

Magnetismo en films y multicapas magnéticas

INFORME FINAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
SECRETARÍA DE CIENCIA, TÉCNICA Y POSGRADO

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN APROBADOS POR RESOLUCIÓN N° 658/05-R

1- DATOS DEL PROYECTO:

Nombre del Director del Proyecto: ...**Alejandro Butera**.....

Título del Proyecto: "**Magnetismo en films y multicapas magnéticas**" (06/C235) aprobado por Resolución N° 882/07.....

➤ Breve descripción del proyecto (aproximadamente 120 palabras)

En este proyecto se investigaron distintas propiedades magnéticas de nanoestructuras artificiales, compuestas por materiales ferromagnéticos, antiferromagnéticos, semiconductores y granulares. Con diversas técnicas experimentales (magnetización dc, resonancia ferromagnética y microscopía magnética, etc.) se estudió el magnetismo a escala del nanómetro en películas delgadas y multicapas. Se analizó también el efecto del tamaño de las nanoestructuras en el comportamiento magnético de las mismas, prestándose especial atención a la influencia de superficies e interfaces en el orden magnético, a las anisotropías magnéticas y a la presencia de distintos materiales en el espaciado de las multicapas. Algunos de los sistemas en estudio han sido multicapas de Fe/Fe-SiO₂/Fe y Fe/Fe-SiO₂/Permalloy, films de MnAs y Fe/MnAs, partículas de Fe₃O₄ embebidas en un ferromagneto, films y partículas de FePt, etc. El crecimiento de las nanoestructuras se realizó por técnicas de crecimiento en alto vacío como sputtering y evaporación de haces moleculares (MBE). Un aspecto importante del proyecto ha sido la formación de estudiantes de grado y posgrado en el área de nanociencia y nanomagnetismo.

➤ Dificultades encontradas en la ejecución del proyecto (120 palabras)

(de índole documental, experimental, económicas, ambiental, de funcionamiento de grupo de investigadores o de sus vinculaciones científicas/tecnológicas ocurridas durante esta etapa de la ejecución del proyecto)

Hemos tenido dificultades con algunos de los equipos experimentales utilizados en este proyecto (microscopio de fuerza magnética y magnetómetro de muestra vibrante). Estos equipos estuvieron varios meses sin poder utilizarse debido a problemas con la exportación temporal para ser reparados en el exterior.

➤ Grado de alcance de los objetivos científicos y tecnológicos (detalle el porcentaje estimado de cumplimiento de los objetivos propuestos en su proyecto. En caso de incumplimiento, debe explicar los motivos del mismo)

Durante el transcurso del proyecto hemos realizado los siguientes trabajos de investigación:

- Se estudió el acople de films ferromagnéticos a través de un espaciador granular. En los sistemas Fe/Fe-SiO₂/Fe y Fe/Fe-SiO₂/Permalloy se realizaron medidas de resonancia magnética a distintas frecuencias y se modelaron los espectros obtenidos en tricapas de este tipo. A partir de estas mediciones se pudo establecer la naturaleza y la magnitud del acople entre capas en función de la concentración de Fe y del espesor del espaciador. Se estudiaron también multicapas de Fe-SiO₂/Co/Ru/Co/Fe-SiO₂ en el que un film granular diluido (Fe-SiO₂) se pone en contacto con un antiferromagneto sintético (Co/Ru/Co). Hemos hallado que la interacción entre ambos films tiende a descompensar el orden de la tricapa antiferromagnética. Estos temas constituyeron el trabajo de tesis doctoral del Mg. Javier Gómez, quien finalizó su doctorado en 2008 y actualmente realiza una estadia postdoctoral en Francia.
- Hemos estado trabajando en la caracterización magnética de nanopartículas y films de FePt de alta anisotropía magnetocristalina. En estos sistemas hemos publicado 3 trabajos y hemos hecho varias contribuciones a distintas conferencias. Actualmente seguimos con las investigaciones en esta línea de trabajo con la colaboración del Dr. Marcelo Vásquez Mansilla y la Dr. Agustina Asenjo del CSIC, Madrid. En agosto de 2008 se incorporó el Lic. Edwin Sallica Leva a nuestro grupo para realizar su tesis de maestría en estos sistemas.
- Hemos investigado la estabilidad térmica de multicapas de nanopartículas de Fe₃O₄ embebidas en permalloy, en donde se observa un aumento de la temperatura de bloqueo debido a la interacción de las partículas con la matriz ferromagnética. Este trabajo ha sido concluido y publicado y dejamos de trabajar en esta área debido a que los Dr. José Vargas y Javier Gómez se fueron a realizar estadias postdoctorales en el exterior. Actualmente estamos retomando la investigación en estos sistemas.
- Realizamos modelos y simulaciones numéricas para explicar los espectros de resonancia ferromagnética que se observan en nanotubos de manganita. Se publicó un trabajo y se realizó una presentación a conferencia.
- Hemos investigado el sistema de película delgada de MnAs a través de resonancia ferromagnética. Estas películas delgadas fueron crecidas sobre arseniuro de galio (GaAs) en dos direcciones cristalinas diferentes (100) y (111). A través de resonancia ferromagnética (FMR) pudimos obtener más información de como nuclea la fase b (fase no magnética de alta temperatura). La técnica FMR es muy sensible a cambios magnéticos dentro de un material. Cuando el MnAs es crecido sobre GaAs(100) la coexistencia de fases se presenta de forma autoordenada. Ambas fases se alternan formando arreglos de cintas a lo largo del la película delgada cuyo espesor depende de la temperatura de la muestra. Este arreglo en cintas alternadas define el comportamiento magnético de la fase a y es diferente al que presentará si esta fase estuviese distribuida homogéneamente. Este hecho nos sirvió para identificar que efectivamente a 200K ya existe un arreglo de cintas alternadas de ambas fases pero que solo ocurre en ciertos sectores del material. Por otro lado, en MnAs/GaAs(111) la bibliografía reporta que la coexistencia ocurre de forma desordenada, no habiendo ningún patrón definido. A través de FMR pudimos observar que esto efectivamente sucede para todo el rango de coexistencia de fases.
- Hemos estudiado el sistema de bicapas de Fe(5nm)/MnAs (100nm) recubiertas con una capa protectora de 5nm de ZnSe, depositadas epitaxialmente por MBE sobre substratos semiconductores de GaAs (100). Esta línea se desarrolla en colaboración con el Dr. V. H. Etgens del

Institut des NanoSciences de París Hemos explorado la estructura de dominios magnéticos en presencia de un pequeño campo magnético variable por medio de microscopía de fuerza magnética (MFM) a temperatura ambiente y realizado un estudio exhaustivo de resonancia ferromagnética (FMR) de la capa de Fe en función de la orientación de la muestra y la temperatura (entre 230 K y 350 K). Observamos que la evolución con temperatura de la línea de absorción del Fe cambia drásticamente (posición del campo de resonancia, intensidad, ancho y forma de línea) en el intervalo de temperaturas donde se produce la coexistencia de fases del MnAs. Incorporamos también un completo análisis de la variación angular de la resonancia de la capa de Fe mediante mediciones sistemáticas en función del ángulo para ciertos valores significativos de temperatura, lo que nos permitió caracterizar y cuantificar, mediante simulaciones numéricas, las diferentes contribuciones a la anisotropía magnética de la capa de Fe. Verificamos que el término uniaxial domina fuertemente en todo el intervalo de temperaturas estudiado, a expensas de la anisotropía magnetocristalina inclusive en la zona de coexistencia de fases del MnAs. Importantes efectos de interfaz entre la capa de MnAs y Fe son compatibles con esta observación. Para interpretar todos los resultados propusimos un modelo sencillo que incorpora el campo demagnetizante producido por la capa de MnAs, y que la acopla a la capa de Fe. Además, hemos estimado que un campo de acoplamiento de valor máximo cercano a los 500 Oe permite explicar satisfactoriamente nuestros datos experimentales.

2 – INTEGRANTES DEL PROYECTO

Apellido y Nombre	Categoría de docente – invest.	Cargo y Dedic.Doc.	Dedicación al Proyecto (hs. Semanales)	Evaluación (*)
Butera, Alejandro	II	Prof.Adjunto	45	
Alejandro, Gabriela	III	-	22.5	Satisfactorio
Milano, Julián	IV	JTP	22.5	Satisfactorio
Gómez, Javier		-	45	Satisfactorio
Vargas, José		-	12	Satisfactorio

(*) El Director del proyecto deberá evaluar el desempeño de cada integrante del proyecto, otorgándole el concepto de: satisfactorio no satisfactorio.

3 – PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONFERENCIAS REALIZADAS POR LOS INTEGRANTES DEL PROYECTO

Trabajos publicados, en prensa, o enviados

1. Thermal Stabilization of Magnetic Nanoparticles Embedded in a Ferromagnetic Matrix, J.M. Vargas, J. Gómez, R.D. Zysler, and A. Butera, Nanotechnology, **18**, 115714 (2007)
2. Order-Disorder Transformation in FePt Nanoparticles Studied by Ferromagnetic Resonance, J. M. Vargas, R. D. Zysler, and A. Butera, Applied Surface Science, **254**, 274 (2007)

3. Ferromagnetic coupled modes in continuous/granular multilayers. Model and experiments. J. Gómez J. L. Weston, and A. Butera, *Phys. Rev. B* **76**, 184416 (2007)
4. Dynamic response of magnetic nanoparticles arranged in a tubular shape, J. Curiale, R. D. Sánchez, C. A. Ramos, A. G. Leyva, A. Butera, *J. Magn. Magn. Mat.* **320**, e218-221 (2008)
5. Angular dependence of the ferromagnetic resonance spectrum in continuous/heterogeneous multilayers. J. Gómez J. L. Weston, and A. Butera, *J. Magn. Magn. Mat.* **320**, e239-241 (2008)
6. Effect of magneto-structural phase coexistence in MnAs on the magnetic behavior of MnAs/Fe bilayers, G. Alejandro, L. B Steren, J. Milano, A. Butera, M. Eddrief, and V. H. Etgens *J. Magn. Magn. Mat.* **320**, e408-411 (2008)
7. Ferromagnetic Resonance of Disordered FePt Thin Films, M. Vásquez Mansilla, J. Gómez, and A. Butera, *IEEE Trans. Mag.* Vol.44, pp. 2883 – 2886 (2008)
8. Thickness and temperature dependence of the dynamic magnetic behavior in disordered FePt films, M. Vásquez Mansilla, J. Gómez, E. Sallica Leva, F. Castillo Gamarra, A. Asenjo Barahona, and A. Butera (aceptado JMMM, Diciembre 2008)
9. REPETTO LLAMAZARES, A. H. V., Julian MILANO, STEREN, L. B., GARCIA, V., MARANGOLO, M., EDDRIEF, M., ETGENS, V. H. Ferromagnetic resonance study of MnAs/GaAs(111) thin films. *Physica B - Condensed Matter.* , v.398, p.372 - 375, 2007.
10. Julian MILANO, LLOIS, A. M. Semiclassical electronic transport calculations in multilayered granular alloys. *Journal of Applied Physics.* , v.102, p.13705 - , 2007.
11. Julian MILANO, STEREN, L. B., REPETTO LLAMAZARES, A. H. V., GARCIA, V., EDDRIEF, M., MARANGOLO, M., ETGENS, V. H. Detection of the magnetostructural phase coexistence in MnAs epilayers at a very early stage. *Applied Physics Letters.* , v.92, p.03250 - , 2008.
12. HELMAN, C., Julian MILANO, STEREN, L. B., LLOIS, A. M. Semiclassical electronic transport in MnAs thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* , v.320, p.e415 - e417, 2008.
13. SACCHI, M., MARANGOLO, M., SPEZZANI, C., COELHO, L., BREITWIESER, R., Julian MILANO, ETGENS, V. H. Uniaxial anisotropy and temperature driven magnetization reversal of Fe deposited on a MnAs/GaAs(001) magnetic template. *Physical Review B - Solid State.* , v.77, n.16, p.65317 - , 2008.

Comunicaciones a Congresos y Reuniones Científicas

1. Dynamic response of magnetic nanoparticles arranged in a tubular shape, J. Curiale, R. D. Sánchez, C. A. Ramos, A. G. Leyva, A. Butera, VIII LAW3M, Rio de Janeiro, Brazil, August 2007.
2. Ferromagnetic coupled modes in continuous/granular multilayers. Model and experiments. J. Gómez J. L. Weston, and A. Butera, VIII LAW3M, Rio de Janeiro, Brazil, August 2007.
3. Ferromagnetic Resonance of Disordered FePt Thin Films, M. Vásquez Mansilla, J. Gómez, and A. Butera, Intermag Conference, Madrid, Spain, May 2008.
4. Static and dynamic properties of FCC FePt ferromagnetic films, M. Vásquez Mansilla, J. Gómez, E. Sallica Leva, F. Castillo Gamarra, A. Asenjo Barahona, and A. Butera, "FCM2008-At the Frontiers of Condensed Matter" Buenos Aires, Argentina, Dec 2008 (Charla Invitada)
5. Stripe domains in Permalloy films as observed by ferromagnetic resonance and magnetic force microscopy, C. A. Ramos , E. Vassallo, J. Gómez, and A. Butera , "FCM2008-At the Frontiers of Condensed Matter" Buenos Aires, Argentina, Dec 2008
6. Evidencias de microscopía de fuerza magnética y de resonancia ferromagnética de la formación de dominios perpendiculares en tiras en films de Ni80Fe20, Ramos C. A., Gomez

- J, Butera A., Vassallo Brigneti E., Montebianco E., Guimaraes F, Jais J. P., y Ghenzi N. F. 92a. Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, Salta, 24 - 28 de Septiembre de 2007.
7. Cambio en la estructura de dominios en films delgados de FePt, M. Vásquez Mansilla, J. Gómez, y A. Butera, XXI jornadas de investigación y III jornadas de posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, 1-3 octubre de 2008.
 8. Coexistencia de fases en MnAs observada por medio de resonancia ferromagnética en bicapas de MnAs/Fe, G. Alejandro, L. B Steren, J. Milano, A. Butera, M. Eddrief, and V. H. Etgens. 92a. Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, Salta, 24 - 28 de Septiembre de 2007.
 9. STEREN, L. B., Julian MILANO, VODUNGBO, B., ZHENG, Y., ETGENS, V. H., VIDAL, F. Magnetic Order in CeO₂:Co Thin Films, VIII LATIN AMERICAN WORKSHOP ON MAGNETISM, MAGNETIC MATERIALS AND THEIR APPLICATION, 2007, Río de Janeiro.
 10. ALEJANDRO, G., STEREN, L. B., Julian MILANO, EDDRIEF, M., ETGENS, V. H. Observation of phase coexistence in MnAs by Ferromagnetic Resonance Measurements on MnAs-Fe Bilayers: VIII LATIN AMERICAN WORKSHOP ON MAGNETISM, MAGNETIC MATERIALS AND THEIR APPLICATION, 2007, Río de Janeiro.
 11. HELMAN, C., Julian MILANO, STEREN, L. B., LLOIS, A. M. Semiclassical Electronic Transport Calculations in MnAs Thin Films, VIII LATIN AMERICAN WORKSHOP ON MAGNETISM, MAGNETIC MATERIALS AND THEIR APPLICATION, 2007, Río de Janeiro.
 12. HELMAN, C., Julian MILANO, STEREN, L. B., LLOIS, A. M. Transporte semiclásico en películas delgadas de MnAs: 92 REUNIÓN NACIONAL DE FÍSICA, 2007, Salta.
 13. TORTAROLO, M., SIRENA, M., Julian MILANO, STEREN, L. B., EDDRIEF, M., ETGENS, V. H. Confinement effects in magnetism of thin MnAs ribbons: AT THE FRONTIERS OF CONDENSED MATTER IV, 2008, Ciudad de Buenos Aires.
 14. HELMAN, C., Julian MILANO, PERALTA-RAMOS, J., LLOIS, A. M. Magnetotransporte en junturas túnel Fe/ZnSe/Fe con interfaces interdifundidas: 93 REUNIÓN ANUAL DE FÍSICA ARGENTINA, 2008, Ciudad de Buenos Aires.
 15. HELMAN, C., FERRARI, V., Julian MILANO, LLOIS, A. M. Modeling the magnetic tunnel conductance at interdiffused interfaces in Fe/ZnSe/junctions: AT THE FRONTIERS OF CONDENSED MATTER IV, 2008, Ciudad de Buenos Aires.
 16. Low field magnetoresistance of ferromagnetic manganites, G. Alejandro, L. B. Steren, H. Pastoriza, D. Vega, C. Rojas Sánchez, B. Alascio. Presentado en Joint European Magnetic Symposia (JEMS), Dublin, 2008.
 17. Low magnetoresistance effect in manganites, L. B. Steren, G. Alejandro, H. Pastoriza, D. Vega, C. Rojas Sánchez, B. Alascio. Presentado en INTERMAG, Madrid, 2008.
 18. Magnetic study of MnAs/Fe bilayers, G. Alejandro, L. B. Steren, J. Milano, M. Eddrief, V. H. Etgens. Presentado en International Conference on Nanoscale Magnetism, Estambul, 2007.

4 – FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS (*) (tesistas, becarios, pasantes)

-Gómez, Javier (finalizó su tesis doctoral en 2008, actualmente está realizando una estadía postdoctoral en Francia)

-Edwin Sallica Leva (comenzó su tesis de Maestría en agosto de 2008)

Alejandro Butera

San Carlos de Bariloche, 11 de mayo de 2009