

Simulaciones micromagnéticas aplicadas al diseño y estudio de nanoestructuras

Los materiales ferromagnéticos, masivos y de baja dimensionalidad, exhiben propiedades interesantes, tales como la demagnetización ultrarrápida, la magnetización en el rango de los picosegundos y la dinámica precesional, de interés para diversas aplicaciones. Estas propiedades incluyen también procesos más lentos, como son el proceso de reversión de la magnetización, la dinámica de las paredes de dominio y la dinámica de los vórtices magnéticos. En particular, la teoría del Micromagnetismo, desarrollada por Landau, Lifschitz y Brown (1935-1940), permite describir los procesos de magnetización y las propiedades características del ciclo de histéresis de materiales ferromagnéticos nanoestructurados. Asimismo, estas propiedades magnéticas, estáticas y dinámicas de los elementos ferromagnéticos, están determinadas por la contribución relativa de diferentes términos energéticos. Una herramienta que permite resolver las ecuaciones micromagnéticas para estructuras magnéticas de baja dimensionalidad es el programa numérico OOMMF (de las siglas Object Oriented MicroMagnetic Framework), el cual resuelve las ecuaciones de Landau- Lifschitz- Gilbert mediante el método de diferencias finitas. La posibilidad de predecir las propiedades de nanoestructuras mediante simulaciones micromagnéticas, permite abordar el diseño de materiales en interacción con dichas nanoestructuras, para su evaluación electroquímica como sensores multipropósito.

Objetivos:

- Impartir conocimientos sobre el micromagnetismo de estructuras uni y bidimensionales, de interés actual en diversas aplicaciones nanotecnológicas. Para ello, se emplearán herramientas de cálculo numérico en 2D y 3D, junto con aplicaciones concretas entendidas desde la caracterización electroquímica, con el objetivo particular de entrenar a los/as alumnos/as en el uso de programas (OOMMF), que se usan actualmente para la resolución de estructuras magnéticas.
- Introducir conceptos básicos de skyrmions magnéticos y su modelamiento en micromagnetismo, implementando la interacción de Dzyaloshinskii–Moriya superficial.
- Presentar los fundamentos sobre resonancia magnética y nanohilos con diámetros modulados.
- Resolver y exponer los trabajos prácticos propuestos por los docentes del curso, en formato póster.

PROGRAMA

Módulo 1: *Principios y fundamentos del Micromagnetismo.*

Breve repaso de conceptos fundamentales de materiales magnéticos. Fundamentos básicos del micromagnetismo: Teoría de dominio y modelo micromagnético. Energías involucradas. Ecuación de movimiento. Simulación de procesos micromagnéticos: Estados de equilibrio. Minimización de la energía. Ciclos de histéresis. Procesos de reversión de la magnetización. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Módulo 2: *Simulación de nanoestructuras magnéticas en OOMMF 2D.*

Herramientas de simulación micromagnética: uso del software Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF). Selección de parámetros. Descripción de los comandos. OOMMF y Micromagnetismo: Construcción del “Micromagnetic Input Format” (MIF) para el modelamiento de sistemas bidimensionales. Ejemplos. Definición de problemas a resolver. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Módulo 3: *Simulación de nanoestructuras magnéticas en OOMMF 3D.*

Presentación de archivos de entrada (MIF). Rutas de acceso. Acceso a Nanohub. Simulación de nanoestructuras cilíndricas para evaluar propiedades dependientes de la geometría, el tamaño y la composición que determinan el ordenamiento de los momentos magnéticos en nanoestructuras. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Módulo 4: *Introducción a los skyrmions magnéticos y su modelamiento en micromagnetismo.*

Perspectiva general. Definiciones básicas: skyrmion magnético, carga topológica. Interacción de Dzyaloshinskii–Moriya. Diferencias entre skyrmions y burbujas magnéticas. Evidencia experimental de skyrmions a temperatura ambiente. Estabilidad y dinámica de skyrmions. Aplicaciones. Modelamiento de skyrmions en sistemas magnéticos utilizando la teoría micromagnética. Implementación de la interacción de Dzyaloshinskii–Moriya superficial. Estabilización de skyrmions. Definición de problemas a resolver. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Módulo 5: *Propiedades estáticas y dinámicas de nanoestructuras moduladas.*

Antecedentes teóricos. Aproximación al continuo. Fundamentos sobre resonancia magnética. Burbujas skyrmiónicas. Nanohilos con diámetros modulados. Dinámica de la magnetización. Ejemplos. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

Módulo 6: *Electroquímica de nanoestructuras magnéticas.*

Fundamentos y aplicaciones de electroquímica: La interfase electroquímica. Procesos electroquímicos. Fundamentos técnicas electroquímicas convencionales (voltamperometría cíclica, espectroscopia de impedancia electroquímica). Aspectos experimentales. Los análogos eléctricos y los procesos químicos. Ejemplos de aplicación a nanoestructuras magnéticas. Actividades. Exposición y discusión de resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Módulo 1

[1.1] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Seventh edition, Wiley India, New Delhi, India. (2009).

[1.2] A. H. Morrish, The Physical Principles of Magnetism. (IEEE Press, New York, United States, 2001).

[1.3] B. D. Cullity, C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, Second Edition. IEEE Press and John Wiley & Sons, Inc., Publication. United States of America (2009). [61] Aharoni, A. (1996). Introduction to the Theory of Ferromagnetism International Series of Monographs on Physics. Oxford University Press Inc., New York.

[1.4] O'Handley, R. C. (1999). Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. Wiley-Interscience, New York. [64] M. J. Donahue, R. D. McMichael, Physica B: Condensed Matter 233, 272–278 (1997).

[1.5] Artículos científicos seleccionados por los docentes a cargo del módulo.

Módulos 2 y 3

[2.1] J. E. Miltat, M. J. Donahue, M. J. Handbook of magnetism and advanced magnetic materials - Numerical micromagnetics: Finite difference methods. John Wiley & Sons, Universidad Estatal de Pensilvania (2007).

[2.2] Software y manuales extraídos de <https://math.nist.gov/oommf/>

[2.3] Artículos científicos seleccionados por los docentes a cargo del módulo.

Módulo 4

[3.1] F. Tejo, E. Saavedra, J.C. Denardin, J. Escrig. Dynamic susceptibility of skyrmion clusters in Co/Pt nanodots. Applied Physics Letters 117 (15)

[3.2] F. Tejo, et al. Stabilization of Magnetic Skyrmions on Arrays of Self-Assembled Hexagonal Nanodomes for Magnetic Recording Applications. ACS Applied Materials & Interfaces 12 (47), 52231-53570

[3.3] F. Tejo, F. Velozo, R.G. Elías, J. Escrig. Oscillations of skyrmion clusters in Co/Pt multilayer nanodots. Scientific Reports 10 (16517)

[3.4] N. Vidal-Silva, A. Riveros F. Tejo J. Escrig, D. Altbir. Controlling the nucleation and annihilation of skyrmions with magnetostatic interactions. Applied Physics Letters 115 (8).

[3.5] F. Tejo, A. Riveros, J. Escrig, K.Y. Guslienko, O. Chubykalo-Fesenko. Distinct magnetic field dependence of Néel skyrmion sizes in ultrathin nanodots. Scientific reports 8 (1), 1-10

[3.6] A. Fert, V. Cros, J. Sampaio. Skyrmions on the track. Nat. Nanotechnol. 8, 152–156 (2013).

[3.7] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville, A. Fert. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures. Nat. Nanotechnol. 8, 839–844 (2013).

[3.8] O. Boulle, et al. Room-temperature chiral magnetic skyrmions in ultrathin magnetic nanostructures. *Nat. Nanotechnol.* 11, 449–454 (2016)

[3.9] C. Moreau-Luchaire, et al. Additive interfacial chiral interaction in multilayers for stabilization of small individual skyrmions at room temperature. *Nat. Nanotechnol.* 11, 444 (2016)

[3.10] K. S. Ryu, S.-H. Yang, L. Tomas, S. S. P. Parkin. Chiral spin torque arising from proximity-induced magnetization. *Nat. Commun.* 5, 3910 (2014).

[3.11] A. Fert, N. Reyren, V. Cros. Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications. *Nature Reviews Materials* volume 2, Article number: 17031 (2017).

Módulo 5

[4.1] Investigation Of Static And Dynamic Magnetic Properties Of Two-Dimensional Magnonic Crystals, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics Ruma Mandal.

[4.2] Quasistatic and ultrafast magnetization dynamics in magnetic nanostructures, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics (Experimental) by Bivas Rana

[4.3] Investigation of static and dynamic magnetic properties in magnetic micro and nano elements with varying shapes, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics (Experimental) by Bipul Kumar Mahato

[4.4] Collective Magnetization Dynamics in Magnetic Nanostructures at Various Length Scales and Time Scales, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Science) in Physics Susmita Saha

[4.5] Susceptibilidad dinámica de nanoestructuras y geometrías complejas, Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencia con Mención en Física, Eduardo Saavedra

[4.6] Proposal of a micromagnetic standard problem for ferromagnetic resonance simulations, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 421, 2017, Pages 428-439, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.08.009>.

[4.7] Dynamic susceptibility of nanopillars, N. Dao et al 2004, *Nanotechnology* 15 S634

[4.8] Magnetic normal modes of nanoelements, R.D. McMichael, M.D. Stiles, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 10J901.

Módulo 6

[5.1] Allen J. Bard, Larry R. Faulkner. *Electrochemical Methods. Fundamentals and*

[5.2] *Applications.* 2da Edición. 2001 John Wiley & Sons, Inc.

[5.3] E. Barsoukov, J. R. Macdonald. *Impedance Spectroscopy. Theory, experiment and applications.* 2da. Edición. 2005 John Wiley & Sons, Inc.

[5.4] Artículos científicos seleccionados por el profesor.