



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Diseño e implementación de un sistema de medida de propiedades termoeléctricas y de transporte de spin

Damián Alfonso Melo Valenzuela
Director: Carlos García García

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. DEPARTAMENTO DE FÍSICA.
LIC. EN FÍSICA
VALPARAÍSO, CHILE.

17 de abril de 2024

Resumen

La Magnetorresistencia Gigante, o GMR, es un fenómeno físico de vital importancia en el ámbito de la tecnología contemporánea. Es ampliamente empleado en una variedad de sensores de campo magnético, destacando su aplicación como cabezas de lectura en dispositivos de almacenamiento como los discos duros. El efecto GMR está principalmente presente en películas delgadas conformadas por capas alternadas de materiales ferromagnéticos y no magnéticos, el fenómeno se manifiesta en la variación de la resistencia eléctrica del material ante la presencia de un campo magnético externo.

El objetivo primordial de este proyecto fue el diseño y construcción de un dispositivo de medición automatizado capaz de detectar cambios en la resistencia de películas delgadas cuando estas son expuestas a campos magnéticos externos generados por electroimanes. Para garantizar una medición precisa de dichos cambios en la resistencia, se implementó un sistema de contacto con la película delgada mediante un cabezal de cuatro puntas en una probe station. Posteriormente, se procedió a la caracterización de pseudo válvulas de spin compuestas por capas de Co(10 nm)/Cu/CoFeB(10 nm), variando el espesor de la capa de Cu. Se compararon los resultados obtenidos de sus curvas GMR con sus respectivas curvas de histéresis y se estudió la dependencia del ancho del espaciador de Cu en la amplitud del GMR. Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente.

Abstract

Giant Magnetoresistance (GMR) is a pivotal physical phenomenon in contemporary technology, extensively employed in various magnetic field sensors, notably as reading heads in storage devices like hard disk drives. This effect primarily occurs in thin films composed of alternating layers of ferromagnetic and non-magnetic materials, resulting in a variation in the material's electrical resistance in response to an external magnetic field.

The primary objective of this project was to design and construct an automated measurement device capable of detecting changes in the resistance of thin films when exposed to external magnetic fields generated by electromagnets. To ensure precise measurement of these resistance changes, a contact system with the thin film was implemented using a four-point probe head in a probe station. Subsequently, pseudo spin valves composed of Co(10 nm)/Cu/CoFeB(10 nm) layers were characterized, with the thickness of the Cu layer being varied. The results obtained from their GMR curves were compared with their respective hysteresis, and the dependence of the Cu spacer width on the GMR amplitude was studied. All measurements were conducted at room temperature.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a todas las personas que han contribuido al desarrollo de este experimento y cuyo esfuerzo y apoyo fueron fundamentales para la realización de esta tesis. Especialmente quiero expresar mi gratitud a Francisco Álamos y los miembros del grupo de magnetismo aplicado y spintrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM): Fernando Soto, Ignacio Radic, Cristian Romanque, Paul Carvajal y Carlos García. Su dedicación, orientación y colaboración fueron indispensables en cada etapa de este proyecto, y su conocimiento y experiencia fueron invaluable para la consecución de los resultados presentados en este trabajo. Su apoyo ha sido un pilar fundamental y estoy profundamente agradecido por su ayuda y compromiso.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Orígenes	9
1.2. Objetivo	9
2. Marco Teórico	11
2.1. Ferromagnetismo y aportes energéticos	11
2.1.1. Interacción de intercambio (exchange)	11
2.1.2. Anisotropía	11
2.1.3. Energía de Zeeman	12
2.1.4. Energía dipolo-dipolo	12
2.1.5. Interacción de Exchange entre multicapas	12
2.2. Curvas de histeresis	13
2.2.1. Magnetómetro de gradiente alterno (AGM)	13
2.2.2. Magnetómetro de muestras vibratorias (VSM)	14
2.3. Magnetoresistencia gigante	14
2.4. Fenómeno relacionado al GMR	15
2.5. Estructuras que exhiben GMR	16
2.5.1. Válvulas de espín	16
2.5.2. Pseudo válvulas de espín	17
2.5.3. Configuraciones CIP y CPP	17
2.6. Aplicaciones	17
2.6.1. Cabezas de lectura GMR	17
2.6.2. MRAM	18
2.6.3. Biosensores basados en GMR	19
3. Métodos	21
3.1. Aparato experimental	21
3.2. Software	23
3.2.1. Configuración campo AC	24
3.2.2. Configuración campo DC	24
3.2.3. Procesamiento y corrección de Drift	27
4. Resultados	28
4.1. Curvas GMR de las muestras Co(10nm)/Cu/CoFeB(10nm)	28
5. Conclusiones	32

6. Trabajo Futuro	33
6.1. Medición curvas de histéresis usando AGM	33
6.2. Medición de Spin Seebeck	34
6.2.1. Antecedentes en la medición de spin seebeck con análisis armónico	34
6.2.2. Métodos Propuestos	34
Bibliografía	37

Índice de figuras

2.1. Interacción de exchange entre capas FM separadas por una capa NM. La curva de la izquierda muestra el cambio de la constante de exchange (J) en función del grosor del NM (D), mostrándose el comportamiento oscilatorio y las transiciones entre acoples FM/AF.	13
2.2. Curva de histeresis de un material ferromagnetico.	13
2.3. Foto esquemática de un Magnetómetro de gradiente alterno (AGM).	14
2.4. Foto esquemática de un Magnetómetro de muestras vibratorias (VSM).	15
2.5. Medidas de magnetoresistencia gigante a 4.2°K de multicapas de Fe/Cr. Si $H > H_s$ o $H < -H_s$ ambas capas estarán alineadas con el campo magnético externo y la resistencia sera mínima, mientras que para campos pequeños ambas capas están antialineadas y la resistencia es máxima. Baibich et al. 1988.	15
2.6. Representación esquemática del GMR se muestra utilizando un modelo simple de red de resistencias. El GMR ocurre cuando se cambia la orientación relativa de las capas magnéticas, generalmente inducida por la aplicación de un campo magnético. Thomson et al. 2008.	16
2.7. Válvula de spin con efecto GMR. La capa FM inferior esta fijada por el AF. La resistencia es menor cuando ambas capas FM están alineadas y mayor si están anti-alineadas.	17
2.8. Pseudo válvula de spin con efecto GMR. La capa FM inferior tiene una mayor campo coercitivo, permitiendo el cambio de la orientación de la magnetización del FM blando sin influir substancialmente en la magnetización de la capa FM dura. La resistencia es menor cuando ambas capas FM están alineadas y mayor si están anti-alineadas.	17
2.9. Figuras esquemáticas de elementos del disco duro para el proceso de escritura/lectura. Childress et al. 2005.	18
2.10. Figura esquemática de una posible estructura MRAM. Thompson et al. 2008.	19
2.11. Aplicaciones del sensores GMR en biomedicina. Wu et al. 2022.	20
3.1. Foto esquemática del aparato experimental.	21
3.2. Probe Station en una toma de datos.	22
3.3. Foto cabeza de cuatro puntas.	22
3.4. (a) Electroimán y (b) Uniformidad del campo magnético producido.	23
3.5. (a) Panel frontal y (b) diagrama de bloque de labview para medir en la configuración de los electroimanes alimentados por un voltaje AC.	25
3.6. (a) Panel frontal y (b) diagrama de bloque de labview para medir en la configuración de los electroimanes alimentados por un voltaje DC.	26
3.7. Programa de Mathematica utilizado para corregir los problemas de drift, centrar las curvas respecto al campo magnético y generar las curvas de la señal GMR $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow\uparrow}}$	27

4.1.	Curvas GMR de las muestras $\text{Co}(10\text{nm})/\text{Cu}(t_{\text{Cu}})/\text{CoFeB}(10\text{nm})$ con espesores de Cu $t_{\text{Cu}} = \{1, 3, 5, 8\text{nm}\}$ para sus ejes fácil y difícil. Los puntos negros representan los datos obtenidos experimentalmente, mientras que las líneas negras conectan los puntos previos y posteriores de cada medición.	29
4.2.	Las curvas de histéresis normalizadas en el plano de las tricapas de $\text{Co}(10\text{nm})/\text{Cu}(t_{\text{Cu}})/\text{CoFeB}(10\text{nm})$ y grosores de la lamina de Cu t_{Cu} de (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 5 y (e) 8 nm. Los círculos negros y las líneas rojas representan los datos medidos desde las direcciones de magnetización dura y fácil, respectivamente. Wei et al. (2024).	30
4.3.	(a) Magnetorresistencia de saturación transversal (4.5 K) y (b) campo de saturación (4.5 K) vs el grosor de la capa de Cr para tres series de estructuras de la forma $\text{Si}(111)/(100 \text{ \AA}) \text{Cr}/[(20 \text{ \AA}) \text{Fe}/t_{\text{c}}, \text{Cr}]/[(50 \text{ \AA}) \text{Cr}]$, depositadas a temperaturas de 30 °C, 40 °C y 125 °C, respectivamente. Parkin et al. (1989).	31
4.4.	Amplitud GMR longitudinal vs grosor de la capa de aluminio en muestra $\text{Si}(100)/\text{Co}(12\text{nm})/\text{Al}(d_{\text{Al}})/\text{Co}$ tomadas a temperatura ambiente. Russo et al. (2007).	31
6.1.	Foto de magnetómetro de gradiente alterno (AGM) grupo de magnetismo aplicado y espintrónica USM.	33
6.2.	Ilustración del sistema que produce el efecto spin seebeck en una muestra de YIG/Pt. (a) La vista en el plano yz muestra la disposición de los reservorios térmicos, los cuales generan el gradiente térmico necesario para inducir el SSE. En la vista en perspectiva, podemos observar la muestra de YIG/Pt sandwiched entre dos reservorios térmicos, los cuales están en contacto directo con la muestra. El campo magnético externo se aplica paralelo al eje x y varía sinusoidalmente con frecuencia f .(b) La vista en el plano xy del montaje, centrada en la capa de Pt, muestra una representación de la magnetización M, el campo magnético aplicado H y el ángulo θ azimutal entre el campo magnético y la dirección x, el ángulo entre EISHE y el eje y también es θ . Romanque et al. 2020.	34
6.3.	Foto esquemática del aparato experimental para medir Spin Seebeck.	35
6.4.	Ejemplo de vector magnet previamente diseñado.	35

Capítulo 1

Introducción

1.1. Orígenes

La Magnetorresistencia Gigante fue descubierta de manera independiente en 1988 por dos destacados científicos europeos: Peter Andreas Grünberg del Centro de Investigación de Jülich en Alemania [1] y Albert Fert de la Universidad de París-Sud [2]. Sus hallazgos innovadores en este campo les valieron el reconocimiento con el Premio Nobel de Física en 2007.

En sus investigaciones iniciales, el equipo de Peter Andreas Grünberg se centró en el estudio de una tricapa Fe/Cr/Fe. Sus resultados experimentales revelaron una reducción del 1,5 % en el valor de la resistencia eléctrica. Por otro lado, el equipo de Albert Fert se enfocó en materiales multicapa, principalmente Fe/Cr, logrando una impresionante disminución del 50 % en el valor de la resistencia.

Andreas Grünberg y el Centro de Investigación de Jülich obtuvieron una patente para la tecnología de magnetorresistencia gigante. Además, su artículo original fue presentado ligeramente antes que el de Fert, sin embargo, la publicación de Fert llegó antes a la comunidad científica. Mientras que Fert describió con precisión los principios físicos detrás del fenómeno de la magnetorresistencia gigante, Andreas Grünberg reconoció rápidamente la importancia de esta tecnología en aplicaciones técnicas, marcando el inicio de una nueva era en la investigación de materiales y dispositivos electrónicos.

Los investigadores de distintas empresas, como IBM, pronto se dieron cuenta de la importancia del GMR para los discos duros y presentaron la primera cabeza de lectura GMR en 1997, la cual prontamente empezó a reemplazar a las cabezas basadas en la magnetorresistencia anisotrópica (AMR). Este tipo de cabeza de lectura, es ampliamente utilizado hoy en día, y ha permitido un gigantesco aumento en el almacenamiento de información en discos magnéticos en los últimos años. La mayor sensibilidad y precisión de las cabezas de lectura GMR han sido clave para el desarrollo de discos duros de mayor capacidad y rendimiento, contribuyendo significativamente al avance tecnológico en el campo del almacenamiento de datos.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de esta tesis es diseñar y construir un dispositivo capaz de medir el efecto GMR en diversas estructuras. En particular, se investigará este fenómeno en pseudo válvulas de espín compuestas por $\text{Co}(10\text{nm})/\text{Cu}/\text{CoFeB}(10\text{nm})$ para diferentes espesores de Cu. El proceso de fabricación y, caracterización de las propiedades estáticas y dinámicas de estas muestras se detallaron en el estudio realizado por [3].

Se espera que esta investigación sienta las bases para futuros desarrollos de dispositivos destinados a medir otros fenómenos de transporte de espín, como el efecto Spin Seebeck. Además, se busca

que este estudio contribuya a la caracterización de sensores desarrollados en el laboratorio para investigaciones posteriores, ampliando así nuestro conocimiento sobre las propiedades magnéticas y las aplicación de materiales en el campo de la spintrónica.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ferromagnetismo y aportes energéticos

Los materiales ferromagnéticos exhiben una magnetización espontánea en ausencia de un campo magnético externo. Este fenómeno se origina debido a diversas contribuciones energéticas que afectan a los espines de los electrones en el material. Estas contribuciones energéticas provienen de fenómenos variados, tales como la interacción spin-spin, la estructura cristalina y la interacción de los momentos magnéticos con el campo externo, entre otros.

2.1.1. Interacción de intercambio (exchange)

La interacción de intercambio tiene raíces cuánticas vinculadas al principio de exclusión de Pauli. En materiales ferromagnéticos y antiferromagnéticos, esta interacción se manifiesta como una energía de corto alcance que promueve el alineamiento o el antialineamiento entre los spines adyacentes. La energía de intercambio en un sistema ferromagnético se describe mediante la ecuación 2.1, donde la suma contribuye solo cuando los spines S_i y S_j son vecinos. Si el material es ferromagnético, la constante $J < 0$ favorece el alineamiento; en cambio, si $J > 0$, el material es antiferromagnético y se favorece el antialineamiento de los spines vecinos.

$$E_{ex} = \sum_{ij} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j = \sum_{vecinos} J \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2.1)$$

2.1.2. Anisotropía

La anisotropía magnética es una energía que promueve la alineación de los momentos magnéticos en direcciones específicas del espacio, conocidas como ejes fáciles de imanación. Diversos tipos de anisotropías están presentes en películas delgadas ferromagnéticas como las usadas en las estructura que exhiben GMR, por lo que comprender estos aportes resulta crucial para un análisis adecuado de los resultados obtenidos.

1. Anisotropía Magnetocristalina: Esta característica se presenta en materiales ferromagnéticos debido a la fuerte influencia de la estructura cristalina en los orbitales de los electrones. Como resultado, los electrones tienden a alinear sus momentos magnéticos a lo largo de ejes favorables determinados por la cristalografía del material. En este trabajo, la anisotropía magnetocristalina de especial relevancia es la uniaxial en el plano, la cual favorece un eje fácil dentro del plano de la estructura. Su densidad energética está dada por:

$$w_u = -K_i \sin^2(\theta_i) \cos^2(\phi_i - \delta) \quad (2.2)$$

Donde θ_i y ϕ_i son el ángulo polar y respecto al eje x en el plano respectivamente, δ representa el ángulo favorable dentro del plano.

2. Anisotropía de forma: Esta anisotropía surge debido a la forma particular del material ferromagnético. Es una consecuencia directa de la energía dipolar, que provoca que los dominios magnéticos tiendan a alinearse con la superficie del material cuando están cerca de esta. Por ejemplo, en una película delgada, esta anisotropía puede ocasionar que los dominios magnéticos se ubiquen en el plano de la película. En modelos donde la energía dipolar no se considera, se puede tomar en cuenta la energía de la anisotropía de forma. Para una película delgada sin espesor y con lados infinitos en el límite continuo, esta energía está dada por:

$$E_{shape} = -2\pi M_i^2 \sin^2 \theta_i \quad (2.3)$$

2.1.3. Energía de Zeeman

Se le llama energía de Zeeman a la energía producto de la interacción entre los momentos magnéticos y el campo magnético externo, donde los momentos se ven favorecidos energéticamente alineándose a este. Es igual a:

$$E_{Zeeman} = - \sum_i \vec{S}_i \cdot \vec{B}_{ext} \quad (2.4)$$

2.1.4. Energía dipolo-dipolo

La energía de interacción entre 2 dipolos magnéticos viene dada por:

$$H = -\frac{\mu_0}{4\pi|\mathbf{r}|^3} [3(\mathbf{m}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}})(\mathbf{m}_2 \cdot \hat{\mathbf{r}}) - \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2] - \mu_0 \frac{2}{3} \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2 \delta(\mathbf{r}), \quad (2.5)$$

A diferencia de la interacción de intercambio, la energía dipolo-dipolo es de largo alcance. Esta energía es responsable de la formación de los dominios magnéticos en materiales ferromagnéticos, así como de la generación de vórtices magnéticos, entre otros fenómenos.

2.1.5. Interacción de Exchange entre multicapas

Las capas de materiales magnéticos separadas por materiales no magnéticos están acopladas a través de la interacción de exchange entre capas [4]. En materiales ferromagnéticos, esta interacción favorecerá alineamientos ferromagnéticos (FM) o antiferromagnéticos (AF) entre las magnetizaciones de las capas, dependiendo del grosor del material no magnético. En otros casos, puede favorecer el alineamiento de ambas magnetizaciones en cierto ángulo ϕ . El alineamiento FM o AF en las multicapas ferromagnéticas oscila dependiendo del grosor del material NM [5], como se aprecia en la Figura 2.1. El origen de la interacción de exchange entre capas FM separadas por una capa NM está relacionado con la interacción RKKY [6], que predice la oscilación de la interacción de exchange, permitiendo obtener acoplamientos FM o AF en una capa variando el espesor del NM.

En una tricapa compuesta por dos materiales FM separados por un NM, la energía de interacción entre las capas puede ser descrita fenomenológicamente por:

$$E_{interlayer} = -J_1 \frac{\vec{M}_a \cdot \vec{M}_b}{M_a M_b} - J_2 \left(\frac{\vec{M}_a \cdot \vec{M}_b}{M_a M_b} \right)^2 \quad (2.6)$$

Donde \vec{M}_a y \vec{M}_b son los vectores de la magnetización total de las capas a y b y, J_1 y J_2 son los aportes del exchange bilineales y bicuadráticos respectivamente. Si J_1 es el aporte dominante, la interacción entre las capas favorece alineaciones FM o AF para $J_1 > 0$ y $J_1 < 0$ respectivamente, si J_2 es dominante y negativo se favorecen alineaciones perpendiculares entre \vec{M}_a y \vec{M}_b .

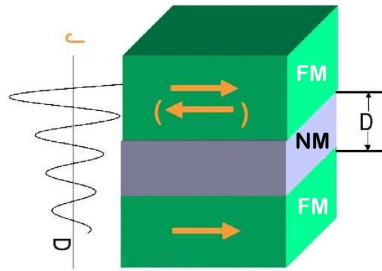


Figura 2.1: Interacción de exchange entre capas FM separadas por una capa NM. La curva de la izquierda muestra el cambio de la constante de exchange (J) en función del grosor del NM (D), mostrándose el comportamiento oscilatorio y las transiciones entre acoples FM/AF.

2.2. Curvas de histeresis

En materiales ferromagnéticos, la relación entre la magnetización del material y el campo magnético externo dependerá de la historia de la magnetización del material. Dada esta complicación, existen distintos métodos para medir esta relación, como las curvas de histéresis o las curvas FORC.

En la Figura 2.2 se aprecia una curva de histéresis característica de un material ferromagnético. En estas, se parte aplicando un campo magnético muy grande en cierta dirección, la cual magnetiza totalmente el material (M_s). Luego, se reduce el campo hasta que llega a cero, donde queda cierta magnetización residual (M_r). Para que la magnetización llegue a cero, es necesario aplicar un campo magnético (H_c) en el sentido opuesto al inicial.

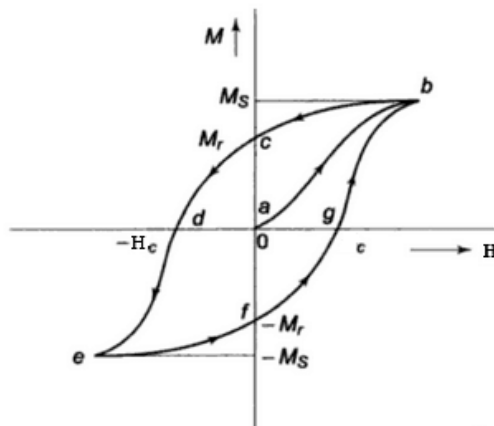


Figura 2.2: Curva de histeresis de un material ferromagnético.

2.2.1. Magnetómetro de gradiente alterno (AGM)

Existen distintos métodos para la medición de curvas de histéresis, entre los cuales destacan la magnetometría por inducción, magnetometría MOKE, el Vibrating-sample magnetometer (VSM) y el Magnetómetro de gradiente alterno (AGM), entre muchos otros.

La Figura 2.4 consiste en una foto esquemática de un magnetómetro de gradiente alterno. El método AGM se basa en aplicar un campo magnético uniforme que magnetiza una muestra sujeta a una pieza piezoeléctrica. Además, se genera un pequeño gradiente de campo magnético, lo que produce una fuerza sobre la muestra. Esta fuerza deforma la pieza piezoeléctrica produciendo una diferencia de voltaje medible, la cual será proporcional a la fuerza ejercida sobre la muestra, la

cual, a su vez, es proporcional a la magnetización de la muestra medida. De esta manera, aplicando distintos campos magnéticos, se pueden obtener las curvas de histéresis.

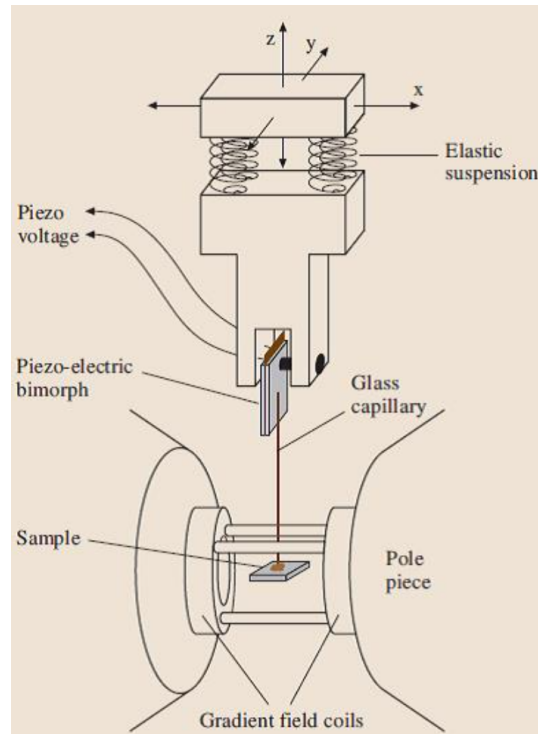


Figura 2.3: Foto esquemática de un Magnetómetro de gradiente alterno (AGM).

2.2.2. Magnetómetro de muestras vibratorias (VSM)

La Figura 2.4 consiste en una foto esquemática de un Magnetómetro de muestras vibratorias (VSM). En el método VSM, primero, se coloca una muestra en un campo magnético constante y, si la muestra es magnética, alineará su magnetización con el campo externo. El momento dipolar magnético de la muestra crea un campo magnético que cambia en función del tiempo a medida que la muestra se mueve hacia arriba y hacia abajo. El campo magnético alternante induce un campo eléctrico en las bobinas de captación del VSM a través de la Ley de Faraday. La corriente es proporcional a la magnetización de la muestra. De esta manera, aplicando distintos campos magnéticos, se pueden obtener las curvas de histéresis.

2.3. Magnetoresistencia gigante

La magnetoresistencia gigante (GMR) [7] [8] es un fenómeno observado en tricapas o multicapas alternadas de materiales ferromagnéticos (FM) y metales no ferromagnéticos (NM), se manifiesta como un cambio significativo de su resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético externo. Este fenómeno se debe a que la resistencia eléctrica dependiera de las orientaciones de las magnetizaciones de las capas ferromagnéticas, lográndose una menor resistividad si estas están alineadas y una mayor si están antialineadas, como se observa en la fig 2.5 [2], la cual corresponde a las curvas GMR obtenidas por el grupo de Fert en multicapas de Fe/Cr, el comportamiento es muy similar a la histéresis magnética, teniéndose una mayor resistividad en la zona de transición, donde las capas no están alineadas y una resistividad mínima en la saturación, donde las capas

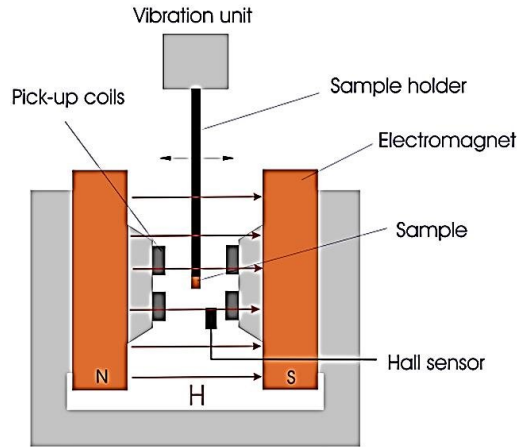


Figura 2.4: Foto esquemática de un Magnetómetro de muestras vibratorias (VSM).

están alineadas.

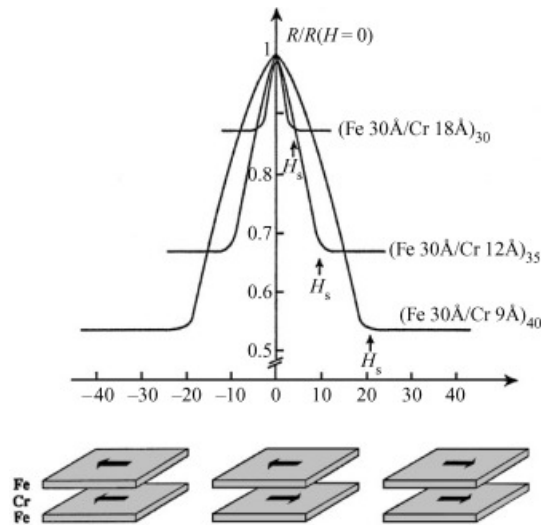


Figura 2.5: Medidas de magnetoresistencia gigante a 4.2°K de multicapas de Fe/Cr. Si $H > H_s$ o $H < -H_s$ ambas capas estarán alineadas con el campo magnético externo y la resistencia será mínima, mientras que para campos pequeños ambas capas están antialineadas y la resistencia es máxima. Baibich et al. 1988.

La amplitud de el efecto GMR dependerá de los materiales y el grosor de las capas que conforman las estructuras, por lo que suele describirse cuantitativamente a través del cambio relativo de la resistencia:

$$GMR = \frac{\Delta R}{R_{\uparrow\uparrow}} = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}} \quad (2.7)$$

donde $R_{\uparrow\uparrow}$ y $R_{\uparrow\downarrow}$ son las resistencias con las magnetizaciones de las capas FM alineadas y antialineadas respectivamente.

2.4. Fenómeno relacionado al GMR

Los orígenes de GMR se encuentran en la dispersión dependiente del espín experimentada por los electrones que se transportan en materiales ferromagnéticos [9]. En este fenómeno, las corrientes

con distintas polarizaciones que atraviesan un material magnetizado se dispersarán en distintas cantidades. La dispersión dependiente del espín se explica debido a la estructura de bandas de los materiales ferromagnéticos en la energía de Fermi, que no es igual para electrones con spin up o down. Esto implica que sus densidades de estados sean distintas y, por lo tanto, tengan distintas dispersiones y resistividades.

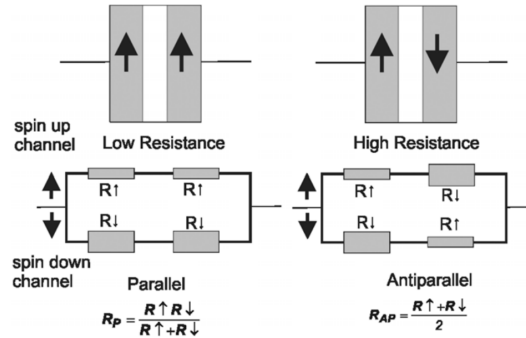


Figura 2.6: Representación esquemática del GMR se muestra utilizando un modelo simple de red de resistencias. El GMR ocurre cuando se cambia la orientación relativa de las capas magnéticas, generalmente inducida por la aplicación de un campo magnético. Thomson et al. 2008.

Esta diferencia en las dispersiones para corrientes con distintas polarizaciones puede ser aprovechada en una estructura tricapa FM/NM/FM, como se muestra en la Figura 2.6. En los modelos de red de resistencias, se considera que las corrientes con spin up y spin down pueden ser representadas por dos circuitos paralelos, donde las resistencias de las capas FM para cada corriente actúan como resistores.

Cuando ambas capas FM están alineadas, las corrientes exhiben dispersiones muy distintas. La corriente que experimenta un mayor scattering tendrá una resistencia considerable, mientras que la otra corriente presentará una resistencia mucho menor y transportará la mayor parte de la carga. En este escenario, el circuito total (compuesto por las corrientes up y down) experimentará la menor resistencia posible.

En contraste, cuando las capas FM están antialineadas, cada corriente se dispersa en una de las capas, lo que significa que ningún canal proporciona un camino con baja resistencia. En consecuencia, la resistencia total del circuito será mayor que en el caso de las capas FM alineadas.

2.5. Estructuras que exhiben GMR

2.5.1. Válvulas de espín

Las válvulas de espín [8] son muestras que exhiben el efecto GMR. Como se ve en la Figura 2.7, están compuestas por dos capas de materiales ferromagnéticos (como Fe, Co o Py) separadas por una capa de un material conductor y no magnético (como Cr o Cu), que reduce la interacción de intercambio entre las capas ferromagnéticas. En ocasiones, se deposita una capa de un material antiferromagnético (como FeMn o NiO) adyacente a una capa ferromagnética, lo que produce una interacción de exchange bias en la capa ferromagnética adyacente, fijando su dirección de magnetización. La capa ferromagnética no fijada (no adyacente al AF) puede cambiar fácilmente su dirección de magnetización, lo que permite un alineamiento o anti-alineamiento de las magnetizaciones con la capa fijada, produciendo así el efecto GMR.

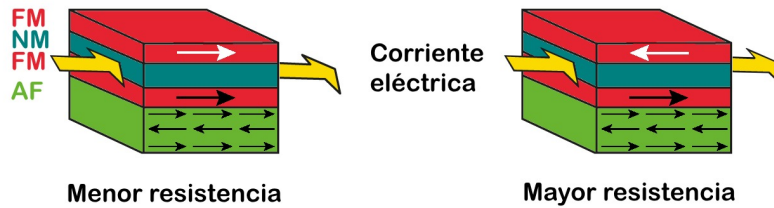


Figura 2.7: Válvula de spin con efecto GMR. La capa FM inferior está fijada por el AF. La resistencia es menor cuando ambas capas FM están alineadas y mayor si están anti-alineadas.

2.5.2. Pseudo válvulas de espín

Las pseudo válvulas de espín se observan en la Figura 2.8. Son muestras compuestas por dos materiales ferromagnéticos con distintas coercitividads, separados por una capa de un conductor no magnético, que altera la interacción de intercambio entre las capas ferromagnéticas, disminuyendo la amplitud del acople ferromagnético o generando una interacción antiferromagnética. Generalmente, una capa ferromagnética es dura y la otra blanda, lo que permite que la capa blanda cambie fácilmente su magnetización y que exista un ángulo entre las magnetizaciones de ambas capas, generando así el efecto GMR.

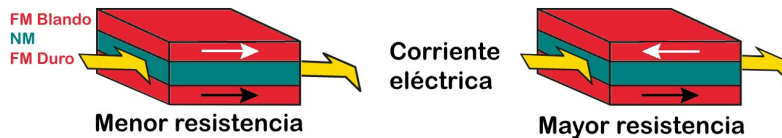


Figura 2.8: Pseudo válvula de spin con efecto GMR. La capa FM inferior tiene una mayor campo coercitivo, permitiendo el cambio de la orientación de la magnetización del FM blando sin influir substancialmente en la magnetización de la capa FM dura. La resistencia es menor cuando ambas capas FM están alineadas y mayor si están anti-alineadas.

2.5.3. Configuraciones CIP y CPP

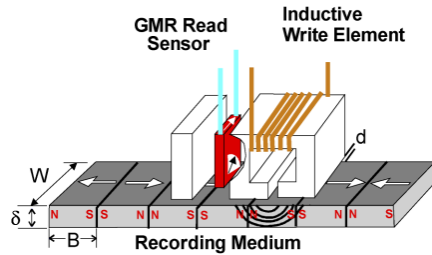
El flujo de corriente en las válvulas de espín puede ser hacia afuera o a través del plano, dependiendo de la ubicación de sus terminales. En este trabajo, nos centraremos en el efecto GMR con corriente en el plano (CIP GMR).

2.6. Aplicaciones

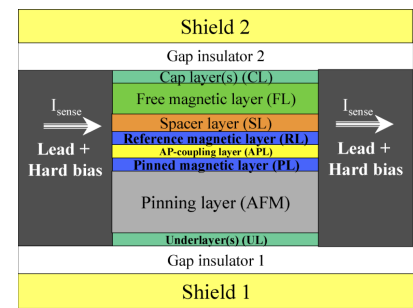
El gran cambio de la resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético en materiales con efecto GMR puede ser aprovechado en la fabricación de sensores de campo magnético. Los sensores basados en el efecto GMR son usados en diversas aplicaciones, entre las más notables destacan las cabezas de lectura de bits en los discos duros, la MRAM (magnetoresistive random acces memory) y como biosensores para aplicaciones biomédicas.

2.6.1. Cabezas de lectura GMR

Los discos duros son dispositivos de almacenamiento de datos que utilizan dominios magnéticos en una delgada película ferromagnética con forma de disco para guardar la información. Para la lectura de estos datos, se emplean sensores de campo magnético basados en el efecto GMR [9].



((a)) Figura esquemática del proceso de escritura/lectura longitudinal.



((b)) Figura esquemática de un típico sensor CIP GMR usado en el cabezal de lectura visto desde la superficie del disco.

Figura 2.9: Figuras esquemáticas de elementos del disco duro para el proceso de escritura/lectura. Childress et al. 2005.

Childress et al. (2005) [10] explican que en el proceso de grabación y lectura de información en un disco duro con anisotropía uniaxial en el plano, se pueden distinguir dos partes fundamentales, como se muestra en la Figura 2.9(a). En primer lugar, está el elemento de escritura, encargado de aplicar un campo magnético sobre el disco para orientar sus dominios magnéticos, los cuales representan los bits de datos, ya sea 0 o 1, como se ilustra en los bits longitudinales de la Figura 2.9(a). La segunda parte es el sensor GMR de campo magnético, que, al estar en contacto con el campo magnético de cada bit, orientará la magnetización de su capa libre en la dirección del campo, lo que resulta en diferentes valores de resistencia para los bits 0 y 1. De esta manera, se puede leer la información almacenada en el disco duro. La Figura 2.9(b) es una figura esquemática de un típico lector de información con estructura GMR.

2.6.2. MRAM

Hasta el día de hoy, se están llevando a cabo importantes esfuerzos en el desarrollo de la memoria de acceso aleatorio magnetorresistiva (MRAM) [9]. Esta tecnología compite directamente con las memorias de acceso directo basadas en semiconductores, como la SRAM y la DRAM, debido a sus posibles ventajas en términos de no volatilidad de la información y menor consumo energético.

La RAM (memoria de acceso aleatorio) es fundamental en la computación moderna, ya que proporciona un almacenamiento de corto plazo para la información utilizada por los programas y procesos en ejecución. La mayoría de las memorias, como la DRAM, emplean semiconductores para almacenar la información, utilizando celdas formadas por capacitores o transistores. Sin embargo, en esta tecnología, cada bit de información se desvanece en cuestión de segundos, lo que requiere un suministro continuo de energía para recargar los bits y mantener la información almacenada. Otras tecnologías, como la SRAM, ofrecen una mayor estabilidad para sus bits en comparación con la DRAM, pero aún así necesitan un suministro constante de energía para retener la información.

La Figura 2.10 ilustra una arquitectura propuesta para la MRAM. En este caso, las células que almacenan la información están constituidas por MTJs (magnetic tunneling junction), donde los estados alineados o antialineados de las magnetizaciones de las capas FM representan los estados digitales 0 o 1. Las líneas de bits son aquellas donde se almacenan los bits que participarán en una operación de escritura o lectura, mientras que las wordlines activan las células que participarán en estas operaciones. El voltaje que atraviesa cada celda puede ser medido conectando las líneas y aplicando una corriente, lo que permite conocer el estado 0 o 1 del bit. Además, la información puede ser reescrita sobre cada bit aplicando un campo magnético.

Debido a la estabilidad que presentan los estados alineados y antialineados en esta estructura,

no es necesario aplicar constantemente un suministro eléctrico para mantener la información, lo que explica la no volatilidad de esta tecnología.

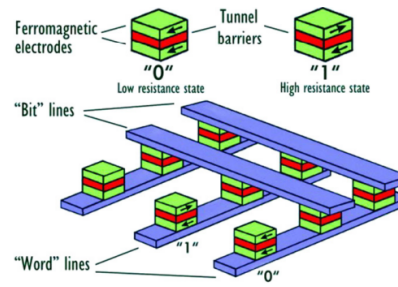
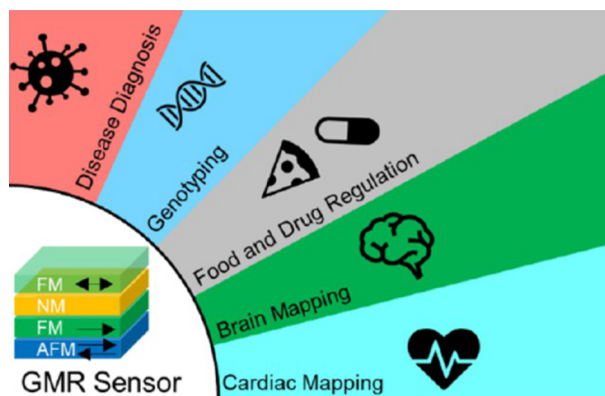


Figura 2.10: Figura esquemática de una posible estructura MRAM. Thompson et al. 2008.

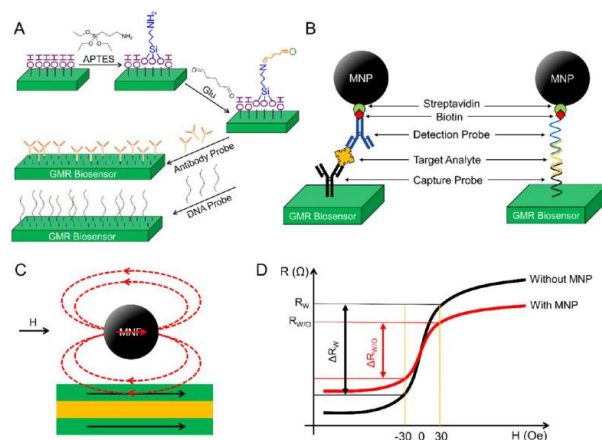
2.6.3. Biosensores basados en GMR

Los biosensores basados en GMR poseen un gran potencial para diversas aplicaciones biomédicas, entre las cuales destacan el diagnóstico de enfermedades, el genotipado, la regulación de alimentos o drogas, el mapeo cerebral, el mapeo cardíaco, entre otros [11].

Una de las aplicaciones más impactantes del GMR en biomedicina es el diagnóstico de enfermedades como la influenza [12]. La Figura 2.11(b) muestra una representación esquemática del proceso para la detección de la influenza utilizando sensores GMR. En este proceso, se emplean nanopartículas magnéticas (MNPs), las cuales se adhieren al sensor GMR en presencia del virus de la influenza. La cantidad de MNPs adheridas al sensor será proporcional a la concentración del virus. La unión de las MNPs provoca un cambio en las curvas de resistencia vs campo del sensor GMR, lo que permite detectar la enfermedad.



((a)) Aplicaciones de los sensores GMR en biomedicina. Wu et al. 2022.



((b)) (A) Vista esquemática de la modificación superficial del sensor GMR. (B) Vista esquemática del ensayo de sándwich. (C) Al aplicar un campo magnético externo, los campos generados por las MNPs pueden perturbar las magnetizaciones en la capa libre del biosensor GMR. (D) Vista esquemática de las curvas RH del sensor GMR con y sin las MNPs capturadas en la superficie del sensor. Wu et al. 2022.

Figura 2.11: Aplicaciones del sensores GMR en biomedicina. Wu et al. 2022.

Capítulo 3

Métodos

En este capítulo, se expondrá la metodología empleada para la medición de la Magnetorresistencia Gigante (GMR). Para esto, se procederá a una descripción minuciosa del dispositivo experimental, abordando cada una de sus componentes. Posteriormente, se detallarán los softwares utilizados con el propósito de controlar los instrumentos y efectuar mediciones de manera remota, haciendo uso de la interfaz proporcionada por LabVIEW. Por último, se ofrecerá una explicación sobre el programa de Mathematica utilizado para abordar los inconvenientes asociados con la drift en la toma de datos y su posterior procesamiento.

3.1. Aparato experimental

3.1 se exhibe una representación esquemática del montaje empleado. El sistema para la medición de la Magnetorresistencia Gigante (GMR) se compone de diversas partes que operan de manera sincronizada a través de control remoto, siendo supervisadas por un computador a través de una interfaz desarrollada en LabVIEW.

Con el objetivo de medir este fenómeno, se genera un campo magnético unidireccional en el plano con magnitud variable. Esto se logra mediante un par de electroimanes conectados a una fuente de Power Supply/Amplifier y un Waveform Generator. Este campo magnético induce la magnetización en la muestra, y para medir su resistencia, establecemos contacto con un Four point probe head conectada a un multímetro Keithley 2000. Simultáneamente, se realiza la medición del campo magnético aplicado sobre la muestra mediante un Gaussmeter.

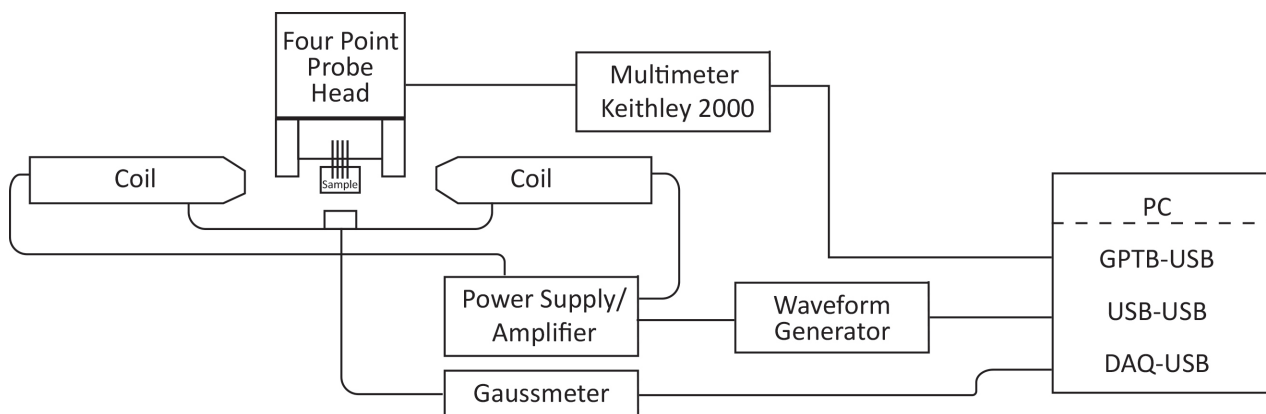


Figura 3.1: Foto esquemática del aparato experimental.

Todas las partes que conforman el aparato experimental y sus utilidades son:

1. Computador:

Se dispone de un computador con sistema operativo Windows 11 que cuenta con LabVIEW 2016 instalado. Este entorno se emplea para el control de los diversos equipos mediante conexiones USB o GPIB.

2. Probe station: La Figura 3.2 muestra la estación de prueba utilizada para las mediciones. Esta estación está diseñada para controlar la temperatura usando un thermal chuck, mantener la muestra inmobilizada y posicionar con precisión la cabeza de cuatro puntos durante la adquisición de datos.

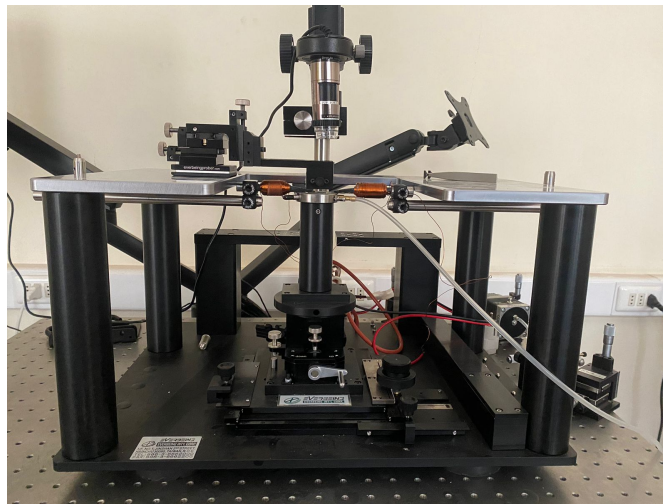


Figura 3.2: Probe Station en una toma de datos.

3. Four point probe head Cabeza de cuatro puntas utilizada para realizar contactos precisos y constantes en las muestras, como se muestra en la Figura 3.3.

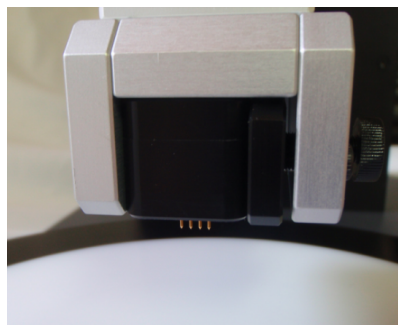
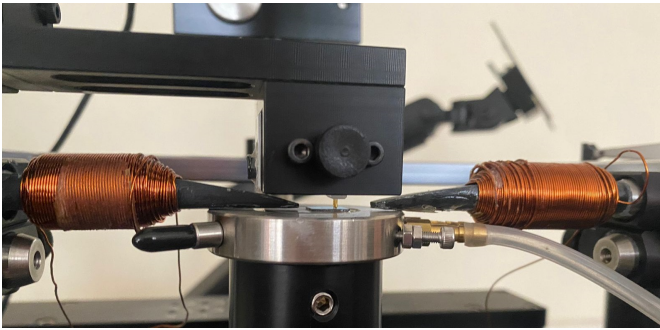
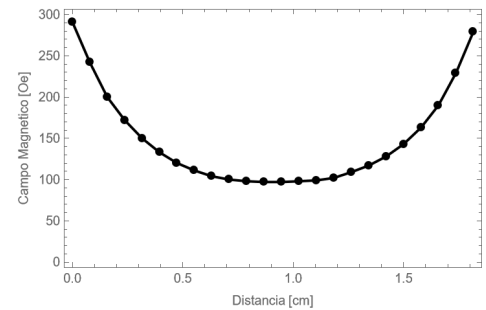


Figura 3.3: Foto cabeza de cuatro puntas.

4. Multímetro Keithley 2000: Realiza mediciones de voltaje, corriente y resistencia en 2 o 4 puntas. Puede conectarse al cabezal de cuatro puntas para efectuar mediciones en las muestras. Permite el control remoto a través de la interfaz de LabVIEW del computador, estableciendo conexión mediante un GPIB que se conecta al computador mediante USB.
5. Electroimán: Se ha construido un electroimán mediante dos núcleos de ferrita envueltos en hilo esmaltado de cobre dispuestos de frente entre sí, lo cual logra generar campos magnéticos unidireccionales en el plano.



((a)) Foto electroimán en una toma de datos.



((b)) Amplitud del campo magnético entre las puntas del electroimán.

Figura 3.4: (a) Electroimán y (b) Uniformidad del campo magnético producido.

Para activar el electroimán se conecta a un Kepco Bipolar Operational Power Supply/Amplifier, el cual es alimentado por un generador de señales BK Precision 4053B. Este generador de señales se controla de forma remota mediante una conexión USB y la interfaz desarrollada en LabVIEW.

En la creación del electroimán, se utilizaron dos cilindros ovalados de ferrita, cada uno con una longitud de 7 cm y secciones transversales de 0.9 y 1 cm. A partir de cada cilindro, se orienta el campo magnético y se enrollan 9 vueltas de hilo esmaltado de cobre con un radio de 0,5mm, incrementando así su radio a 2.4 cm. Finalmente, se soldó el cable de cada cilindro y se posicionaron a una distancia de 1.9 cm entre sus extremos, tal como se ilustra en la Figura 3.4(a). La resistencia de cada electroimán se establece en 6.5 Ω .

Se evaluó la uniformidad del campo magnético generado por el electroimán entre sus puntas extremas utilizando un Gaussmeter, cuyos valores observados se presentan en la Figura 3.4(b). En esta figura, se aprecia una región con un campo magnético de aproximadamente 100 [Oe], que se mantiene casi constante en alrededor de 0,4cm.

6. Function/Arbitrary Waveform Generator BK precision 4053B:

El generador de señales utilizado para controlar el voltaje suministrado al electroimán. Puede ser controlado de manera remota a través de la interfaz de LabVIEW mediante una conexión USB-USB.

7. Kepco Bipolar Operational Power Supply/Amplifier:

Utilizado para amplificar la señal suministrada por el generador de señales al electroimán, el amplificador se encuentra conectado a las salidas del Function/Arbitrary Waveform Generator y, a su vez, se conecta con el electroimán a través de sus entradas.

8. Gaussmeter Model GM2 AlphaLab Inc.

Utilizado para medir el campo magnético aplicado sobre la muestra durante las mediciones de resistencia, este dispositivo incorpora un GM2 High Stability Universal Probe que posibilita la medición precisa de campos magnéticos pequeños en el rango de $\pm 800Oe$. Para la medición remota del campo magnético, la diferencia de potencial generada se conecta a un DAQ MC USB-1608G, el cual se controla mediante una conexión USB-USB con el computador.

3.2. Software

Para el control remoto de los diversos dispositivos y la automatización de la toma de datos, se utilizó la interfaz de LabVIEW. Se propusieron dos métodos para medir el efecto GMR. El

primero consiste en aplicar un campo magnético mediante una corriente senoidal, mientras que el segundo método utiliza una corriente continua (dc). Después de la toma de datos, se implementó un programa en Mathematica para corregir los problemas de drift y procesar los datos.

3.2.1. Configuración campo AC

Para llevar a cabo la medición del efecto GMR en la configuración AC, se desarrolló un programa en LabVIEW que genera una corriente senoidal sobre las bobinas del electroimán, en la Figura 3.5(a) se observa su panel frontal y en la Figura 3.5(b) su diagrama de bloques. Con el fin de reducir el ruido en la toma de datos, se realizan varios de estos ciclos, y posteriormente se promedian, generando así las curvas de resistencia versus campo.

En el panel frontal del programa, es necesario establecer conexiones con el gaussmeter, el generador de señales y el multímetro. Además, se ingresan parámetros como el número de promedios, la frecuencia y la amplitud de los voltajes sobre los electroimanes. El programa plotea los datos medidos de campo magnético y resistencia en el tiempo y las curvas de campo vs resistencia para los promedios luego de cada ciclo.

Hasta el momento, este programa presenta bastantes dificultades para obtener buenos resultados, el principal problema es que el multímetro tarda al rededor de un segundo en tomar cada dato de resistencia, por lo que es necesario usar frecuencias muy pequeñas para tomar suficientes datos. Además, al aplicar un voltaje AC se obtienen muy pocos datos cerca de $B = 0[Oe]$ y muchos cerca de la saturación, por lo que no se obtiene resolución en las zonas de mayor interés. Este problema puede solucionarse utilizando un multímetro mas rapido en la toma de datos.

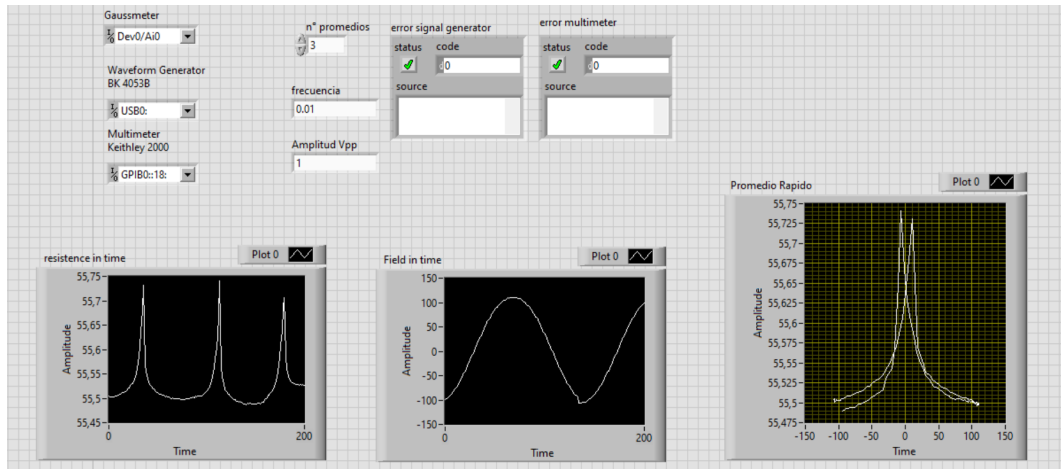
3.2.2. Configuración campo DC

Para llevar a cabo la medición con los electroimanes alimentados por un voltaje DC, se empleó la interfaz de LabVIEW, y en la Figura 3.6(a) se muestra el panel frontal del programa utilizado y en 3.6(b) su diagrama de bloque.

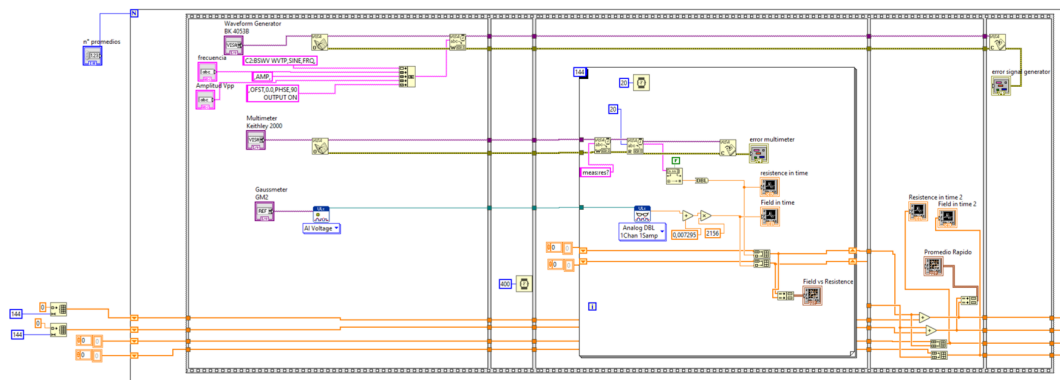
Se ingresan los valores de amplitud de la señal DC que alimenta los electroimanes en FilePath (vppdata). Dependiendo de la naturaleza de las muestras, se pueden seleccionar zonas con una cantidad diferente de puntos. Dado que se estudiarán muestras acopladas ferromagnéticamente, se tomarán más puntos después de pasar por $B = 0$ para observar con mayor claridad los picos, como se muestra en Field Promediated. En el caso de muestras acopladas antiferromagnéticamente, sería recomendable tomar datos cerca de $H = 0$.

El programa recopila datos de resistencia y campo magnético para cada valor de la señal que alimenta los electroimanes, y luego calcula el promedio de estos datos. El número de promedios para cada valor de campo magnético se introduce en el programa. Los valores de cada dato en el tiempo se pueden observar en las gráficas de Resistencia en el Tiempo y Campo en el Tiempo”, mientras que los datos promediados se visualizan en las gráficas de Resistencia Promediada y Campo Promediado”. La curva final de los datos de Resistencia vs Campo se muestra en el gráfico de Campo vs Resistencia”.

El principal desafío en la toma de datos radica en el Drift, donde los datos medidos de la resistencia por parte del multímetro tienden a disminuir o aumentar con el tiempo, distorsionando la señal GMR, como se observa en el gráfico de Field vs Resistance. El drift puede originarse por diversas razones; en este caso, la principal proviene de la estabilidad de la corriente eléctrica del laboratorio que alimenta el multímetro, aunque también puede estar relacionado con el calentamiento de la muestra y la calidad del contacto de las 4 puntas.

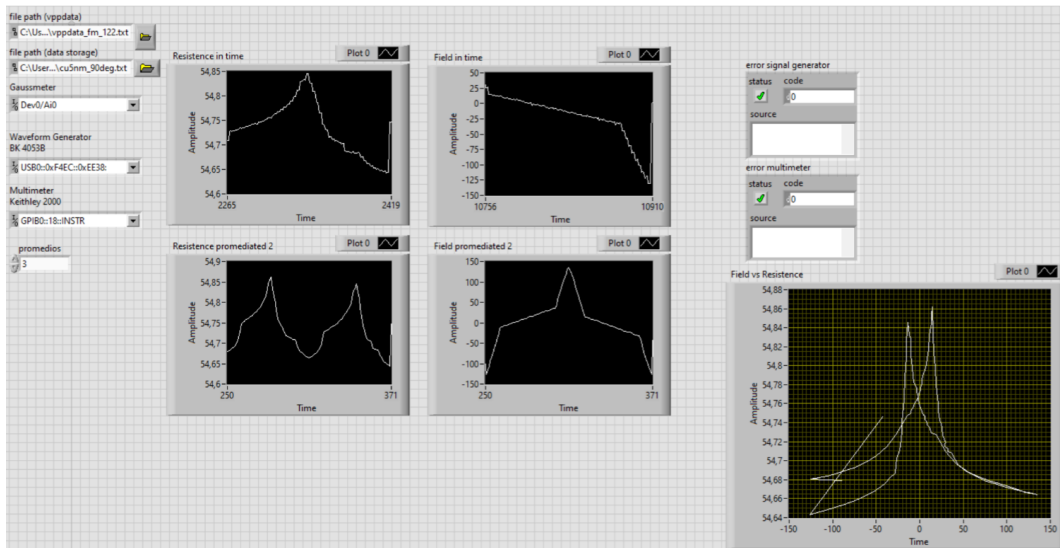


((a)) Panel frontal

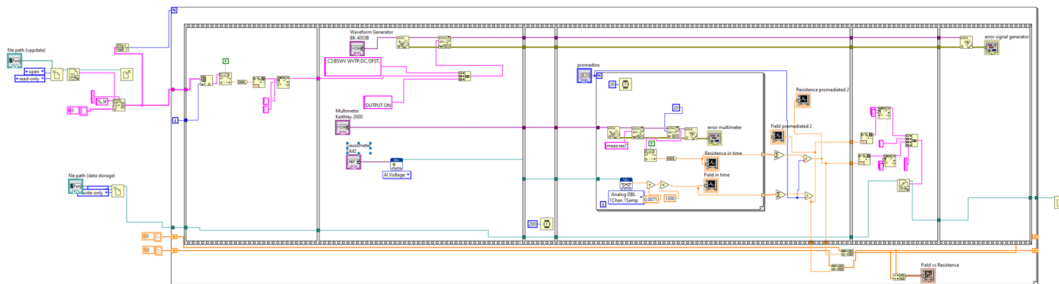


((b)) Diagrama de bloques

Figura 3.5: (a) Panel frontal y (b) diagrama de bloque de labview para medir en la configuración de los electroimanes alimentados por un voltaje AC.



((a)) Panel frontal



((b)) Diagrama de bloques

Figura 3.6: (a) Panel frontal y (b) diagrama de bloque de labview para medir en la configuración de los electroimanes alimentados por un voltaje DC.

3.2.3. Procesamiento y corrección de Drift

Para procesar los datos finales de campo versus resistencia obtenidos en los programas anteriores, se diseñó un programa en Mathematica, como se muestra en la Figura 3.7. Inicialmente se corrige el drift, para esto, se asume que el aumento o disminución de los datos de resistencia es constante en el tiempo (aunque en realidad tiene un comportamiento más asintótico horizontal), se introduce la constante incremental, la cual se suma linealmente a cada dato de la resistencia medido en el tiempo.

Luego de corregir el Drift existe la opción de centrar la curva de resistencia con respecto al campo magnético y finalmente, el programa procesa los datos conforme a la ecuación 2.7, generando las curvas de $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow}}$.

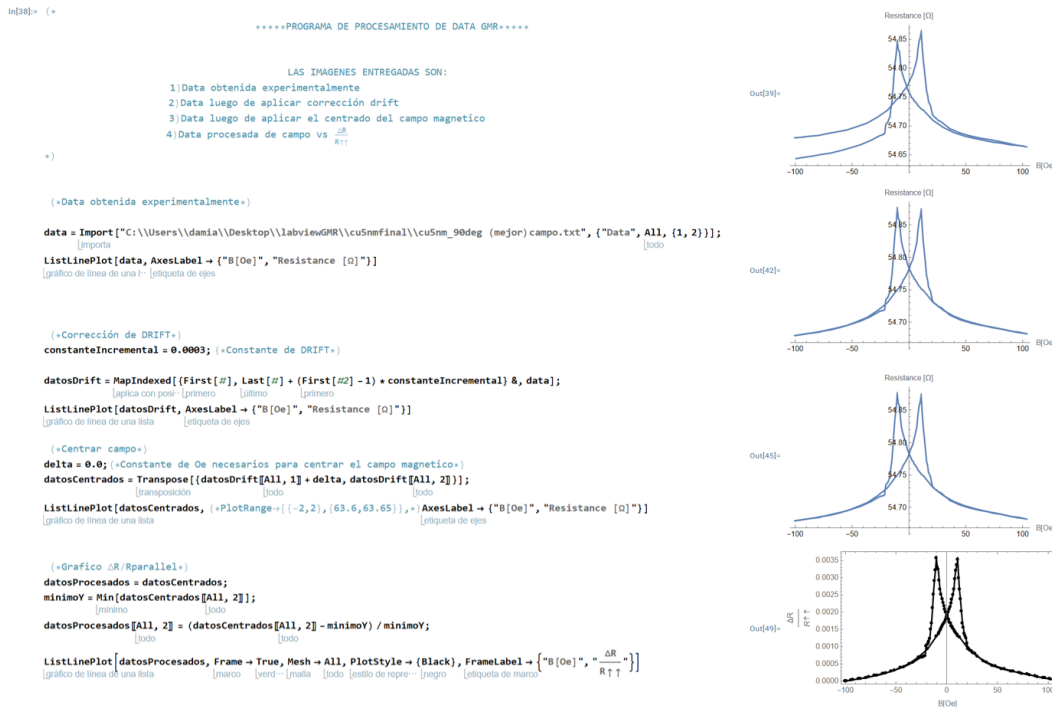


Figura 3.7: Programa de Mathematica utilizado para corregir los problemas de drift, centrar las curvas respecto al campo magnético y generar las curvas de la señal GMR $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow}}$.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Curvas GMR de las muestras Co(10nm)/Cu/CoFeB(10nm)

La Figura 4.1 exhibe las curvas GMR para las pseudo válvulas de espín conformadas por la tricapa Co(10nm)/Cu(t_{Cu})/CoFeB(10nm), donde se varió el grosor de la capa de Cu (t_{Cu}) en valores de 1, 3, 5 y 8 nm. En las curvas de películas con espesores de Cu de 3, 5 y 8 nm, se aplicó el campo magnético en las direcciones del eje fácil y difícil para cada muestra. La Figura 4.2 corresponden a las curvas de histeresis de las muestras obtenidas en un vibrating sample magnetometer (VSM) en el trabajo de Wu et al. 2024. [3].

En la Figura 4.1(a) se presenta la curva GMR correspondiente a un grosor de $t_{Cu} = 1nm$. Se observa un pequeña amplitud del efecto GMR, $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow\uparrow}} = 0,04\%$. Esta baja amplitud puede atribuirse al intenso acoplamiento ferromagnético entre las capas FM, lo cual dificulta el antialineamiento de sus magnetizaciones. Se ha observado en la literatura que las estructuras con una mayor amplitud de GMR suelen tener un acoplamiento antiferromagnético, como se muestra en la Figura 4.3, que ilustra las amplitudes de GMR y los campos de saturación en función del espesor del espaciador [5]. En este trabajo se evidencian transiciones entre acoplamientos FM/AF en las capas FM, indicando que para altos campos de saturación se presenta un acoplamiento AF, mientras que para campos más bajos se observa un acoplamiento FM. Esto sugiere que las zonas con acoplamiento FM tienden a tener amplitudes de GMR más bajas, lo cual concuerda con los resultados de nuestras mediciones.

Para las pseudo válvulas de espín, es crucial que el acoplamiento entre las capas FM sea débilmente ferromagnético o antiferromagnético. El intenso acoplamiento ferromagnético en esta tricapa con espesor de Cu de 1nm se refleja en el espectro VNA-FMR y en la constante de interacción entre capas observada en el trabajo [3].

Las Figuras 4.1(b) a 4.1(g) presentan las curvas GMR correspondientes a espesores de $t_{Cu} = 3, 5, 8 nm$, respectivamente. Para analizar la influencia de la dirección del campo en estas curvas, se empleó el programa de medición AC, rotando la muestra cada 30° en el plano hasta encontrar el eje donde las curvas alcanzaban la saturación con el menor campo magnético. Posteriormente, se utilizó el programa de medición DC para obtener las curvas GMR en el eje fácil y, se giró la muestra 90° para obtener su eje difícil. La variación observada en las curvas GMR respecto a la dirección del campo magnético se atribuye a la presencia de una anisotropía magnetocristalina uniaxial dentro del plano de medición. En todos los casos observados, la amplitud del efecto GMR en el eje fácil es ligeramente mayor que en el eje difícil y la saturación se produce para un menor campo magnético, esto se debe a que es más factible que se produzca un total antialineamiento de las magnetizaciones si el campo se aplica a lo largo del eje fácil, ya que de lo contrario, se necesita un mayor campo magnético para saturar la muestra en la dirección del campo. La presencia de una anisotropía magnetocristalina uniaxial en estas muestras se evidencia en el trabajo realizado por [3].

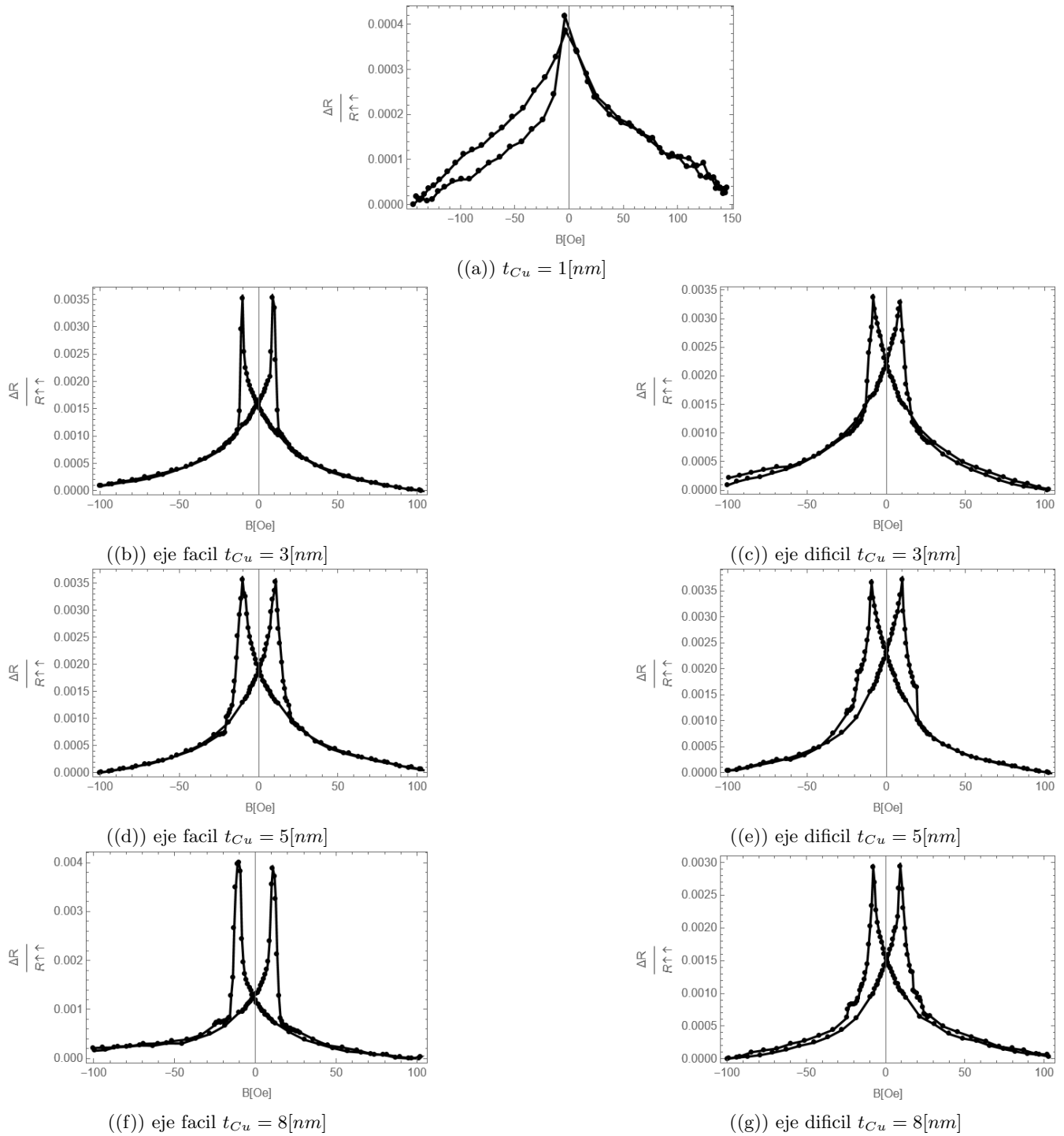


Figura 4.1: Curvas GMR de las muestras $\text{Co}(10\text{nm})/\text{Cu}(t_{Cu})/\text{CoFeB}(10\text{nm})$ con espesores de Cu $t_{Cu} = \{1, 3, 5, 8\text{nm}\}$ para sus ejes fácil y difícil. Los puntos negros representan los datos obtenidos experimentalmente, mientras que las líneas negras conectan los puntos previos y posteriores de cada medición.

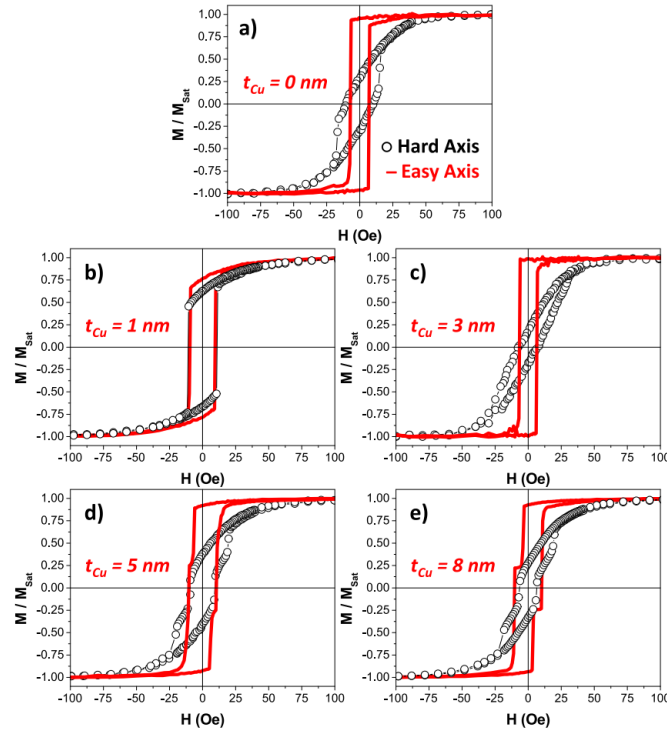


Figura 4.2: Las curvas de histéresis normalizadas en el plano de las tricapas de Co(10nm)/Cu(t_{Cu})/CoFeB(10nm) y grosores de la lamina de Cu t_{Cu} de (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 5 y (e) 8 nm. Los círculos negros y las líneas rojas representan los datos medidos desde las direcciones de magnetización dura y fácil, respectivamente. Wei et al. (2024).

En este estudio, para las muestras de 1, 3, 5 y 8 nm, se han observado amplitudes de GMR en los ejes fáciles de $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow\uparrow}} = 0,04\%$, $0,35\%$, $0,36\%$, $0,39\%$ respectivamente. No se ha detectado un decaimiento en la amplitud del GMR con el aumento del espesor del espaciador, ni un comportamiento oscilatorio.

En la literatura, se ha observado una dependencia oscilatoria en la amplitud de la Magnetoresistencia Gigante (GMR) respecto al espesor del espaciador en multicapas, causada por la interacción RKKY [5, 13]. Los picos más prominentes suelen ubicarse en zonas con mayor acoplamiento antiferromagnético. La ausencia de este comportamiento oscilatorio en las amplitudes GMR de nuestras muestras concuerda con las constantes de intercambio observadas en el trabajo de [3], ya que ni en sus constantes de intercambio ni en nuestras amplitudes GMR se observaron oscilaciones.

La ausencia del comportamiento oscilatorio se explica debido a la cantidad limitada de espesores medidos y al hecho de que el periodo de oscilación de la amplitud respecto al espesor del material no magnético tiende a ser entre $12-14 \text{ \AA}$, como se observó en el trabajo de multicapas [5]. Por otro lado, en el trabajo sobre pseudo válvulas de espín Si(100)/Co(12nm)/Al(d_{Al})/Co(16nm) realizado por [14], se observó un periodo de oscilación de alrededor de $2nm$ como se muestra en la Figura 4.4. Por lo tanto, si variamos los espesores de nuestras muestras en incrementos de $2nm$ o $3nm$, es probable que pasemos por alto las oscilaciones.

En el estudio realizado por Tsunashima et al. [15], se examinaron tricapas de Co/Cu/CoFeB, variando el espesor de la capa de CoFeB. En su investigación, señalan que la señal GMR aumenta conforme se observa en las curvas de histéresis la doble transición de fase entre el alineamiento y antialineamiento de las magnetizaciones de las capas ferromagnéticas. Esto coincide con nuestros datos obtenidos, ya que la muestra con un espesor de $t_{Cu} = 1nm$ (véase Figura 4.1(b)) no presenta una señal GMR ni una doble transición de fase evidente. Esto se debe al fuerte acoplamiento

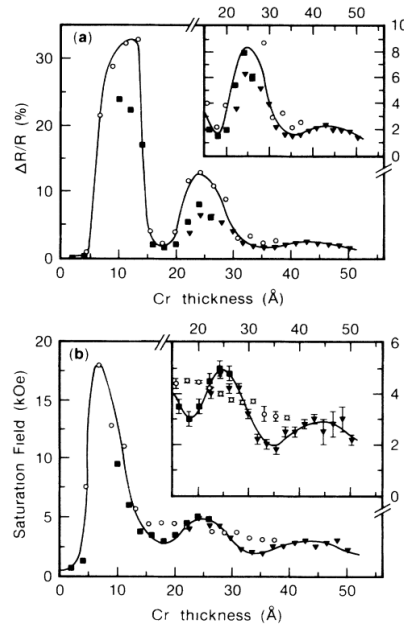


Figura 4.3: (a) Magnetorresistencia de saturación transversal (4.5 K) y (b) campo de saturación (4.5 K) vs el grosor de la capa de Cr para tres series de estructuras de la forma Si(111)/(100 Å) Cr/[(20 Å) Fe/ t_c , Cr]/[(50 Å) Cr], depositadas a temperaturas de 30 °C, 40 °C y 125 °C, respectivamente. Parkin et al. (1989).

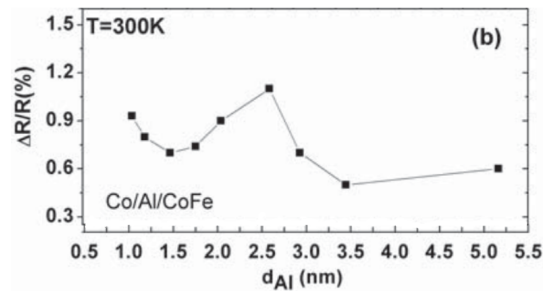


Figura 4.4: Amplitud GMR longitudinal vs grosor de la capa de aluminio en muestra Si(100)/Co(12nm)/Al(d_{Al})/Co(16nm) tomadas a temperatura ambiente. Russo et al. (2007).

ferromagnético entre las capas, el cual fue observado por [3], y que no permite un antialineamiento de sus magnetizaciones.

Por otro lado, la curva correspondiente a la capa con un espesor de $t_{Cu} = 3nm$ (vista en la Figura 4.1(b)) muestra una señal GMR con un incremento y disminución abruptas, indicando que comienza a generarse una antialineación entre las magnetizaciones. Finalmente, las curvas con espesores de $t_{Cu} = 5$ y $8nm$ (presentes en las Figuras 4.1(d) y 4.1(f), respectivamente) muestran dobles transiciones de fase en sus curvas de histéresis como se observa en la 4.2, así como curvas GMR con una amplitud significativa y bien definida, en línea con lo observado en la literatura.

Capítulo 5

Conclusiones

Se logró exitosamente diseñar y construir un equipo automatizado capaz de medir el efecto GMR en películas delgadas con configuración CIP, aplicando un voltaje DC sobre los electroimanes que generan el campo magnético.

Durante el estudio, se llevaron a cabo mediciones de las curvas de histéresis y GMR de tri-capas $\text{Co}(10 \text{ nm})/\text{Cu}(t_{\text{Cu}})/\text{CoFeB}(10 \text{ nm})$ para diferentes espesores de la capa de Cu ($t_{\text{Cu}} = 1, 3, 5, 8 \text{ nm}$). No se obtuvo una señal GMR significativa para la muestra con $t_{\text{Cu}} = 1[\text{nm}]$, lo cual puede atribuirse al fuerte acople ferromagnético entre sus capas FM. Sin embargo, para las muestras con espesores de $t_{\text{Cu}} = 3, 5, 8 \text{ nm}$, se obtuvieron señales GMR de $\frac{\Delta R}{R_{\uparrow\uparrow}} = 0,35\%, 0,36\%, 0,39\%$ respectivamente.

Se observó una variación en las curvas GMR debido a la anisotropía magnetocristalina uniaxial en el plano, lo que generó diferencias en el efecto GMR según el eje sobre el cual se aplicó el campo magnético.

No se logró observar una oscilación en la amplitud del GMR con respecto al espesor de la lámina de cobre, debido a la limitada variedad de grosores utilizados. La variación de los grosores medidos era considerablemente mayor en comparación con el periodo de oscilación de la amplitud observada en la literatura, lo cual explica por qué no se pudo observar el fenómeno.

A medida que se produjo la doble transición de fase entre estados con magnetizaciones alineadas y antialineadas en las curvas de histéresis, se observaron mayores amplitudes en la señal GMR.

Capítulo 6

Trabajo Futuro

Durante el presente semestre me dedicare a la construcción y automatización de un equipo para medir el efecto Spin Seebeck longitudinal, y terminare de caracterizar las muestras Co/Cu/CoFeB, midiendo sus curvas de histéresis en el AGM del grupo de magnetismo aplicado y espintrónica de la USM.

6.1. Medición curvas de histéresis usando AGM

El AGM mide el momento magnético neto de un cuerpo al aplicar un campo magnético. Funciona detectando la fuerza sobre el cuerpo debido a un pequeño campo magnético de gradiente de corriente alterna. Nuestro AGM casero tiene una sensibilidad de 10^{-6} e.m.u. y un campo magnético aplicado de hasta 1 Tesla. El dispositivo toma bucles de histéresis magnética y curvas de reversión de primer orden (FORC).

Actualmente el equipo AGM del laboratorio de espintrónica esta siendo optimizado para poder medir las curvas de histéresis de las muestras Co/Cu/CoFeB.

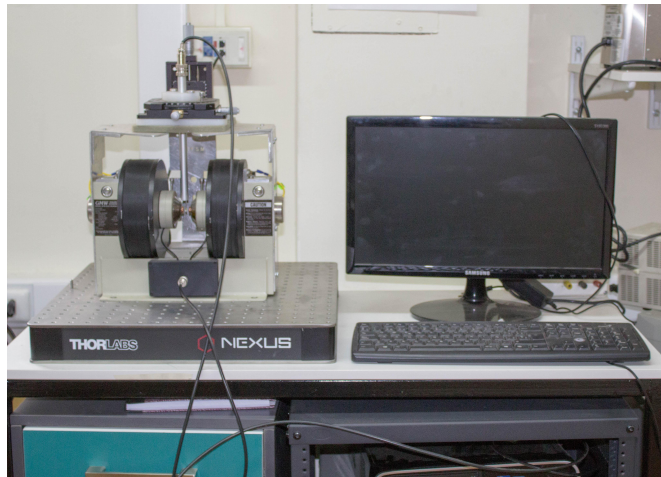


Figura 6.1: Foto de magnetómetro de gradiente alterno (AGM) grupo de magnetismo aplicado y espintrónica USM.

6.2. Medición de Spin Seebeck

6.2.1. Antecedentes en la medición de spin seebeck con análisis armónico

El Spin Seebeck es un efecto termoelectrico de spin, en el cual es posible generar diferencias de voltaje en heteroestructuras de aislantes ferromagneticos (FMI) y materiales no magneticos (NM) FMI/NM como YIG/Pt, a partir de un campo magnético y un gradiente de temperatura.

Romanque et al. (2020) [16] propusieron un método para medir el efecto Spin Seebeck a través del análisis armónico de la señal obtenida. Este método implica la generación de un campo magnético armónico y un gradiente de temperatura estático para inducir un voltaje producto del efecto Spin Seebeck. Mediante el uso de un lock-in, es posible reducir el ruido en la medición, para luego descomponer la señal medida en sus distintos armónicos y así separar la señal del efecto Spin Seebeck de otros contribuyentes, como el ruido y la fuerza electromotriz resultante del cambio en el flujo de campo magnético a través del área transversal definida por los contactos en el Pt.

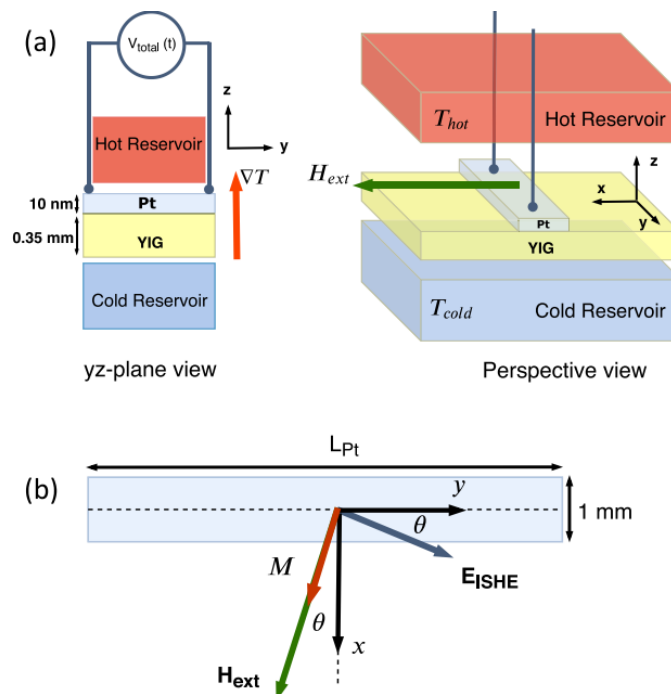


Figura 6.2: Ilustración del sistema que produce el efecto spin seebeck en una muestra de YIG/Pt. (a) La vista en el plano yz muestra la disposición de los reservorios térmicos, los cuales generan el gradiente térmico necesario para inducir el SSE. En la vista en perspectiva, podemos observar la muestra de YIG/Pt sandwiched entre dos reservorios térmicos, los cuales están en contacto directo con la muestra. El campo magnético externo se aplica paralelo al eje x y varía sinusoidalmente con frecuencia f . (b) La vista en el plano xy del montaje, centrada en la capa de Pt, muestra una representación de la magnetización M , el campo magnético aplicado H y el ángulo θ azimutal entre el campo magnético y la dirección x , el ángulo entre EISHE y el eje y también es θ . Romanque et al. 2020.

6.2.2. Métodos Propuestos

Para medir el Spin Seebeck mediante análisis armónico, se propone el montaje experimental ilustrado en la Figura 6.3. Para generar un campo magnético sinusoidal en cualquier dirección del plano en un sistema de medición estática, se ha diseñado un vector magnet, como se muestra en la Figura 6.4, el cual esta compuesto por dos pares de electroimanes. Para lograr un campo sinusoidal que varíe angularmente en el plano, se aplican corrientes sinusoidales de diferente amplitud para

cada par de electroimanes, manteniéndolas en fase. Para cambiar angularmente la dirección del campo, se ajustan las amplitudes de las señales enviadas a los pares de electroimanes.

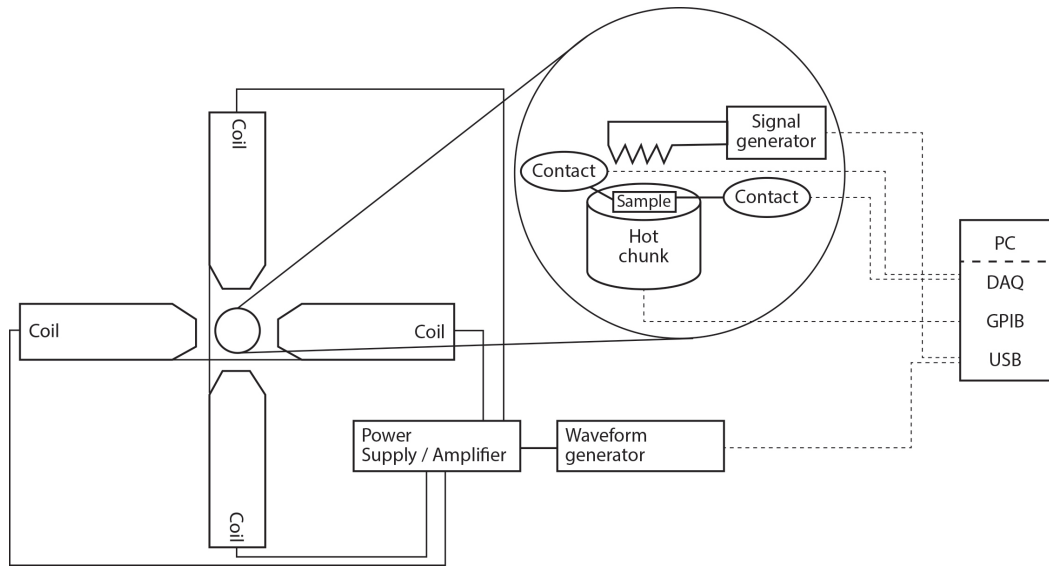


Figura 6.3: Foto esquemática del aparato experimental para medir Spin Seebeck.

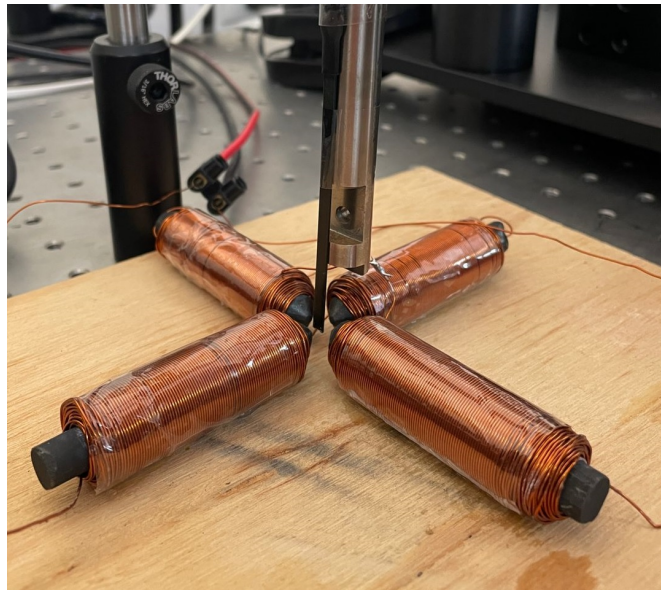


Figura 6.4: Ejemplo de vector magnet previamente diseñado.

Para inducir un gradiente de temperatura sobre la muestra, se emplea un reservorio frío generado con un hot chunk adaptable al probe station. El reservorio caliente se forma mediante una resistencia que se calienta al pasar una corriente controlada por un generador de señales. De esta manera, se logra producir un pequeño gradiente térmico entre el platino y el YIG. Tanto el generador de señales como el "hot chunk" pueden ser controlados mediante la interfaz de Labview.

La señal de voltaje obtenida a través del Spin Seebeck, junto con las señales de ruido y fuerza electromotriz, puede ser medida estableciendo contacto con 2 microposicionadores conectados a una DAQ (Adquisición de Datos) y visualizada en Labview. Posteriormente, se puede emplear un lock-in para eliminar el ruido y separar la señal obtenida en sus distintos armónicos, centrándose en el tercer armónico, el cual es el más característico del Spin Seebeck longitudinal.

De este modo, se presume que se puede desarrollar un sistema automatizado en Labview para medir el Spin Seebeck, variando tanto la temperatura como la dirección del campo magnético de manera remota.

Bibliografía

- [1] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys. Rev. B*, 39:4828–4830, Mar 1989. doi: 10.1103/PhysRevB.39.4828. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.39.4828>.
- [2] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas. Giant magnetoresistance of (001)fe/(001)cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 61:2472–2475, Nov 1988. doi: 10.1103/PhysRevLett.61.2472. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.61.2472>.
- [3] Zengxin Wei, David Navas, Sergey A. Bunyaev, Marian Abellan, Carlos Garcia, Gleb N. Kaka-zei, and Manuel Vazquez. Static and dynamical behaviour of magnetically coupled co/cu/cofeb trilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 589:171584, 2024. ISSN 0304-8853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171584>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885323012349>.
- [4] P.A. Grünberg and D.T. Pierce. Multilayers: Interlayer coupling. In K.H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernhard Ilshner, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, and Patrick Veyssi ere, editors, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pages 5883–5888. Elsevier, Oxford, 2001. ISBN 978-0-08-043152-9. doi: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01024-X>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B008043152601024X>.
- [5] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche. Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in metallic superlattice structures: Co/ru, co/cr, and fe/cr. *Phys. Rev. Lett.*, 64:2304–2307, May 1990. doi: 10.1103/PhysRevLett.64.2304. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.64.2304>.
- [6] P. Bruno and C. Chappert. Oscillatory coupling between ferromagnetic layers separated by a nonmagnetic metal spacer. *Phys. Rev. Lett.*, 67:1602–1605, Sep 1991. doi: 10.1103/PhysRevLett.67.1602. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.67.1602>.
- [7] Gayanath W. Fernando. Chapter 1 - gmr in metallic multilayers – a simple picture. In Gayanath W. Fernando, editor, *Metallic Multilayers and their Applications*, volume 4 of *Handbook of Metal Physics*, pages 1–32. Elsevier, 2008. doi: [https://doi.org/10.1016/S1570-002X\(07\)00001-8](https://doi.org/10.1016/S1570-002X(07)00001-8). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570002X07000018>.
- [8] S.M. Thompson. Magnetoresistive heads: Physical phenomena. In K.H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernhard Ilshner, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, and Patrick Veyssi ere, editors, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pages 5095–5101. Elsevier, Oxford, 2001. ISBN 978-0-08-043152-9. doi: <https://doi.org/10.1016/>

- B0-08-043152-6/00885-8. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526008858>.
- [9] Sarah M Thompson. The discovery, development and future of gmr: The nobel prize 2007. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(9):093001, mar 2008. doi: 10.1088/0022-3727/41/9/093001. URL <https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/093001>.
- [10] Jeffrey R. Childress and Robert E. Fontana. Magnetic recording read head sensor technology. *Comptes Rendus Physique*, 6(9):997–1012, 2005. ISSN 1631-0705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2005.11.001>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070505001684>. Spintronics.
- [11] Kai Wu, Denis Tonini, Shuang Liang, Renata Saha, Vinit Kumar Chugh, and Jian-Ping Wang. Giant magnetoresistance biosensors in biomedical applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14:9945–9969, 2022. ISSN 1944-8244. doi: 10.1021/acsami.1c20141. URL <https://doi.org/10.1021/acsami.1c20141>.
- [12] Venkatramana D. Krishna, Kai Wu, Andres M. Perez, and Jian-Ping Wang. Giant magnetoresistance-based biosensor for detection of influenza a virus. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2016. ISSN 1664-302X. doi: 10.3389/fmicb.2016.00400. URL <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2016.00400>.
- [13] S. S. P. Parkin, R. Bhadra, and K. P. Roche. Oscillatory magnetic exchange coupling through thin copper layers. *Phys. Rev. Lett.*, 66:2152–2155, Apr 1991. doi: 10.1103/PhysRevLett.66.2152. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.66.2152>.
- [14] F. Russo, G. Carapella, V. Granata, N. Martucciello, and G. Costabile. Pseudo spin-valves with al or nb as spacer layer: Gmr and search for spin switch behaviour. *The European Physical Journal B*, 60(1):61–66, 2007. ISSN 1434-6036. doi: 10.1140/epjb/e2007-00329-6. URL <https://doi.org/10.1140/epjb/e2007-00329-6>.
- [15] S. Tsunashima, M. Jimbo, Y. Imada, and K. Komiyama. Spin valves using amorphous magnetic layers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 165(1):111–114, 1997. ISSN 0304-8853. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(96\)00483-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(96)00483-0). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885396004830>. Symposium E: Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces.
- [16] Cristian Romanque-Albornoz, Claudio Gonzalez-Fuentes, Christian Orellana, and Carlos Garcia. Spin Seebeck effect detection by harmonic analysis. *Applied Physics Letters*, 116(24):242402, 06 2020. ISSN 0003-6951. doi: 10.1063/5.0011413. URL <https://doi.org/10.1063/5.0011413>.