

# Ressonância de Ondas de Spin em Bicamadas NiFe/IrMn com Exchange Bias

<sup>1</sup>Marcos Antonio de SOUSA; <sup>1</sup>Fernando PELEGRINI; <sup>2</sup>Justiniano MARCATOMA;

<sup>2</sup>Willian ALAYO; <sup>2</sup>Elisa BAGGIO-SAITOVITCH.

<sup>1</sup>*Instituto de Física – Universidade Federal de Goiás*

<sup>2</sup>*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

[marcossharp@gmail.com](mailto:marcossharp@gmail.com)

**Palavras chave:** Ressonância de ondas de spin; exchange bias; bicamadas magnéticas; ressonância ferromagnética.

*Trabalho financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).*

## 1- Introdução

Os conceitos de filmes finos e multicamadas surgiram em 1970 com a proposta de Esaki e Tsu de crescimento de bicamadas múltiplas monocristalinas de dois diferentes semicondutores. O interesse de se sintetizar tais estruturas não se limitou, entretanto, aos materiais semicondutores e foi ampliado com muito sucesso aos materiais magnéticos. Assim, manipulando-se as propriedades de filmes finos magnéticos, tais como a magnetorresistência gigante (MRG) e a anisotropia magnética, podem-se obter uma grande variedade de aplicações tecnológicas (Freitas *et al.*, 2007), tais como discos rígidos e flexíveis para gravação de dados, fitas magnéticas para áudio e vídeo, tiras magnéticas para cartões de crédito, meios de gravação magneto ópticos, sensores de campo magnético tipo “válvula de spin”, etc. A primeira observação evidente do efeito da MRG foi realizada por Baibich *et al.* em 1988, em multicamadas magnéticas do tipo FM/NM/FM (Fe/Cr/Fe) acopladas antiferromagneticamente, produzidas por epitaxia de feixe molecular. Verificou-se que a resistência elétrica da multicamada diminuía por um fator próximo de dois, quando submetida a um campo de 20.000 G, em comparação com o valor de sua resistência a campo nulo. Em 2007 o físico francês Albert Fert, líder da equipe da qual Baibich participava, e o físico alemão Peter Andreas Grünberg foram

contemplados com o Prêmio Nobel de Física pela descoberta independente do efeito da MRG.

A técnica de Ressonância ferromagnética (FMR, na sigla em inglês) é usada com grande sucesso no estudo e determinação de propriedades magnéticas de filmes ferromagnéticos, tais como anisotropia magnética uniaxial e unidirecional, fator  $g$ , e parâmetros magnéticos de amortecimento. Entende-se por ressonância ferromagnética a absorção de radiação eletromagnética por um material ferromagnético. Esta absorção se passa na presença de um campo magnético, em torno do qual o momento magnético total do material precessiona. A absorção ressonante ocorre quando a frequência desta precessão coincide com a frequência do campo de radiação eletromagnética. Esta frequência, por sua vez, se localiza na região de micro-ondas. A técnica de FMR também pode ser utilizada para detectar modos de ressonância ondas de spin (SWR, na sigla em inglês). Este experimento pode fornecer informações sobre as superfícies e interfaces das camadas magnéticas. Neste trabalho, utilizamos a técnica de FMR para estudar as propriedades magnéticas de bicamadas NiFe / IrMn com *exchange bias*, que foram depositadas pela técnica de *Magnetron Sputtering*.

## 2- Material e Métodos

As bicamadas magnéticas utilizadas neste estudo foram crescidas pela técnica de pulverização catódica por *magnetron (Magnetron Sputtering)*, no Laboratório de Filmes Finos do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro, sobre a supervisão do Me. Justiniano Quispe-Marcatoma e do Dr. Willian Edgardo Alayo. A pulverização catódica é um processo que consiste em ionizar um gás inerte entre dois eletrodos, gerando um plasma. Os íons deste gás se aceleram e colidem com os átomos do alvo e pulverizam sua superfície. Os átomos ou aglomerados de átomos arrancados são depositados sobre um substrato para crescer o filme. O alvo é ligado à fonte de potencial negativo, e o suporte com o substrato é aterrado ou mantido em potencial flutuante. A estrutura das bicamadas estudadas é representada por:

***Si (111)/Ru (7 nm)/Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>( $t_{NiFe}$ )/Ir<sub>20</sub>Mn<sub>80</sub>(6 nm)/Ru (5 nm)***

com  $t_{NiFe}$  igual a 55, 60, 65 e 120 nm. Os parâmetros básicos para deposição das amostras foram: pressão de base sempre menor que  $6 \times 10^{-8}$  Torr, pressão de trabalho  $3 \times 10^{-3}$  Torr, distância entre o alvo e o substrato de 10,3 cm. Durante a deposição o substrato foi mantido à temperatura ambiente (aproximadamente 22°C). As medidas de FMR foram realizadas no Instituto de Física da UFG, usando um espectrômetro comercial Bruker ESP-300 operando na Banda-X (9,45 GHz) e Banda-Q (34,1 GHz) e com varredura do campo magnético estático. Os espectros de FMR foram obtidos com a amostra à temperatura ambiente, utilizando técnicas de modulação e detecção sensível à fase, com o filme no centro de uma cavidade ressonante de micro-ondas retangular de modo TE<sub>102</sub> para a Banda-X, e uma cavidade cilíndrica para Banda-Q.

### 3- Resultados e discussão

As medidas de FMR revelam a presença de dois modos de absorção de energia, como mostram os espectros nas Figuras 1 e 2. O primeiro modo de absorção é considerado como um modo de ressonância de ondas de spin e o segundo, é o modo uniforme de ressonância da camada NiFe.

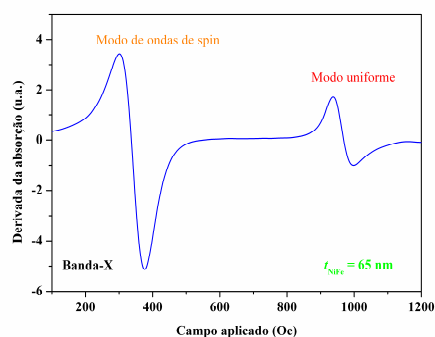


Fig. 1 - Espectro de FMR da bicamada com  $t_{NiFe} = 65$  nm.

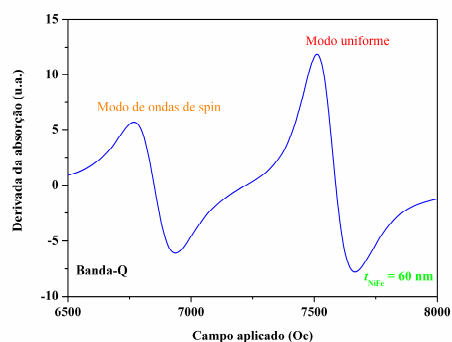
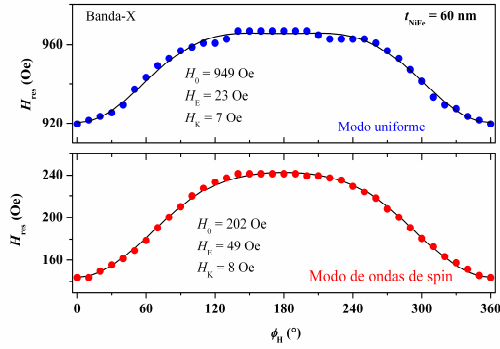


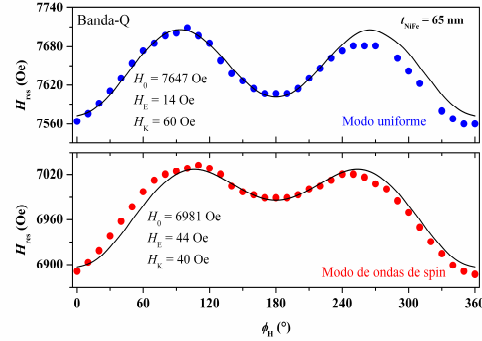
Fig. 2 - Espectro de FMR da bicamada com  $t_{NiFe} = 60$  nm.

O estudo da dependência angular do campo de ressonância ( $H_{res}$ ) para campo magnético externo aplicado no plano do filme, para ambos os modos de absorção, revela o efeito da anisotropia unidirecional. As Fig. 3 e 4 mostram a dependência do campo de ressonância  $H_{res}$  com o ângulo  $\varphi_H$ , entre eixo de anisotropia e a direção do campo magnético estático aplicado  $H$ , para as bicamadas com  $t_{NiFe} = 60$  e 65 nm, respectivamente. Estes resultados evidenciam a presença de anisotropia

unidirecional na bicamada com  $t_{NiFe} = 60$  nm, e a presença de anisotropia uniaxial e unidirecional na bicamada  $t_{NiFe} = 65$  nm. Verificamos também, a partir da dependência angular do campo de ressonância  $H_{res}$ , que anisotropia unidirecional para o modo de ondas de spin é duas vezes maior do que para o modo uniforme.



**Fig. 3 –  $H_{res}$  em função  $\varphi_H$  para bicamada com  $t_{NiFe} = 60$  nm. As linhas são os melhores ajustes usando os parâmetros apresentados na figura.**



**Fig. 4 –  $H_{res}$  em função  $\varphi_H$  para bicamada com  $t_{NiFe} = 65$  nm. As linhas são os melhores ajustes usando os parâmetros apresentados na figura.**

As curvas nas Fig. 3 e 4 foram ajustadas utilizando a seguinte relação

$$H_{res} = H_0 + H_E \cos \varphi + H_K \cos 2\varphi. \quad (1)$$

Aqui,  $H_0 = (\omega^2/\gamma^2)/(4\pi M_S)$  representa o campo de ressonância  $H_{res}$  no plano da camada ferromagnética na ausência de interações interfaciais;  $H_K$  é o campo de anisotropia uniaxial;  $H_E$  é o campo de anisotropia unidirecional e  $\varphi_H$  é o ângulo do campo em relação à anisotropia unidirecional. Os valores calculados a partir da Eq. 1 para  $H_E$ , por exemplo, para bicamada com  $t_{NiFe} = 65$  nm, são 45 e 20 Oe para o modo de ondas de spin e o modo uniforme, respectivamente.

Segundo Nisenoff *et al* a constante de troca  $A$  pode ser calculada para o modo de ondas de spin, utilizando a seguinte equação:

$$H_{res} = 2\pi M_S \left\{ \left[ \frac{(\omega/\gamma)^2}{(2\pi M_S)^2} + 1 \right]^{1/2} - 1 \right\} - (2A/M_S)(n\pi/L), \quad (2)$$

onde  $M_S$  é a magnetização de saturação da camada ferromagnética,  $\gamma$  é a razão giromagnética,  $k_n = n\pi/L$  é o número de onda e  $n$  é um número inteiro relacionados

ao modo de onda de spin. Os valores da constante de troca  $A$  deduzidos para a camada de  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  estão em torno de  $1,29 \times 10^{-6}$  erg/cm.

#### 4- Conclusões

As bicamadas magnéticas NiFe/IrMn foram produzidas pela técnica de *Magnetron Sputtering* e estudadas por FMR a temperatura ambiente. Os espectros de FMR mostram que os modos de ondas de spin e o modo uniforme de ressonância são ambos excitados pelo de campo oscilante de micro-ondas. A dependência angular do campo de ressonância  $H_{res}$  revela que anisotropia unidirecional para o modo de ondas de spin é duas vezes maior do que para o modo uniforme. Os valores calculados para a constante de troca  $A$  estão de acordo com valores conhecidos na literatura para os filmes de NiFe.

#### 5- Referências bibliográficas

1. P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, J. Phys.: Condens. Matter **19**, 165221, (2007).
2. ESAKI; e TSU, R., IBM Journal of Research and Development **14**, 61-65, (1970).
3. M.N. Baibichi, L.M. Broto, A. Fert, F.N Van Dau, F. Petroff, A. Friederich and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
4. W. Stoeklein, S.S. Parkin, and J. C. Scott, Phys. Rev. B **38**, 6847 (1988).
5. M. Nisenoff, and R. W. Terhune, J. Appl. Phys. **36**, 733 (1964).