, variando el espesor de la barrera de tunelamiento en los dispositivos SDT. Además, una gran magnetoresistencia se puede mantener cuando el área de la unión se reduce a la escala nanométrica. También, los dispositivos SDT tienen una amplia respuesta de frecuencia y son de baja potencia. Todos estos atributos, hacen que el dispositivo SDT sea un elemento prometedor para la MRAM.

La etapa de fabricación de la MRAM se encuentra en evolución. Motorola ya ha desarrollado un chip MRAM-4Mbit (256K x 16) que se basa en un solo transistor y una estructura MTJ. La estructura se muestra en la figura 5. Una tira conductora se alinea perpendicular a y sobre la parte superior de la capa libre. Sobre ella se envía una corriente que se transmite a través de la línea bit, y el campo magnético inducido escribe a la capa libre. Una corriente pasa luego a través de la pila para determinar la resistencia y por consiguiente el estado de la celda. La integración de una MTJ en la parte superior de un FET permite

utilizar la corriente de los sistemas de fabricación de los CMOS. Esto permite un tamaño de celdas pequeñas y bajo costo de fabricación. Motorola ha licenciado recientemente su chip para aplicaciones aeroespaciales y militares y ya se encuentra disponible comercialmente.

### **La Espintrónica y los Semiconductores**

La incorporación de la Espintrónica en la tecnología de los Semiconductores, no solo proporcionaría una vía para construir dispositivos más pequeños que los actuales, sino que proporciona una gran cantidad de oportunidades para desarrollar nuevos tipos de dispositivos. Al tomar ventaja de las propiedades de un buen semiconductor óptico y las capacidades de amplificación, nuevos dispositivos, tales como interruptores de ultra-alta velocidad, compuertas lógicas multifuncionales y totalmente programables, así como los microprocesadores espintrónicos, tienen el potencial de ser realizados.

Uno de los primeros conceptos de un dispositivo espintrónico potencial es el Transistor Efecto de Campo de Espín (FET-espín). La idea de un FET-espín se muestra en la figura 6 (Jonker y col., 2003). Este consiste de dos contactos, fuente y fuga, construidos de materiales ferromagnéticos, con la finalidad de inyectar y detectar los electrones de polarizados en espín, transportados a través de un canal de alta movilidad.

El terminal de la fuente servirá como fuente para la corriente polarizada en espín. Al aplicar un voltaje al terminal de la compuerta, que es seleccionado con mucho cuidado respecto a la magnetización del contacto de fuga, el espín de los electrones que son transportados a través del canal debería rotar. Esto efectivamente cambiaría la conductividad del canal. Por lo tanto, de forma independiente controlando la magnetización de los terminales como en las técnicas presentadas en el concepto de la MRAM, el FET-espín puede servir como un dispositivo no-volátil y reprogramable que tiene más de un modo de uso. Ideas como esta serán la incorporación de funcionalidad adicional en compuertas lógicas tradicionales, creando un nuevo campo potencial de versátiles circuitos integrados.

Antes de continuar en la construcción práctica de dispositivos espintrónicos como el FET-espín, algunas preguntas básicas sobre la integración de los efectos espintrónicos en los semiconductores deben ser contestadas. Por ejemplo, ¿Se pueden lograr métodos en la combinación de materiales ferromagnéticos y semiconductores para generar chips integrados que sean económicos (desde el punto de vista de su producción)? ¿Pueden los semiconductores ferromagnéticos mantenerse a temperatura ambiente? ¿Pueden las corrientes polarizadas en espín ser inyectadas con éxito en los semiconductores?

Este tipo de preguntas deben ser cuidadosamente tratadas, antes de que el campo de la Espintrónica pueda despegar realmente como industria. Preguntas como estas normalmente caen bajo cuatro categorías de requisitos siguientes:

- i. Producir una inyección eléctrica eficiente de portadores polarizados en espín dentro de un semiconductor.
- ii. Mantener una longitud de difusión del espín adecuada y tiempos largos de vida para el transporte dentro del dispositivo.
- iii. Lograr un control y manipulación efectiva del sistema de espines.

iv. Establecer una detección eficiente del sistema de espines para determinar la salida.

Grandes avances se han realizado en los últimos tres temas. Sin embargo, la inyección eficaz de las corrientes polarizadas en espín, sigue siendo el principal obstáculo en el desarrollo de los dispositivos semiconductores-espintrónicos. Esta inyección se basa principalmente en dos componentes fundamentales: el tipo de material utilizado para las fuentes de corrientes polarizadas en espín y la intercara (zona de separación) entre estos materiales y los semiconductores.

De los materiales considerados para la construcción de un terminal como fuente de corriente polarizada en espín, la sugerencia es el uso de los metales ferromagnéticos. Estos metales tienen temperaturas de Curie altas, que los hace atractivos como fuentes potenciales. La temperatura de Curie se define como la temperatura a la cual un ferromagneto deja de exhibir acoplamiento de intercambio. En otras palabras, como consecuencia de la agitación térmica la alineación del dipolo magnético del material cesa por encima de la temperatura de Curie. Dado que los dispositivos suelen funcionar a temperaturas por encima de 300 K (temperatura ambiente), es importante tener una temperatura de Curie lo más alta posible para garantizar un buen funcionamiento.

Un problema fundamental con el uso de los metales ferromagnéticos se encuentra en la intercara al semiconductor, la diferencia en las conductividades genera una dispersión espín-flip (cambio en la dirección del espín) la cual efectivamente limita la eficiencia de la inyección de espín. Específicamente, si  $\sigma_N$  es la conductividad del semiconductor y  $\sigma_F$  es la conductividad del metal ferromagneto, el coeficiente de inyección de espín,  $\alpha$  :

$$\alpha \approx \sigma_N / \sigma_F \ll 1 \quad (4)$$

Las predicciones teóricas infieren que la inyección de espín solo se producirá si tanto la conductividad del metal y la del semiconductor son parecidas, o si la corriente que emana el ferromagneto está 100% polarizada. Si no se cumplen ninguna de estas condiciones, la inyección de corriente polarizada en espín al semiconductor suele ser menor del 1%, la cual es insuficiente. Se sugirió que la introducción de una barrera túnel en la intercara, aumentaría la resistencia en la intercara y por consiguiente eliminaría el desfase. Sin embargo, se constato que si el semiconductor en la intercara estaba muy dopado, se desarrollaría una barrera natural que se conoce como barrera-Schottky.

Los contactos de semiconductores magnéticos también son buenos candidatos para las fuentes de corrientes polarizadas en espín. Esto implica el dopaje de un semiconductor no-magnético con materiales ferromagnéticos. Los niveles de dopaje están en el orden de un porcentaje pequeño. Técnicamente, estos son conocidos como Semiconductores Magnéticos Diluidos (DMS). Los átomos dopantes producen momentos magnéticos localizados en la red del semiconductor. Un uso prometedor de los semiconductores ferromagnéticos es su potencialidad como compuertas de potencia ferromagnéticas. Un pequeño voltaje puede ser usado para manipular el estado preferencial del espín, creando así un filtro selectivo del estado de espín que podrían servir como fuente de corriente polarizada en espín.



Actualmente los investigadores están aún tratando de identificar exactamente cómo se comportan los semiconductores ferromagnéticos, con el fin de determinar las condiciones óptimas para la producción de un buen material. De los más prometedores como semiconductor ferromagnético hasta el momento es el Oxido de Titanio dopado con Cobalto ( $\text{Co}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_{2-\delta}$ ). Se ha demostrado que este material presenta una temperatura de Curie de 700 K y una magnetización de saturación alta (Chambers y Farrow, 2003).

Otros materiales prometedores que podrían servir al propósito de fuentes de corrientes polarizadas en espín, incluyen a los óxidos ferromagnéticos semi-metálicos, o simplemente semi-metales, y las aleaciones Heusler. Los semi-metales son ferromagnetos que tienen una estructura de bandas tan inusual, que los electrones en el nivel de Fermi en estos materiales se encuentran en un solo estado de espín particular. Esto significa efectivamente que solo la mitad de los electrones en el material contribuyen a la conducción, creando así una corriente polarizada en espín. Han surgido dificultades en encontrar semi-metales con temperaturas de Curie altas. Un candidato potencial como semi-metal es la magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Coey y Chien, 2003). Las aleaciones Heusler son únicas porque tienen un raro tipo de estructura de red. Ellas tienen la fórmula general  $\text{X}_2\text{YZ}$ , donde X e Y son elementos de transición, y Z es un elemento del grupo III, IV o V (Palmstrom, 2003). Esta estructura de red única origina propiedades similares a los semi-metales, pero incluyen polarizaciones altas en el nivel de Fermi y temperaturas de Curie altas.

Algo que es motivo de preocupación es el cambio brusco en la intercara de las uniones metal/semiconductor y semiconductor-magnético/semiconductor-no-magnético. Aún si los materiales tienen estructuras de red muy parecidas, la unión entre los dos puede tener una estructura de intercara no-ideal que conduce a una disminución en la eficiencia de la inyección de espín. Los átomos del material magnético tienden a migrar hacia el material no-magnético. Los momentos magnéticos locales de estos átomos son orientados al azar con respecto a la polarización original del material. Esto forma una pseudo-barrera que dispersa los electrones y por lo tanto altera su espín, lo que se traduce en una degradación del porcentaje de corriente polarizada en espín inyectada en el semiconductor. Las investigaciones teóricas de por qué se produce esta dispersión se están realizando.

Por otra parte, es conocido que en los semiconductores III-V, los estados de espín de los electrones tienen tiempos de vida muy altos. Sin embargo, no es el caso para los huecos. Esto es lamentable, porque la mayoría de los semiconductores ferromagnéticos III-V conocidos son tipo-p. Esto significa que las vacancias de electrones, o huecos, son los portadores de carga mayoritarios. Para resolver este problema, se ha propuesto que los materiales sean elegidos de manera tal que la intercara envuelva un mecanismo de tunelamiento (Zener o Interbandas). Esto implica una intercara de un semiconductor tipo-p con un semiconductor tipo-n, para formar una especie de unión p-n única. Los electrones de valencia del semiconductor ferromagnético son transferidos a la banda de conducción del semiconductor tipo-n, así como a las bandas dispuestas.

En la heteroestructura de la figura 7, los electrones polarizados en espín se inyectan desde un DMS paramagnético ( $\text{Be}_x\text{Mn}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{Se}$ ) hacia un diodo emisor de luz (LED) de GaAs/AlGaAs, que conduce a la emisión de luz polarizada circularmente, debido a la recombinación de los electrones polarizados en espín con los huecos no polarizados. Una

eficiencia del 90% en la inyección de corriente de espín-polarizado ha sido demostrada en esta estructura. Experimentos similares pero con menor polarización también se han logrado con la inyección de espín desde el ferromagneto GaMnAs y otros metales.

La figura 8 ilustra la física de los dispositivos donde tanto la inyección de espín en los semiconductores como la detección de la información del espín son eléctricas. La situación ideal se da cuando el tiempo de vida del espín es mucho mayor que el tiempo consumido por los portadores en el semiconductor. Como se ilustra en la figura 8 (a-b), una corriente de espín polarizada se transmite fácilmente en la configuración paralela del emisor y el colector, mientras que en la configuración antiparalela origina una acumulación de espín y bloquea la corriente. En el transistor de espín Datta-Das que se muestra en la figura 8 (c), una tensión de entrada (voltaje de compuerta) puede rotar los espines para conmutar el dispositivo entre los dos estados. La figura 8 (d) representa un ejemplo de la versión vertical de ese transmisor con estructura emisor/semiconductor/analizador.

Los dos ejemplos de las figuras 7 y 8 muestran que es posible (Fert y col., 2003), inyectar los espines eléctricamente en heteroestructuras semiconductoras y transformar la información del espín en una señal óptica (figura 7) o eléctrica (figura 8). Esto alisa el camino para dispositivos espintrónicos más avanzados en los que será posible manipular la polarización del espín entre el emisor y el analizador. En tan sólo un poco más de una década, la Espintrónica ha aumentando considerablemente la capacidad de los discos duros y se encuentra lista para entrar en la RAM de los ordenadores. Actualmente, la Espintrónica con Semiconductores tiene el potencial para ganar un lugar importante en la industria de la microelectrónica.

### **La Computación Cuántica y los Qubits**

A lo largo de los años, grandes avances se han hecho en la miniaturización de la computadora. Sin embargo, la idea de cómo funciona un ordenador se ha mantenido relativamente igual. Esto se debe principalmente a que ingenieros y científicos se han limitado a las leyes de la física clásica en su conceptualización de lo que una computadora puede hacer. Como la nanotecnología cobra vida en el futuro próximo, el campo de la mecánica cuántica llegará a dominar las interacciones entre los materiales y los dispositivos de una forma nunca antes vista. Por lo tanto, una revisión de cómo un ordenador puede funcionar debe lograrse, para que la industria de los ordenadores continúe en la senda del crecimiento tecnológico.

Inicialmente, se investigó la manera de lograr las mismas operaciones de la computadora clásica en cara a la mecánica cuántica. Sin embargo, se descubrió que numerosos métodos de funcionamiento de una computadora (no previstos anteriormente) podrían, hipotéticamente, lograrse mediante la utilización de un fenómeno puramente mecánico-cuántico de las partículas individuales y en las colecciones de partículas. Estos métodos, pueden alcanzar niveles de eficiencia mucho mayor que los obtenidos en los equipos clásicos. No solo son los nuevos métodos de operación los que van a salir a la luz, sino nuevas operaciones se están revelando como plausibles para aplicaciones futuras. Estas aplicaciones involucran una generación de números aleatorios, criptografía, comunicaciones no usadas, e incluso el teletransporte de la información.

Algunos algoritmos se han creado para demostrar el potencial de una computadora cuántica. Sin embargo, para desarrollar con éxito una idea de lo que puede ser realizado por un ordenador cuántico, los científicos y técnicos informáticos tendrán que trabajar en el marco de la física cuántica, en lugar de solo la matemática pura. Así que, a fin de iniciar la revolución de la computación cuántica, surge una pregunta: ¿qué sistema mecánico-cuántico representaría la unidad fundamental de la informática? Específicamente, ¿qué representaría un bit?

La idea es el Qubit o bit cuántico, pero el desarrollo matemático implícito en él escapa a nuestro interés en este trabajo. Una descripción del mismo puede encontrarse en la referencia (Sheaff, 2003). Se ha propuesto que un electrón u otra partícula elemental, podría servir como un bit cuántico. Esto es debido a la naturaleza bipolar del estado de espín de una partícula elemental. Así, se pueden representar varios estados con pocos qubits, y sobre ellos realizar procesos en paralelo.

### **A manera de conclusiones**

Antes de avanzar hacia una aplicación tecnológica multifuncional basada en el espín del electrón, se tiene que enfrentar y mejorar aspectos fundamentales como: la formación y medición del espín, la comprensión del transporte de espín en la intercara de un material ferromagnético/semiconductor, encontrar nuevos materiales con ferromagnetismo a temperatura ambiente, controlar y manipular los espines en estructuras ultra-pequeñas (nanoestructuras), así como comprender los sistemas computacionales basados en el espín.

### **Agradecimientos:**

Este trabajo ha sido financiado gracias al CDCHTA-ULA a través del proyecto NURR-C-497-08-05-B.

### **Referencias:**

- BAIBICH M. N., BROTO J. M., FERT A., NGUYEN J., PETROFF F., ETIENNE P., CREUZET G., FRIEDERICH A., CHAZELAS J. (1988). Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters* 61, 2472-2475.
- BINASCH G., GRUNBERG P., SAURENBACH F., ZINN W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B (Condensed Matter)* 39, 4828-4830.
- CARBONE C., ALVARADO S. F. (1987). Antiparallel coupling between Fe layers separated by a Cr interlayer: dependence of the magnetization on the film thickness. *Physical Review B (Condensed Matter)* 36, 2433-2435.
- CHAMBERS S., FARROW R. (2003). New Possibilities for Ferromagnetic Semiconductors. *MRS Bulletin*, 28, No. 10.
- COEY J., CHIEN C. (2003). Half-Metallic Ferromagnetic Oxides. *MRS Bulletin*, 28, No. 10.

- DAS SARMA S. (2001). Spintronics. *American Scientist*, Volume 89, 516-523.
- DAUGHTON J. (2000). NVE Corporation, Magnetoresistive Random Access Memory, [www.nve.com/otherbiz/mram.pdf](http://www.nve.com/otherbiz/mram.pdf).
- DIENY B., SPERIOSU V. S., PARKIN S., GURNEY B. A., WHILHOIT D. R., MAURI D. (1991). Giant magnetoresistance in soft ferromagnetic multilayers. *Physical Review B (Condensed Matter)* 43, 1297-1300.
- FERT A., GEORGE J. M., JAFFRES H., MATTANA R., SENEOR P. (2003). The new era of spintronics. *Europhysics News*.
- FULLERTON E. E., KELLY D. M., GUIMPEL J., SCHULLER I. K., BRUYNSERAEDE Y. (1992). Roughness and giant magnetoresistance in Fe/Cr superlattices. *Physical Review Letters* 68, 859-862.
- GRUNBERG P., SCHREIBER R., PANG Y., BRODSKY M. B., SOWERS H. (1986). Layered magnetic structures: evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. *Physical Review Letters* 57, 2442-2445.
- JONKER B. T., ERWIN S. C., PETROU A., PETUKHOV A. G. (2003). Electrical Spin Injection and Transport in Semiconductor Spintronic Devices. *MRS Bulletin*, 28, No. 10.
- PALMSTROM C. (2003). Epitaxial Heusler Alloys: New Materials for Semiconductor Spintronics. *MRS Bulletin*, 28, No. 10.
- SHEAFF C. (2003). An Overview of Spintronics. University of Nebraska-Lincoln, NE USA.
- THEODOROPOULOU N. (2002). Tesis Doctoral, Chapter 1: Introduction to Giant Magnetoresistance (GMR). Universidad de Florida.
- WOLF S. A., AWSCHALOM D. D., BUHRMAN R. A., DAUGHTON J. M., VON MOLNÁR S., ROUKES M. L., CHTCHELKANOVAA. Y., TREGER D. M. (2001). Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future. *Science* 294, 1488.

**Figuras:**

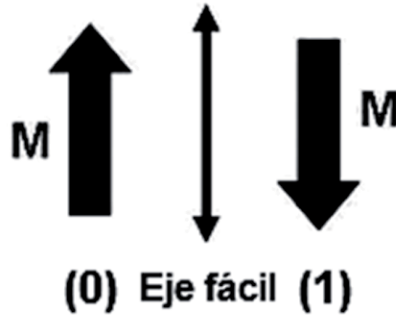


Figura 1: Ilustración de las orientaciones estables de la magnetización en un material magnético con un eje fácil, respecto a un campo magnético aplicado.

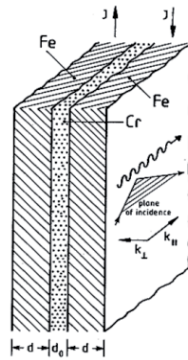


Figura 2: Doble capa ferromagnética con alineamiento antiparalelo de las magnetizaciones.

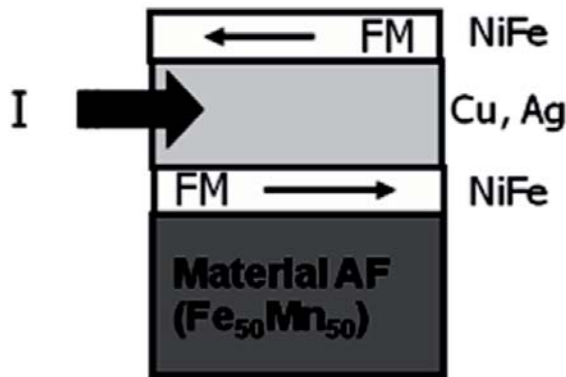


Figura 3: La válvula de espín, primer dispositivo espintrónico basado en GMR.

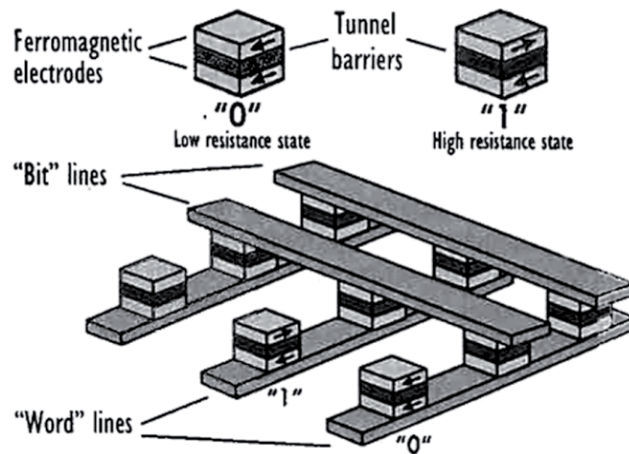


Figura 4. Superior: celdas de memoria de una MRAM (cada celda es una MTJ). Inferior: esquema de una MRAM construida de MTJ conectadas entre sí en una matriz de puntos de contacto (Fert y Col., 2003).

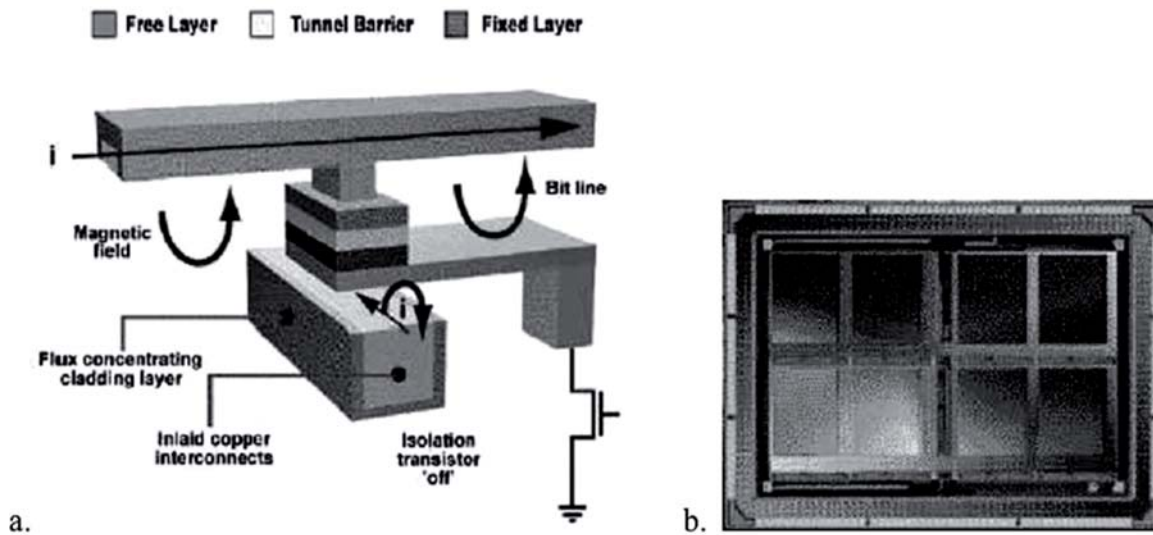


Figura 5: Tecnología desarrollada por Motorola. (a) Celda MTJ-MRAM. (b) Chip MRAM4Mbit.

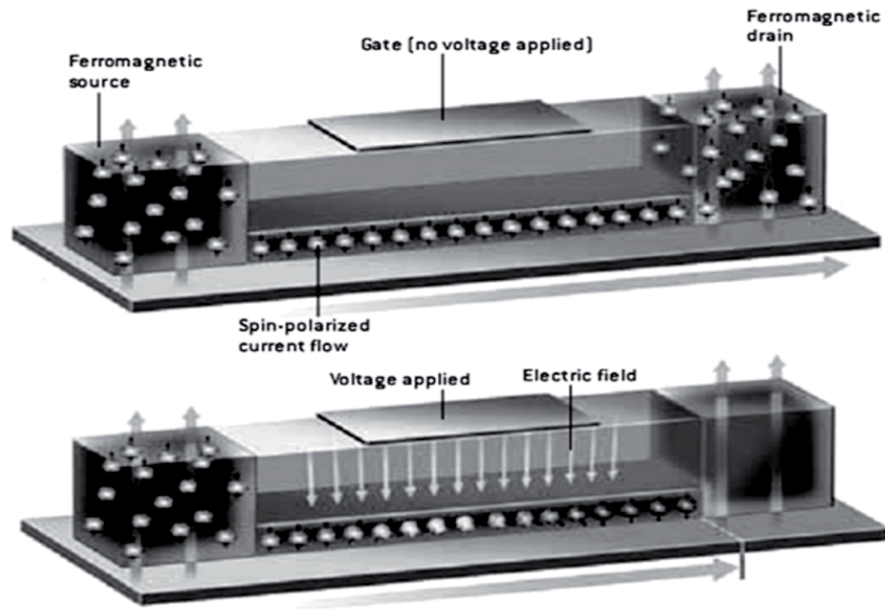


Figura 6: Concepto del FET-espín.

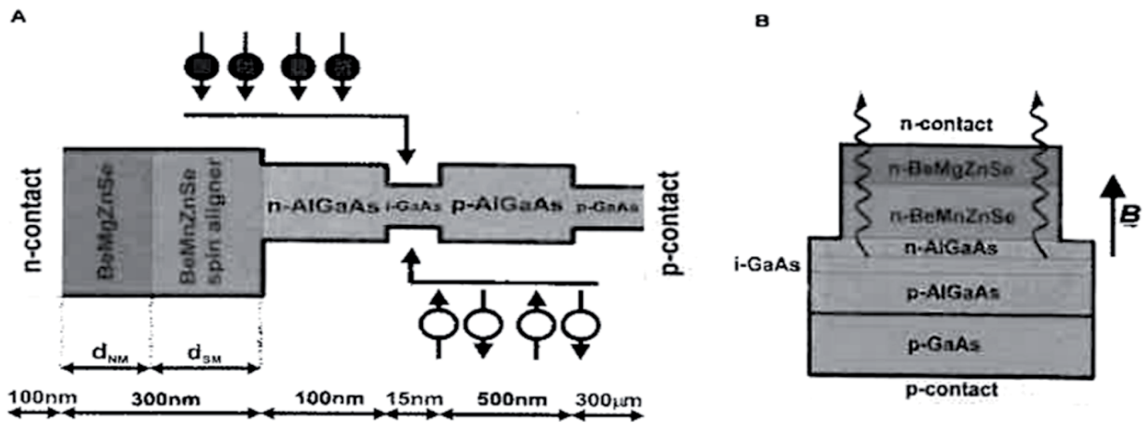


Figura 7: Concepto del Diodo Emisor de Luz de Espín (LED-Espín)

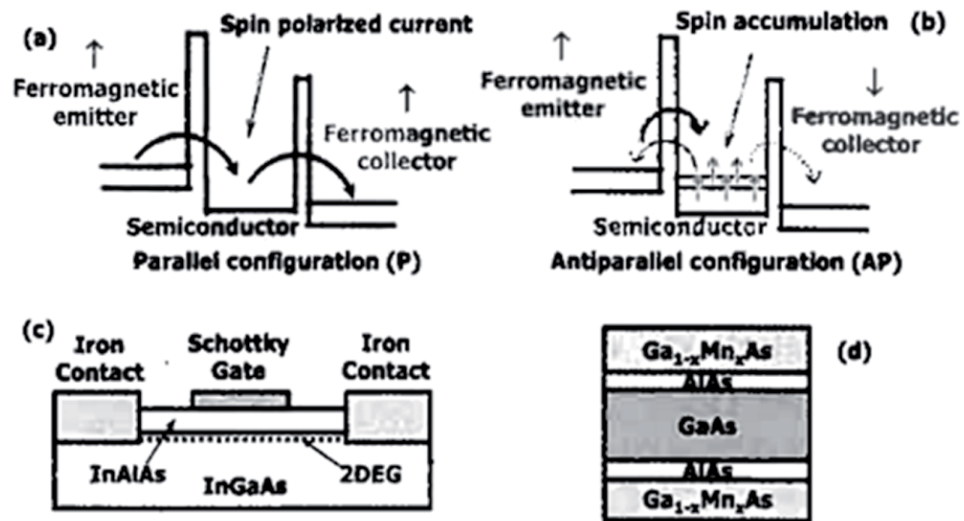


Figura 8: Inyección y detección del espín en forma eléctrica.