



Universidade: presente!



XXXI SIC

21. 25. OUTUBRO • CAMPUS DO VALE

Ressonância ferromagnética em nanoestruturas



Ânderson Luís Rosa

Orientador: Alexandre Da Cas Viegas

Objetivos

- Desenvolver métodos experimentais para medir ressonância ferromagnética (FMR) em nanoestruturas na faixa de radiofrequência (RF);
- Desenvolver programas de análise dados obtidos das medidas feitas com um analisador de rede vetorial Rohde & Schwarz;
- Caracterizar diferentes materiais e filmes nanoestruturados.

Introdução

Dinâmica de magnetização → Movimento de precessão da magnetização em torno do campo efetivo. Atenuado pelos mecanismos de amortecimento;

Campo de RF → Compensa energia dissipada no amortecimento: mantém o movimento de precessão em torno do campo efetivo;

Ressonância (FMR) → Máxima absorção de energia em certos valores de campo externo e frequência do estímulo. Ajustando a relação $f_{res}(H_{ext})$ obtém-se informações intrínsecas como anisotropias e efeitos de interações;

Mecanismos de amortecimentos → Estudados a partir da largura de linha.

Relação de Smit-Belgier: relação de dispersão $f_{res}(H_{ext})$ e largura de linha

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} (F_{\theta\theta} F_{\phi\phi} - F_{\theta\phi}^2) \quad \Delta\omega_{hom} = \frac{\alpha\gamma_0}{M_S} \left[F_{\theta\theta} + \frac{F_{\phi\phi}}{\sin^2 \theta} \right]$$

F é a energia livre e depende das anisotropias, interações e campo externo, θ e ϕ são orientações da magnetização. Relações avaliadas no equilíbrio θ_0 e ϕ_0 .

Metodologia

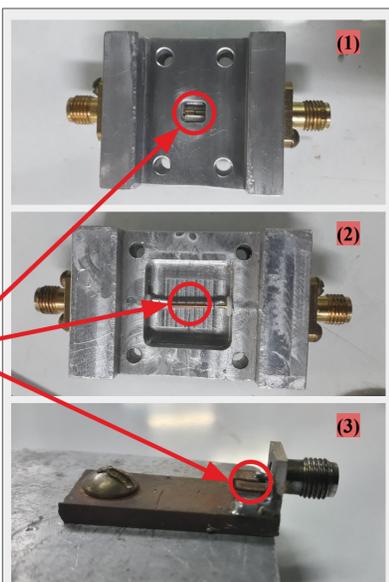
- Analisador de rede vetorial (VNA Rohde & Schwarz): Aplica sinal RF sobre o porta amostras e mede o coeficiente de reflexão S_{11} e de transmissão S_{21} ;
- Frequências entre 10 MHz e 8 GHz, campo aplicado entre ± 300 Oe;
- Três diferentes porta amostras RF;
- Três métodos de obter $f_{ress}(H_{ext})$.

- 1) Condição de ressonância obtida a partir dos valores de f e H_{ext} onde ocorre mínimo $\Delta S = |S_{11}| + |S_{21}| - 1$ [2] com maior absorção de energia eletromagnética.
- 2) Variação da parte imaginária de ΔS_{11} : Campo transversal define uma referência sem influência dinâmica: $\Delta S_{11} = S_{11}(H_{ext}) - S_{11}(ref)$. Podemos utilizar a parte imaginária dessa medida para obtermos a largura de linha de ressonância.
- 3) Uso do modelo de V. Bekker [1] para obtermos a permeabilidade magnética, usando a equação:

$$\mu_{efetivo} = \left(\frac{ic \ln(-S_{11}^{filme})}{2\omega l_{amostra} \sqrt{\epsilon_{efetivo}^{substrato}}} - \frac{\sqrt{\epsilon_{efetivo}^{vazio}} l_{vazio}}{\sqrt{\epsilon_{efetivo}^{substrato}} l_{amostra}} \right)^2$$

onde “c” é a velocidade da luz no vácuo, “l” são os comprimentos da amostra, substrato e cavidade, “ ω ” é a frequência angular e “ ϵ ” são as permissividades elétricas de acordo com o subscrito.

Local das amostras



Ao lado estão as imagens dos três porta amostras utilizados. Os dois de cima são utilizados para as medidas de absorção, enquanto o de baixo é utilizado para as medidas de permeabilidade magnética.

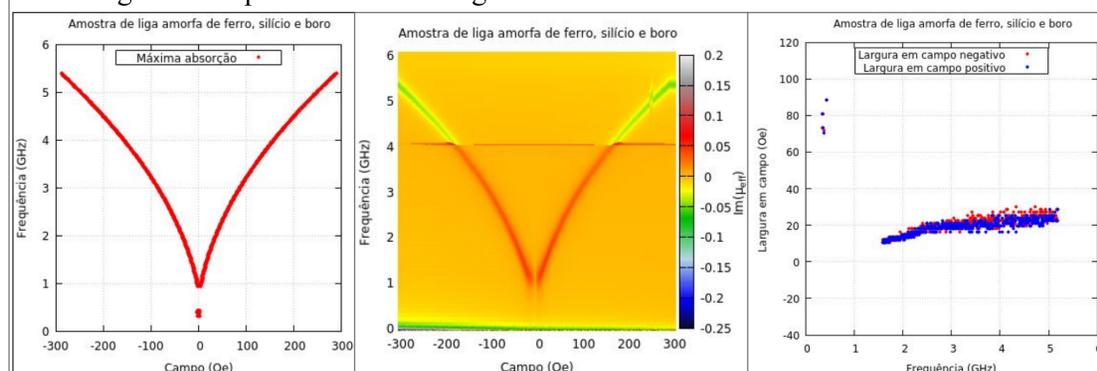
Resultados e conclusões

Os programas de análise de dados foram desenvolvidos na linguagem C com estrutura de dados do tipo lista encadeada. Para o modelo de absorção, o programa lê dados de absorção em função do campo para cada frequência medida e procura o ponto de máxima absorção em campo positivo e negativo, traçando curvas de ressonância. Para a permeabilidade magnética, o programa aplica o modelo de V. Bekker aos dados e obtém gráficos da permeabilidade em escala de cores.

Após diversos testes, os resultados obtidos com o porta amostras (1) foram considerados insatisfatórios por possuírem muito ruído e não mostrarem claramente a ressonância nas amostras.

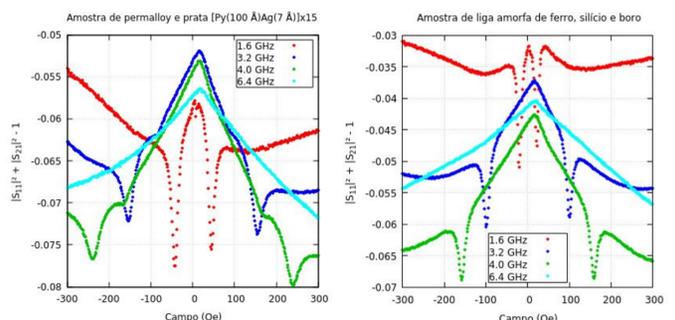
O porta amostras (2) apresentou bons resultados com ressonâncias e larguras de linha bem evidentes. Nesse porta amostras foram feitas medidas com amostras de ferrita, um filme de Ni/HfO2/Ni, um filme de liga amorfa de [FeSi e B] e filmes com multicamadas de permalloy e prata.

Com o porta amostras (3) foram feitas medidas com o filme de liga amorfa de [Fe, Si e B] e foram obtidos bons resultados para a permeabilidade magnética efetiva. Entretanto, os resultados mostraram haver uma ressonância do porta amostras ao redor da frequência de 4 GHz, o que resultou em uma descontinuidade nos gráficos, inclusive com uma troca de sinal da parte imaginária da permeabilidade efetiva, como é possível ver no gráfico da permeabilidade magnética efetiva abaixo.



Na esquerda temos a curva de ressonância obtida pelo método de análise da absorção de energia eletromagnética, enquanto no centro temos a parte imaginária da permeabilidade magnética efetiva em escala de cores obtida pelo modelo de V. Bekker, onde é possível observar a mesma curva de ressonância. Na direita temos um gráfico da largura de linha de ressonância para valores positivos e negativos de campo.

Ao lado temos curvas de absorção para duas amostras diferentes para quatro frequências diferentes. É possível observar os mínimos onde ocorre a ressonância e seu deslocamento em campo com o aumento da frequência do sinal.



Referências

- [1] V. Bekker et al. A new strip line broad-band measurement evaluation for determining the complex permeability of thin ferromagnetic films. Jour. Magn. Magn. Materials. 270, 327 (2004).
- [2] D.M. Pozar, Microwave Engineering, 4ª ed. Wiley. 2012.
- [3] M. Kerekes, A.D.C. Viegas et al. Frequency domain studies of CoZr continuous thin films and FeNi wires using coplanar transmission lines. Journal Of Applied Physics (2004).