Modos de Resonancia Ferromagnética en Películas con Estados de Equilibrio Rotados

José Jiménez Bustamante [1*], Rodolfo Gallardo [1†]
[1] Departamento de Física, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso 2390123, Chile. .
*jose.jimenezb@sansano.usm.cl, †rodolfo.gallardo@usm.cl

Introducción

Las excitaciones magnéticas fundamentales, ondas de espín (SWs), son capaces de transportar energía y momento angular sin el movimiento de carga eléctrica, implicando la ausencia de pérdidas de energía por calor [1-3]. Por otro lado, las longitudes de onda de las SWs son mucho más cortas que las ondas electromagnéticas a la misma frecuencia [4]. Esto último tiene importantes implicancias, ya que se pueden vislumbrar mejores perspectivas para la miniaturización de dispositivos lógicos [1-3, 5-13]. Por lo tanto, el estudio de la dinámica de espín en materiales magnéticos nanoestructurados es un tema de gran relevancia en los campos de la espintrónica y la magnónica.
La naturaleza colectiva de las SWs depende principalmente de la energía de intercambio de corto alcance y la interacción dipolar magnética (interacción de largo alcance). Otro aspecto importante, es el estado de equilibrio por sobre el cual la dinámica de espín ocurre. Usualmente, se asume un estado ferromagnético, donde la magnetización de equilibrio apunta de una dirección determinada. No obstante, bajo ciertas condiciones es posible que el estado de equilibrio magnético se caracterice por una textura magnética, donde la magnetización tiene una dependencia espacial. En la literatura se pueden encontrar diversas texturas magnéticas, donde destacan los populares Skyrmions o las paredes de dominio [14,15]. Ha sido demostrado que las propiedades dinámicas de la magnetización sobre un estado base con textura presenta interesantes propiedades, como bandas planas [14] y modos altamente localizados en paredes de dominio conocidos como modos de Winter [15]. Por lo tanto, resulta de gran interés explorar la dinámica de espín y sus modos de resonancia ferromagnética (FMR) en estructuras que presenten estados de equilibrio rotados.
En este proyecto se estudia los modos de resonancia ferromagnética en sistemas con graduación magnética, la cual promueve la generación de estados rotados. Se considerarán variaciones angulares en el plano y fuera de él, donde se analizará la frecuencia de resonancia ferromagnética en función del campo externo, donde el sistema evoluciona desde estados rotados a estados donde la magnetización está paralela al campo externo. Para determinar teóricamente la frecuencia de oscilación, se procederá con el uso del método de la matriz dinámica

Desarrollo

Los gradientes de anisotropía y magnetización de saturación permiten obtener estados de equilibrio gradualmente rotados. Por otro lado, os estados de equilibrio rotados alteran notablemente la dinámica de los modos FMR, principalmente el modo fundamental o de más baja frecuencia. Entonces es posible localizar las excitaciones magnéticas (amplitudes de oscilación) en ciertas zonas de las películas ferromagnéticas con textura magnética rotada.
Como objetivo general se estudiará la respuesta de la resonancia ferromagnética y los estados de equilibrio rotados en sistemas nanoestructurados con gradientes en sus propiedades magnéticas.
Como objetivos específicos se realizará lo siguiente:

- Determinar los ángulos de equilibrio para el caso en que la magnetización esté en el plano. Para esta configuración se asumirá una anisotropía con eje fácil en el plano y variable a lo largo del grosor de la película.

- Calcular los ángulos de equilibrio de la magnetización fuera del plano de la película. En este caso se considerará una anisotropía perpendicular variable.

- Estudiar la dinámica de los modos de resonancia ferromagnética para los casos fuera y en el plano.

- Repetir el análisis anterior para el caso en que la magnetización de saturación varíe a lo largo del grosor de la película ferromagnética**.**

Los cálculos teóricos se realizarán resolviendo la ecuación de movimiento de la magnetización, $\mathbf{M}(\boldsymbol{r},t)$, donde su evolución temporal está dada por:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma\mathbf{M}(\boldsymbol{r},t) \times \mathbf{H}_{\text{eff}}(\boldsymbol{r},t), \qquad (1)$$

donde γ es la razón giromagnética y $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ es el campo efectivo. Dicho campo contiene la información de las diferentes interacciones presentes en la nanoestructura magnética. Para estudiar las excitaciones magnéticas, la ecuación (1) es linealizada (se resuelve para oscilaciones pequeñas), de tal forma que ésta se puede escribir como:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{eq}} + \mathbf{m}, \qquad (2)$$

donde M_{eq} es la magnetización de equilibrio. Además, $\mathbf{m} = \mathbf{m_0}\, e^{i\omega t}$, donde $\omega = 2\,\pi\, f$, siendo f la frecuencia de resonancia ferromagnética.
Note que la ecuación (1) también permite obtener los estados de equilibrio del sistema. En este caso resulta trivial obtener que, para el caso en que las oscilaciones no están presentes, se debe cumplir la siguiente condición

$$\mathbf{M}_{\text{eq}} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} = 0. \qquad (3)$$

Para resolver el sistema con graduación magnética se procederá con el método de la matriz dinámica, el cual consiste en dividir la película ferromagnética en N sub-películas, lo que implica que la ecuación (1) se transforma en 2N ecuaciones acopladas. Dicho acople surge debido a las interacciones de intercambio y dipolares entras las sub-capas. Por ende, este sistema de ecuaciones se resolverá como un problema de autovalores después de ciertas manipulaciones matemáticas.

Agradecimientos: Agradezco al profesor Rodolfo Gallardo por el apoyo y paciencia no acotada durante todo este proceso.
Agradezco al proyecto Fondecyt Regular N° N°1210607 que colaboró en este proyecto.

Referencias:
[1] A. Khitun, M. Bao, and K. L. Wang, Journal of Physics D: Applied Physics **43**, 264005 (2010).
[2] A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, and B. Hillebrands, Nat. Phys. **11**, 453 (2015).
[3] V. Sluka, T. Schneider, R. A. Gallardo, A. Kákay, M. Weigand, T. Warnatz, R. Mattheis, A. Roldán-Molina, P. Landeros, V. Tiberkevich, A. Slavin, G. Schütz, A. Erbe, A. Deac, J. Lindner, J. Raabe, J. Fassbender, and S. Wintz, Nature Nanotechnology (2019), 10.1038/s41565-019-0383-4.
[4] A. G. Gurevich and G. A. Melkov, Magnetization Oscillations and Waves (CRC Press, Inc, 1996).
[5] S. Neusser and D. Grundler, Advanced Materials **21**, 2927.
[6] V. V. Kruglyak, S. O. Demokritov, and D. Grundler, J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 264001 (2010).

[7] M. Jamali, J. H. Kwon, S.-M. Seo, K.-J. Lee, and H. Yang, Sci. Rep. **3** (2013).

[8] S. Klingler, P. Pirro, T. Brächer, B. Leven, B. Hille- brands, and A. V. Chumak, Applied Physics Letters **105**, 152410 (2014).

[9] A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands, Nat. Commun. **5**, 4700 (2014).

[10] A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands, J. Phys. D **50**, 244001 (2017).

[11] K. Vogt, F. Y. Fradin, J. E. Pearson, T. Sebastian, S. D. Bader, B. Hillebrands, A. Hoffmann, and H. Schultheiss, Nature Communications **5**, 3727 EP (2014).

[12] K. Ganzhorn, S. Klingler, T. Wimmer, S. Gepra ̈gs, R. Gross, H. Huebl, and S. T. B. Goennenwein, Applied Physics Letters **109**, 022405 (2016).

[13] L. J. Cornelissen, J. Liu, B. J. van Wees, and R. A. Duine, Phys. Rev. Lett. **120**, 097702 (2018).

[14] M. Garst, J. Waizner, and D. Grundler, Journal of Physics D: Applied Physics 50, 293002 (2017)

[15] J. M. Winter, Phys. Rev. **124**, 452 (1961).