

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

TESIS DOCTORAL EN FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA

**Modelización avanzada de
dinámica de paredes de dominio
para dispositivos espintrónicos**

Michele Voto

Supervisión de
Prof. Luis LÓPEZ DÍAZ
Prof. Luis TORRES RINCÓN

2 de noviembre de 2017



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Resumen

El estudio del magnetismo ha dado lugar a la aparición de numerosas aplicaciones que forman parte integrante de nuestro día a día. Por ejemplo, la gran mayoría de los datos a día de hoy está almacenada en discos duros magnéticos y los sensores magnéticos son fundamentales en la tecnología IoT (*Internet of Things*). La interacción de los espines locales con los electrones de conducción es el fundamento del campo de estudio llamado Espintrónica, cuyas contribuciones tecnológicas tratan de superar la electrónica moderna en términos de ahorro de energía, duración y fiabilidad.

El movimiento de paredes es el mecanismo a través del cual un sistema magnético modifica su estado cuando su equilibrio es perturbado a través de una acción externa, y su dinámica es descrita por el formalismo micromagnético. Las simulaciones numéricas micromagnéticas son una herramienta muy eficiente para conectar resultados experimentales y predicciones teóricas, y lideran el camino hacia la comprensión de la dinámica de la magnetización y del movimiento de paredes.

En el capítulo 1 se establecen los conceptos físicos fundamentales de la teoría micromagnética, presentando las herramientas analíticas usadas en la tesis. El capítulo 2 está dedicado a la descripción del código micromagnético utilizado. Las simulaciones se realizan mediante un código personalizado basado en C++ y CUDA, desarrollado dentro del grupo de investigación. Posteriormente el enfoque se dirige al estudio de dos problemas distintos, en los cuales se aprovecha el poder predictivo y descriptivo de las simulaciones micromagnéticas.

En el capítulo 3, se investigan los efectos del desorden en la dinámica de paredes magnéticas desplazadas por medio de un campo magnético aplicado en capas ultra-finas de CoFeB. Esta estructura constituye el componente fundamental de las memorias MRAM y la comprensión de la dinámica de paredes es un paso importante hacia la optimización de la funcionalidad de estos dispositivos. Explotando la habilidad de las simulaciones micromagnéticas para describir y reproducir de forma realista algunas características del desorden, es posible observar de cerca la dinámica de la magnetización a una escala todavía fuera del alcance de los instrumentos experimentales, desvelando importantes conexiones entre la dinámica de paredes y el desorden propio del material. Bajo campos aplicados altos, el desorden activa procesos dinámicos internos a la pared que aceleran la disipación de energía y causan un movimiento más rápido de la misma.

En el capítulo 4, se presenta un nuevo dispositivo espintrónico basado en la generación de ondas de espín por medio de la rotación controlada de una

pared en una tira ferromagnética. La transmisión de información a través de oscilaciones periódicas de la magnetización, llamadas ondas de espín, ofrece nuevas perspectivas en la arquitectura de sensores y emisores de muy baja potencia. En nuestro trabajo presentamos un sistema con características realistas e investigamos como el estado auto-oscilatorio de una pared de dominio, inducido por la inyección de una corriente continua a través de la tira, puede emitir una señal en forma de ondas de espín propagándose a una frecuencia que depende directamente de la densidad de corriente fluyendo en la tira y que puede llegar a decenas de GHz.

Índice

Resumen	ii
Introducción	1
1. Fundamentos teóricos	5
1.1. Desde la dinámica de un espín hasta el micromagnetismo . . .	5
1.1.1. Momento angular y momento magnético	5
1.1.2. Precesión del momento magnético	7
1.1.3. Del espín a la aproximación continua	7
1.1.4. Amortiguamiento fenomenológico y ecuación de Landau-Lifshitz-Gilbert	9
1.2. Energía libre y campo efectivo	10
1.2.1. Energía interna y ecuaciones de Brown	10
1.2.2. Interacción de intercambio	11
1.2.3. Anisotropía	12
1.2.4. Energía de Zeeman	13
1.2.5. Energía magnetostática	13
1.2.6. Interacción de Dzyaloshinskii-Moriya	15
1.3. De las nanopartículas al magnetismo en escala mesoscópica .	16
1.3.1. Monodominios, vórtices, multidominios	17
1.3.2. Teoría de paredes de Landau y Lifshitz	18
1.4. Dinámica de paredes de dominio	21
1.4.1. Minimización de la energía	21
1.4.2. Modelo unidimensional	23
2. Simulaciones numéricas	31
2.1. Código micromagnético	31
2.1.1. Diferencias finitas	32
2.1.2. Campo efectivo: evaluación a partir de la energía . . .	32
2.1.3. Campo y tensor desmagnetizante	34
2.1.4. Campo térmico	36
2.1.5. Diagramas de flujo	36
2.1.6. Integración temporal	39
2.1.7. Verificación del código	40
2.2. Computación en paralelo	41
2.2.1. Arquitectura hardware	42
2.2.2. Calculo científico en tarjetas gráficas	43

2.2.3.	Un ejemplo de computación en paralelo: teselación de Voronoi	44
3.	Dinámica de paredes de dominio en capas finas desordenadas	47
3.1.	Introducción	47
3.1.1.	Contexto general	47
3.1.2.	Motivaciones	48
3.1.3.	Estructura del capítulo	49
3.2.	Modelización del desorden en capas finas de CoFeB	50
3.2.1.	Campo de desanclaje	50
3.2.2.	Inclusión del desorden en las simulaciones	52
3.2.3.	Reproducción numérica de resultados experimentales	54
3.3.	Velocidad de la pared de dominio y disipación de energía	57
3.3.1.	Disipación de energía en muestras ideales y desordenadas	57
3.3.2.	Velocidad de paredes de dominio al variar del diámetro de granos	59
3.4.	Cambio de velocidades a campos altos inducido por el desorden	63
3.4.1.	Amortiguamiento de Gilbert y desorden	63
3.4.2.	Dinámica de líneas verticales de Bloch	67
3.4.3.	Modelo unidimensional ampliado	73
3.5.	Conclusiones	75
4.	Oscilador a paredes de dominio como emisor de ondas de espín	77
4.1.	Introducción	77
4.2.	Base teórica	79
4.2.1.	Movimiento de paredes por corrientes	79
4.2.2.	Teoría unidimensional de una pared anclada como oscilador	82
4.2.3.	Teoría de ondas de espín de intercambio-dipolares	84
4.3.	Hacia el emisor de ondas de espín	87
4.3.1.	Distribución no uniforme de corriente	87
4.3.2.	Efectos de la constricción geométrica sobre la dinámica de una pared de dominio anclada	88
4.3.3.	Condiciones iniciales fuera de equilibrio	91
4.4.	Emisión de ondas de espín	93
4.4.1.	Especificaciones	93
4.4.2.	Estudio sobre la emisión	94
4.4.3.	Aplicación de un campo externo	100

4.4.4. Papel del campo dipolar y unidireccionalidad	102
5. Conclusiones y perspectivas	109
5.1. Dinámica de paredes de dominio en sistemas desordenados . .	111
5.2. Emisor de ondas de espín basado en una pared de dominio . .	112
A. Código de teselación de Voronoi	115
Lista de publicaciones	119
Bibliografía tesis	121

Introducción

La humanidad ha estado investigando el magnetismo y sus propiedades durante miles de años, desde los imanes estudiados por los Griegos y las brújulas de los navegantes Chinos hasta la moderna tecnología de hoy en día. A pesar de esto, la comprensión a nivel microscópico del magnetismo conoció un progreso considerable solo a partir de finales de siglo XIX y durante el siglo XX, a raíz de las revoluciones científicas de la relatividad general y de la mecánica cuántica. La interpretación cuántica del espín del electrón nos permite describir la física a escala atómica y explicar el origen del magnetismo [1]. La dinámica de la magnetización de una muestra ferromagnética, formada por un gran número de átomos, se describe correctamente a través de la teoría micromagnética [2] que trata los materiales magnéticos a una escala suficientemente pequeña para describir variaciones locales de la magnetización, permitiendo al mismo tiempo describir el retículo atómico discreto mediante una aproximación continua.

El estudio del magnetismo ha dado lugar a la aparición de numerosas aplicaciones que forman parte integrante de nuestro día a día, mucho más allá de los típicos imanes para la nevera. La señal de audio y vídeo se ha almacenado en cintas y discos magnéticos, mientras que la gran mayoría de los datos a día de hoy está almacenada en discos duros magnéticos, codificada en la orientación de la imanación de pequeñas regiones de los mismos. Por otra parte, grandes recursos de investigación se dedican a los imanes permanentes, utilizados en motores eléctricos y generadores.

La propiedad de los electrones conocida como espín, conlleva varias consecuencias más allá de la generación del momento magnético de los átomos. En un conductor ferromagnético, los espines locales interactúan con los de los electrones de conducción a través de la interacción de intercambio. Este fenómeno puede causar, por un lado, una modificación importante de la resistencia de una válvula de espín magnética al variar su magnetización y, por el otro, la modificación de la magnetización a través de una corriente aplicada a una muestra magnética. Esta interacción es el funda-

mento de un nuevo campo de estudio llamado Espintrónica [3], un campo de investigación multidisciplinario en el cual colaboran físicos, químicos, ingenieros de materiales y electrónicos. Las contribuciones tecnológicas de la espintrónica son impactantes; tratando de superar la electrónica moderna, basada en dispositivos semiconductores como el transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET), con aplicaciones prometedoras en memorias de acceso aleatorio magnéticas (MRAM), sensores, emisores y recolección de energía. La ventaja mas importante de este tipo de tecnología es la capacidad natural de memorizar de los sistemas magnéticos (es decir su capacidad de permanecer en un estado meta-estable durante tiempos largos). Esto supone que no hace falta energía adicional para mantener el estado de un sistema, con el consecuente ahorro de la misma.

La propagación de paredes de dominio gobierna la dinámica de la magnetización en la escala relevante para aplicaciones tecnológicas existentes como memorias MRAM [4] y sensores [5], y aplicaciones futuras como memorias racetrack [6], registros de desplazamiento [7] y dispositivos para operaciones lógicas [8]. El movimiento de paredes es el mecanismo a través del cual un sistema magnético modifica su estado cuando su equilibrio es perturbado a través de una acción externa. Por esta razón, la dinámica de paredes está profundamente relacionada con las características del sistema magnético, así que el estudio de paredes es una estrategia para investigar algunas de sus propiedades, como la densidad de defectos [9] y medir la fuerza de algunas interacciones como la de Dzyaloshinskii-Moriya (DMI) [10]. Además, la dinámica de paredes en capas ultra-finas pertenece a una larga clase de procesos físicos que se pueden describir como el movimiento de una interfaz unidimensional en un medio bidimensional desordenado de forma leve. El estudio de paredes se puede usar entonces para profundizar en el conocimiento de fenómenos críticos de diversa naturaleza [11, 12].

Como hemos mencionado antes, la dinámica de la magnetización se describe correctamente por el formalismo micromagnético. Las simulaciones numéricas micromagnéticas son una herramienta muy eficiente para conectar resultados experimentales y predicciones teóricas [13], y han liderado el camino hacia la comprensión de la dinámica de la magnetización y del movimiento de paredes. El desarrollo en años recientes de la computación en paralelo de calculo científico sobre tarjetas gráficas (GPU), permite prestaciones en simulaciones micromagnéticas que eran impensables hace algunos años [14], abriendo la posibilidad de simulaciones sistemáticas de sistemas con tamaños realistas.

El objetivo de este trabajo es usar simulaciones micromagnéticas avanzadas para investigar la dinámica de paredes en distintos sistemas relevantes

para las aplicaciones tecnológicas. En el capítulo 1 se establecen los conceptos físicos fundamentales de la descripción micromagnética del magnetismo, presentando las herramientas analíticas usadas en la tesis. El capítulo 2 está dedicado a la descripción del código micromagnético utilizado. Las simulaciones se realizan mediante un código personalizado basado en C++ y CUDA, desarrollado dentro del grupo de investigación durante los años conforme a las necesidades de la propia investigación. Posteriormente el enfoque se dirige al estudio de dos problemas distintos, en los cuales se aprovecha el poder predictivo y descriptivo de las simulaciones micromagnéticas.

El primer desafío, estudiado en el capítulo 3, es investigar los efectos del desorden en la dinámica de paredes magnéticas desplazadas por medio de un campo magnético aplicado en capas ultra-finas de CoFeB. Ta/CoFeB/MgO es un sistema multi-capa cuyas propiedades han sido estudiadas, puesto que forma parte de varios dispositivos experimentales. Además, esta estructura constituye el componente fundamental de las memorias MRAM y la comprensión de la dinámica de paredes es un paso importante hacia la optimización de los tiempos de operación y de la funcionalidad de estos dispositivos. En este sentido, es importante tener en consideración la influencia que los defectos y el nivel de homogeneidad del sistema tienen sobre la propagación de paredes de dominio. De hecho, los defectos pueden generar potenciales locales que pueden retener la pared, provocando el fallo del dispositivo. La generación de defectos durante el proceso de fabricación de un dispositivo real es imprescindible y la complicada naturaleza de la propagación de paredes en un sistema desordenado no se puede describir de forma completa a través de modelos analíticos. Aunque exista una teoría fenomenológica capaz de describir la dinámica de paredes en un medio desordenado a campos bajos, el efecto del desorden en la dinámica de paredes a campos altos no ha sido estudiado en profundidad. Explotando la habilidad de las simulaciones micromagnéticas para describir y reproducir de forma realista algunas características del desorden en materiales ferromagnéticos, es posible observar de cerca la dinámica de la magnetización a una escala todavía fuera del alcance de los instrumentos experimentales, desvelando importantes conexiones entre la dinámica de paredes y el desorden propio del material. Bajo campos aplicados altos, el desorden activa procesos dinámicos internos a la pared que aceleran la disipación de energía y causan un movimiento más rápido de la misma. Este incremento de la velocidad de la pared de dominio no está directamente relacionado con el campo aplicado, sino que depende del desorden.

El segundo desafío, tratado en el capítulo 4, es la concepción de un nuevo dispositivo espintrónico basado en la generación de ondas de espín por

medio de la rotación controlada de una pared en una tira ferromagnética. La transmisión de información a través de oscilaciones periódicas de la magnetización, llamadas ondas de espín, ofrece nuevas perspectivas en la arquitectura de sensores y emisores de muy baja potencia. En nuestro trabajo presentamos un sistema con las características realistas de CoFeB e investigamos como el estado auto-oscilatorio de una pared de dominio, inducido por la inyección de una corriente continua a través de la tira, puede emitir una señal en forma de ondas de espín propagándose a frecuencias de decenas de GHz. Esta frecuencia depende directamente de la densidad de corriente fluyendo en la tira. A lo largo de este trabajo se han realizado simulaciones sistemáticas para investigar como la frecuencia emitida depende de la corriente aplicada y como ésta emisión se ve afectada por la aplicación de un campo magnético externo que modifica las condiciones de propagación en el medio ferromagnético. Los requisitos para que se de una emisión de ondas de espín son descritos en el capítulo, así como las condiciones a través de las cuales la rotación de una pared anclada tiene lugar y los mecanismos responsables de la excitación de ondas de espín.

Conclusiones y perspectivas

Este trabajo se ha dedicado al estudio de la dinámica de paredes de dominio en nanoestructuras como capas finas y nanohilos con anisotropía perpendicular. En particular, se ha profundizado en dos aspectos: el efecto del desorden en la dinámica de paredes desplazadas con campo aplicado y la emisión de ondas de espín debido a la rotación de una pared anclada a lo largo de un nanohilo. Dos herramientas teóricas han sido utilizadas para este objetivo.

Por una parte, el modelo unidimensional ha simplificado el sistema estudiado, permitiendo comprender cuáles son las fuerzas más relevantes que participan en el desplazamiento de paredes y como actúan. Comparando las predicciones de este modelo con datos experimentales, se han podido aislar aquellos aspectos de dinámica de paredes que necesitaban una mayor comprensión, enfocando el estudio sobre las características del sistema responsables de las desviaciones respecto a la predicción analítica.

Por otra parte, las simulaciones micromagnéticas han permitido una descripción cuantitativa de la dinámica de la magnetización, aclarando la compleja dinámica de la magnetización en sistemas magnéticos de varias micras, donde los distintos términos de la energía compiten a escalas distintas. El desarrollo de un código micromagnético permitió incluir en las simulaciones características necesarias para los varios estudios: variación espacial de los parámetros de materiales para describir el desorden, un control fiel de la disipación de energía a nivel local, variación espacial de la densidad de corriente y campos aplicados. Además, la programación en paralelo efectuada sobre tarjetas gráficas permitió tiempos rápidos de computación, abriendo la posibilidad de estudios sistemáticos sobre dinámicas de paredes en sistemas de tamaño realista.

Simulaciones micromagnéticas avanzadas y descripción analítica de la dinámica de paredes han sido utilizados en distintos proyectos dentro de la red europea WALL, acentuando la conexión entre observaciones experimentales y la teoría que intenta describirlas.

Dinámica de paredes de dominio en sistemas desordenados

En el capítulo 3, la necesidad de comprender las medidas experimentales sobre la propagación mediante campo aplicado de paredes en capas finas de CoFeB ha llevado a estudiar los efectos del desorden en estos sistemas para ir más allá de una interpretación del desorden como “amortiguamiento extrínseco”. Esta interpretación, frecuente en la literatura para describir de forma global el conjunto de mecanismos disipativos, no ayuda en la comprensión de los fenómenos subyacentes en la mayor disipación registrada en experimentos frente a la predicción teórica. La explicación que se da en este trabajo tiene en cuenta la dinámica de la magnetización interna en la pared que ha lugar en el régimen precesional. En este régimen, la velocidad de la pared baja porque la energía inyectada en el sistema no se convierte directamente en movimiento de la pared sino que se almacena en forma de energía cinética de los espines que precesan dentro de la pared. Se ha mostrado cómo el desorden provoca una dinámica distinta para los espines dentro de la pared que comporta una transmisión de energía desde la pared a los dominios. Esta transferencia de energía permite una disipación más rápida de la misma hacia la red, porque más espines alcanzan la precesión y la energía se disipa a través de más canales de disipación.

Este resultado sugiere que hay que tener cuidado en la estimación de los parámetros de un sistema a partir de la adecuación del modelo unidimensional a datos experimentales de movimiento de paredes. De hecho, cómo se ha demostrado en el capítulo 3, los efectos del desorden no se pueden incluir directamente de forma sencilla en el modelo unidimensional y en sus parámetros.

A través de simulaciones micromagnéticas, se pudo aislar la contribución del desorden a la velocidad de una pared de dominio en el régimen de *flow* y hemos demostrado que esta contribución es independiente del parámetro de amortiguamiento intrínseco y del campo aplicado. Por otro lado, una descripción analítica de estos procesos todavía no se ha conseguido, así como una descripción de la dependencia de la potencia disipada en función del campo aplicado.

Un paso ulterior en esta dirección sería, por un lado, describir en un sistema simplificado cómo la componente de la potencia disipada causada por el desorden sea independiente del amortiguamiento de Gilbert y sea sub-lineal con el campo aplicado. Por otro lado, chequear esta estrategia experimentalmente midiendo velocidad de paredes a campos altos en cintas

de anchura del orden de una micra: suficientemente estrechas para permitir la aplicación de campos altos sin dar lugar a nucleación de dominios y al mismo tiempo suficientemente anchas para admitir dinámica interna a la pared.

El estudio de sistemas desordenados a través simulaciones micromagnéticas presenta como mínimo dos grandes desafíos: por una parte, el desorden en los materiales aparece a escalas distintas, desde imperfecciones de escala sub-nanométrica hasta fronteras entre granos e impurezas externas. Una descripción muy fina del desorden requeriría un software multi-escala que pueda resolver las características sub-nanométricas y capaz a la vez de simular un sistema de tamaño suficiente para que la dinámica de la magnetización relacionada con el movimiento de paredes se pueda observar. Por otro lado, un estudio estadísticamente sólido de sistemas desordenados requiere varias realizaciones del desorden y la introducción de agitación térmica aumenta aún más el número de realizaciones necesarias para el estudio. Estos dos requerimientos no pueden ser cumplidos al mismo tiempo con las herramientas numéricas de hoy en día, por lo tanto hay que elegir un balance entre la precisión de la descripción micromagnética y la relevancia estadística de los resultados. Una ayuda notable en definir el desorden proviene de observaciones experimentales de las estructuras de materiales, a través de las cuales se puede determinar que tipo de desorden es más probable que sea dominante en un sistema magnético.

En este estudio enfocado sobre el régimen de flow en capas de CoFeB recocidas, la elección se ha basado sobre la estructura granular de esta aleación y sobre la dispersión de anisotropía y de su eje fácil entre granos. De todas formas, variaciones locales de amortiguamiento de Gilbert, de magnetización de saturación, variación de la constante de intercambio entre granos, tal vez habrían añadido precisión a este estudio. La elección de la ventana temporal en la cual observar la dinámica no permitió una descripción adecuada de la velocidad de la pared a campos bajos. Para describir este régimen de *creep*, de hecho, se requieren ventanas temporales extremadamente largas [15].

Medidas experimentales de los efectos del desorden suponen también el estudio de dinámica de paredes en sistemas expuestos a irradiación con iones [16]. La cantidad de desorden introducida en el sistema es proporcional a la intensidad de la irradiación. Por otro lado, parámetros como magnetización de saturación, constante de anisotropía, amortiguamiento de Gilbert y constante de DMI pueden ser tuneadas mediante irradiación. Este control espacial de las propiedades del material tiene aplicaciones en dispositivos basados en movimiento de paredes.

Emisor de ondas de espín basado en una pared de dominio

La segunda parte de esta tesis se ha dedicado a la presentación y estudio de un nuevo tipo de emisor de ondas de espín. En el capítulo 4 se ha presentado este concepto y probado su funcionamiento y características a través de simulaciones micromagnéticas en un sistema ideal y optimizado. El estudio se ha realizado en dos etapas: en primer lugar se ha usado el modelo unidimensional para comprender la dinámica de rotación anclada de una pared de dominio y se han definido los requisitos geométricos para el funcionamiento del emisor de ondas de espín; en segundo lugar se ha realizado un estudio sistemático de la dependencia de la emisión de ondas con la corriente inyectada en el sistema.

El estudio sistemático de este tipo de problemas necesita un considerable esfuerzo de computación. El análisis de los espectros de frecuencia y del vector de onda requiere una alta resolución en el tiempo y en el espacio para explorar la emisión de ondas de espín a altas frecuencias. Por otra parte, el estado auto-oscilatorio de una pared anclada se establece después de decenas de nanosegundos, lo cual requiere una larga ventana de integración temporal. La computación en paralelo basada en CUDA se ha revelado fundamental tanto en las simulaciones como en el subsecuente análisis de datos.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, nuestro trabajo presenta tres resultados notables:

1. El dispositivo opera a corrientes muy bajas
2. La señal emitida se puede modular variando el voltaje aplicado o aplicando un campo externo conjuntamente con la corriente
3. La señal emitida es de alta frecuencia (decenas de GHz) y muy coherente

Desde un punto de vista más teórico se ha explorado como la emisión coherente de ondas de espín, generada por la pared de dominio, es el resultado de la competición entre la interacción de intercambio (de corto alcance) y la interacción dipolar (de largo alcance) generada por la misma pared. Esta interacción es periódica y non-lineal, lo cual produce la emisión de ondas con la frecuencia de rotación de la pared, así como armónicos impares.

La elección de un material muy común para este estudio, como CoFeB, y la estructura relativamente sencilla en la que se basa este dispositivo, abren la posibilidad al desarrollo de prototipos experimentales basados en el mismo. Recientes estudios sobre una aleación de CoFe con amortiguamiento

muy bajo [17] hacen de este material un buen candidato para este sistema. Por otro lado, la detección de oscilaciones de la pared mediante magnetorresistencia anisótropa (AMR) puede ser difícil debido a la baja relación señal-ruido de una pared muy pequeña en una tira larga. Varias técnicas de detección de ondas de espín como micro Brillouin-Light-Scattering (μ BLS) y medidas indirectas como efecto spin-hall inverso generado por el espín pumping en un sustrato de metal pesado, constituyen alternativas válidas [18].

Un aspecto importante que hay que considerar es el efecto del desorden: la rugosidad de los bordes causada por el proceso de fabricación no parece alterar la propagación de ondas de espín. Defectos intrínsecos del material, por otra parte, pueden impedir la rotación de la pared y limitar la ventana de operación del dispositivo.

Ulteriores exploraciones de las capacidades de este emisor de ondas de espín incluyen el posicionamiento de varios emisores en el mismo hilo, con el objetivo de amplificar la señal emitida. Esto se puede alcanzar aplicando una misma corriente a través de una serie de paredes ancladas y mirando a las superposición de las señales, o bien aplicando dos distintas corrientes anti-paralelas en dos secciones distintas del mismo hilo para obtener emisión de ondas en direcciones opuestas por parte de dos paredes distintas, obteniendo interferencias constructivas o destructivas en la región que separa las dos paredes de dominio.

Publicaciones

- **M. Voto**, L. Lopez-Diaz, and L. Torres, “Effects of grain size and disorder on domain wall propagation in CoFeB thin films,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 18, p. 185001, May 2016.
- **M. Voto**, L. Lopez-Diaz, L. Torres, and S. Moretti, “Disorder-induced domain wall velocity shift at high fields in perpendicularly magnetized thin films,” *Phys. Rev. B*, vol. 94, no. 17, p. 174438, Nov. 2016.
- **M. Voto**, L. Lopez-Diaz, and E. Martinez, “Pinned domain wall oscillator as a tuneable direct current spin wave emitter,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 13559, Oct. 2017.
- A. Pfeiffer, R. M. Reeve, **M. Voto**, W. Savero-Torres, N. Richter, L. Vila, J.-P. Attane, L. Lopez-Diaz, and M. Kläui, “Geometrical control of pure spin current induced domain wall depinning,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 29, no. 8, p. 85802, Mar. 2017.
- S. Moretti, **M. Voto**, and E. Martinez, “Dynamical depinning of chiral domain walls,” *Phys. Rev. B*, vol. 96, no. 5, p. 54433, Aug. 2017.
- B. Borie, **M. Voto**, L. Lopez-Diaz, H. Grimm, M. Diegel, M. Kläui, and R. Mattheis, “Reliable Propagation of Magnetic Domain Walls in Cross Structures for Advanced Multiturn Sensors,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 8, no. 4, p. 44004, Oct. 2017.
- L. Herrera Diez, G. Durin, V. Jeudy, Y. Liu, B. Sarma, **M. Voto**, G. Agnus, D. Bouville, L. Vila, J. Langer, B. Ocker, L. Lopez-Diaz, and D. Ravelosona, “Creep motion of magnetic domain walls in CoFeB/MgO microstructures,” In preparation.
- L. Herrera Diez, **M. Voto**, M. Belmeguenai, A. Casiraghi, G. Durin, V. Jeudy, V. Sluka, A. D. Kent, T. Devolder, A. Lamperti, R. Manton, G. Agnus, J. Langer, B. Ocker, Lopez- Dias and D. Ravelosona,

“Magnetic domain wall motion beyond creep: defects and interface engineering,” In preparation.

- Gurucharan V. Karnad, Eduardo Martinez, **M. Voto**, Tomek Schulz, and Mathias Kläui, “Study of energetics of 360° domain walls through annihilation,” In preparation.

Bibliografía

- [1] Stephen Blundell y David Thouless. *Magnetism in Condensed Matter*. Vol. 71. 1. Oxford University press, 2003, págs. 94-95. DOI: [10.1119/1.1522704](https://doi.org/10.1119/1.1522704).
- [2] W. Brown. *Micromagnetics*. Interscience, 1963.
- [3] David D. Awschalom. *Handbook of Spintronics*. Springer. ISBN: 9789400768918.
- [4] J. Akerman. “APPLIED PHYSICS: Toward a Universal Memory”. En: *Science* 308.5721 (2005), págs. 508-510. ISSN: 0036-8075. DOI: [10.1126/science.1110549](https://doi.org/10.1126/science.1110549).
- [5] Roland Weiss, Roland Mattheis y Günter Reiss. “Advanced giant magnetoresistance technology for measurement applications”. En: *Measurement Science and Technology* 24 (2013), pág. 082001. DOI: [10.1088/0957-0233/24/8/082001](https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/8/082001).
- [6] Stuart Parkin y See-Hun Yang. “Memory on the racetrack”. En: *Nature Nanotechnology* 10.3 (2015), págs. 195-198. ISSN: 1748-3387. DOI: [10.1038/nnano.2015.41](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.41).
- [7] Robert L Stamps y col. “The 2014 Magnetism Roadmap”. En: *Journal of Physics D: Applied Physics* 47 (2014), pág. 333001. ISSN: 0022-3727. DOI: [10.1088/0022-3727/47/33/333001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/33/333001). arXiv: [1410.6404](https://arxiv.org/abs/1410.6404).
- [8] D A Allwood y col. “Magnetic domain-wall logic.” En: *Science* 309.2005 (2005), págs. 1688-1692. DOI: [10.1126/science.1108813](https://doi.org/10.1126/science.1108813).
- [9] C. Burrowes y col. “Low depinning fields in Ta-CoFeB-MgO ultrathin films with perpendicular magnetic anisotropy”. En: *Applied Physics Letters* 103.18 (2013), pág. 182401. DOI: [10.1063/1.4826439](https://doi.org/10.1063/1.4826439).
- [10] A. Hrabec y col. “Measuring and tailoring the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in perpendicularly magnetized thin films”. En: *Physical Review B* 90.2 (jul. de 2014), pág. 020402. DOI: [10.1103/PhysRevB.90.020402](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.020402).

- [11] S. Lemerle y col. “Domain Wall Creep in an Ising Ultrathin Magnetic Film”. En: *Physical Review Letters* 80.4 (1998), págs. 849-852. DOI: [10.1103/PhysRevLett.80.849](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.849).
- [12] V. Jeudy y col. “Universal Pinning Energy Barrier for Driven Domain Walls in Thin Ferromagnetic Films”. En: *Physical Review Letters* 117.5 (2016), págs. 1-5. ISSN: 10797114. DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.057201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.057201). arXiv: [arXiv:1603.01674v1](https://arxiv.org/abs/1603.01674v1).
- [13] Burkard Hillebrands y Kamel Ounadjela, eds. *Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures I*. Vol. 83. Topics in Applied Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. ISBN: 978-3-540-41191-8. DOI: [10.1007/3-540-40907-6](https://doi.org/10.1007/3-540-40907-6).
- [14] L Lopez-Diaz y col. “Micromagnetic simulations using Graphics Processing Units”. En: *Journal of Physics D: Applied Physics* 45.32 (2012), pág. 323001. ISSN: 0022-3727. DOI: [10.1088/0022-3727/45/32/323001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/32/323001).
- [15] Jonathan Leliaert y col. “Creep turns linear in narrow ferromagnetic nanostrips.” En: *Scientific reports* 6 (2016), pág. 20472. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/srep20472](https://doi.org/10.1038/srep20472).
- [16] L. Herrera Diez y col. “Controlling magnetic domain wall motion in the creep regime in He+-irradiated CoFeB/MgO films with perpendicular anisotropy”. En: *Applied Physics Letters* 107.3 (2015), pág. 032401. DOI: [10.1063/1.4927204](https://doi.org/10.1063/1.4927204).
- [17] Martin A. W. Schoen y col. “Ultra-low magnetic damping of a metallic ferromagnet”. En: *Nature Physics* 12.9 (2016), págs. 839-842. ISSN: 1745-2473. DOI: [10.1038/nphys3770](https://doi.org/10.1038/nphys3770). arXiv: [1512.03610](https://arxiv.org/abs/1512.03610).
- [18] A. V. Chumak y col. “Magnon spintronics”. En: *Nature Physics* 11.6 (2015), págs. 453-461. ISSN: 1745-2473. DOI: [10.1038/nphys3347](https://doi.org/10.1038/nphys3347).