

DETERMINAZIONE DEI MODI NORMALI DI OSCILLAZIONE PER PARTICELLE FERROMAGNETICHE SATURATE

M. d'Aquino¹, C. Serpico², G. Miano², G. Bertotti³

¹ Dipartimento per le Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope"
Centro Direzionale di Napoli – Isola C4, 80143 Napoli

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università degli Studi di Napoli "Federico II",
via Claudio 21, I-80125 Napoli

³ Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM),
strada delle Cacce 91, I-10135 Torino

Lo studio delle oscillazioni normali delle particelle ferromagnetiche è una problematica fondamentale per le applicazioni che riscontra nell'analisi della dinamica di magnetizzazione indotta da campi applicati alle microonde[1]. Nei tipici esperimenti di risonanza ferromagnetica, una nanoparticella magnetica viene saturata mediante l'applicazione di un forte campo DC lungo una direzione fissata. Le piccole oscillazioni del sistema micromagnetico possono, quindi, essere eccitate sovrapponendo una componente a radiofrequenza (RF) del campo applicato che sia piccola rispetto alla componente DC. In queste condizioni, le curve di risonanza ferromagnetica possono essere ottenute misurando la potenza assorbita in due situazioni sperimentali tipiche:

- 1) si varia lentamente la componente DC del campo esterno mantenendo costante la frequenza della componente RF;
- 2) si mantiene costante la componente DC e si varia lentamente la frequenza della componente RF.

In entrambi i casi, dall'osservazione dei picchi nella curva di assorbimento di potenza, si possono determinare i valori dei campi applicati o delle frequenze di risonanza che corrispondono all'eccitazione di determinati modi normali di oscillazione.

Questo problema è stato analizzato teoricamente da W.F. Brown e A. Aharoni[1]. L'approccio proposto si basava sull'utilizzo di opportune tecniche analitiche ed era pertanto limitato al caso di particelle di forma molto speciale (sfere, ellissoidi). Una grossa mole di ricerca è stata recentemente effettuata riguardo al calcolo numerico dei modi risonanti di particelle di forma generica[2,3].

In questa memoria, gli autori propongono una formulazione generale del problema in termini di problema agli autovalori per opportuni operatori integro-differenziali autoaggiunti legati al campo efficace micromagnetico. Questo approccio conduce in maniera naturale ad una chiara formulazione numerica quando si introduce una discretizzazione spaziale, per esempio alle differenze finite o agli elementi finiti.

Dal punto di vista teorico, la dinamica della magnetizzazione è descritta dall'equazione di Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG). Il campo efficace tiene in conto le interazioni di scambio, magnetostatiche, di anisotropia uniassiale e di Zeeman. Si assume che la particella sia saturata lungo l'asse z dal campo esterno DC. Pertanto, la configurazione di equilibrio è allineata con il versore cartesiano dell'asse z. Le piccole oscillazioni della magnetizzazione intorno allo stato di saturazione vengono studiate linearizzando l'equazione LLG intorno alla configurazione di equilibrio. Tale analisi viene effettuata nel dominio della frequenza.

Con riferimento, ad esempio, alla situazione sperimentale 2), fissato il campo esterno DC, il problema di ricavare i modi (normali) risonanti della particella ferromagnetica, chiamati

spesso exchange-magnetostatic modes, consiste nel determinare i valori delle frequenze per i quali l'equazione LLG linearizzata ammette soluzioni non banali (non nulle). Questo problema può essere messo nella forma matematica di problema agli autovalori generalizzato per una coppia di opportuni operatori lineari e autoaggiunti agenti su campi vettoriali sufficientemente regolari definiti in L^2 . Dettagli su questi operatori, sulle proprietà spettrali e sulle condizioni di ortogonalità dei modi risonanti possono trovarsi nei riferimenti [4,5].

Questo approccio ha diversi vantaggi rispetto ad altri per quanto riguarda la determinazione numerica dei modi risonanti:

- a) Si possono considerare particelle di forma arbitraria.
- b) Gli operatori discretizzati possono essere assemblati semplicemente utilizzando i classici operatori di scambio e magnetostatici implementati nei codici micromagnetici sia alle differenze finite che agli elementi finiti.
- c) 2) La versione discretizzata di questo problema è un problema agli autovalori discreto che può essere risolto con tecniche standard di algebra lineare.
- d) La soluzione di questo problema restituisce direttamente tutti i modi, i campi esterni o le frequenze di risonanza.

Allo scopo di verificare l'efficacia del metodo proposto, sono stati calcolati i modi normali di oscillazione di un film sottile quadrato soggetto ad un campo esterno lungo la direzione z perpendicolare al piano del film. Si è utilizzata una discretizzazione spaziale alle differenze finite. Nella figura 1 si riportano alcuni risultati relativi alle situazioni sperimentali 1) e 2) descritte sopra.

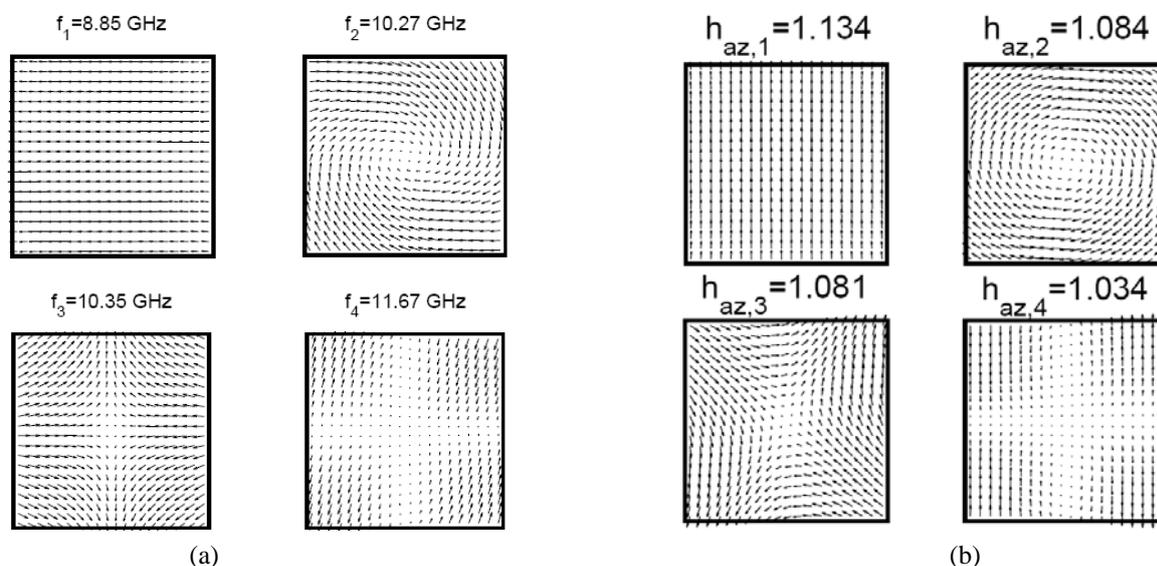


Figura 1. Snapshots all'istante $t=0$ dei campi vettoriali relativi ai primi 4 modi di oscillazione della magnetizzazione in un film sottile di dimensioni $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$. (a) situazione sperimentale 2) a campo DC fissato. (b) situazione sperimentale 1) a frequenza fissata.

[1] W.F. Brown Jr, Micromagnetics, Interscience Publishers (1963). A. Aharoni, Introduction to the theory of ferromagnetism, Oxford Press, New York (1996).
 [2] R.D. McMichael et al., Journal of Applied Physics 97, 10J901 (2005).
 [3] M. Grimsditch et al., Phys. Rev. B 70, 054409 (2004).
 [4] M. d'Aquino et al., Physica B 403, 242 (2008).
 [5] M. d'Aquino et al., IEEE Transactions on Magnetics, in stampa.