

MAGNETOIMPEDÂNCIA GIGANTE E CARACTERIZAÇÃO MAGNETO-ÓPTICA DE LIGAS AMORFAS

CEZAR SOARES MARTINS¹; VALDEMAR BELLINTANE JR.¹; JOSÉ HELDER FACUNDO SEVERO²

¹Fatec-São Paulo - Materiais/DEG

²Instituto de Física da USP

cezar.martins@fatec.sp.gov.br

Giant Magnetoimpedance and Magneto-optical Characterization of Amorphous Alloys

Eixo Tecnológico: *Controle e Processos Industriais*

Resumo

A Magnetoimpedância Gigante (GMI) é uma grande variação na impedância Z (H) de materiais magnéticos quando submetidos a um campo magnético externo. O objetivo deste trabalho é analisar amostras de materiais magnéticos amorfs, no caso de fitas de CoFeSiB, que foram produzidas por *melt-spinning*. As medidas de Magnetoimpedância Gigante (GMI) que serão apresentadas foram realizadas em regimes de baixa e moderada frequência. Foi observado que o aumento do valor da impedância com a frequência está relacionado ao aumento da contribuição imaginária. O valor de pico da magnetoimpedância é completamente dependente da frequência. O maior valor obtido da GMI foi de 75% a 10 Oe para uma frequência de 1 MHz, resultando em uma sensibilidade de 7,5%/Oe. Além disso, foi observado que a suscetibilidade medida pelo efeito Kerr magneto-óptico apresenta um comportamento semelhante ao da magnetoimpedância. Usando microscopia a efeito kerr magneto-óptico foi observado a estrutura de domínios da amostra com larguras da ordem de 100 μm .

Palavras-chave: *Magnetoimpedância, microscopia, Materiais Magnéticos, ligas amorfas.*

Abstract

Giant Magnetoimpedance (GMI) is a large variation in the impedance Z (H) of magnetic materials when subjected to an external magnetic field. The objective of this work is to analyze samples of amorphous magnetic materials, in the case of CoFeSiB ribbons, which were produced by melt-spinning. The Giant Magnetoimpedance (GMI) measurements that will be presented were carried out in low and moderate frequency regimes. It was observed that the increase in the impedance value with frequency is related to the increase in the imaginary contribution. The peak value of magnetoimpedance is completely frequency dependent. The highest value obtained from GMI was 75% at 10 Oe for a frequency of 1 MHz, resulting in a sensitivity of 7.5%/Oe. Furthermore, it was observed that the susceptibility measured by the magneto-optical Kerr effect presents a behavior similar to that of magnetoimpedance. Using magneto-optical Kerr effect microscopy, the domain structure of the sample with widths of the order of 100 μm was observed.

Key-words: *Magnetoimpedance, microscopy, Magnetics Materials, amorphous alloys.*

1. Introdução

A Magnetoimpedância Gigante (GMI) é uma grande variação da impedância $Z(H)$ de materiais magnéticos quando submetidos a um campo magnético externo. O efeito pode ser explicado dentro do contexto da teoria da eletrodinâmica, porém o mesmo tem propriedades ainda não entendidas, como por exemplo, a estrutura de picos bem definidos quando há a aplicação do campo magnético [1].

O fenômeno da GMI é mais observado em materiais magnéticos amorfs, pois os mesmos possuem um alto valor de permeabilidade magnética que é facilmente alterada com a aplicação de campos magnéticos externos. Isso faz com que haja uma forte variação da impedância.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

Apesar de a magnetoimpedância ter sido descoberta em 1994 [2], as aplicações em biosensores magnéticos têm poucos anos [3].

Beach e Berkowitz [4] utilizaram um procedimento exposto no livro de Landau e Lifschitz [5] para calcular a impedância de um fio ferromagnético por onde passa uma corrente elétrica I de frequência ω . Usando as equações de Maxwell para este problema, eles chegaram à seguinte expressão [6]:

$$Z = \frac{1}{2} R_{dc} k a \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \quad (2.1)$$

onde,

R_{dc} é a resistência real do fio;

J_i são as funções de Bessel;

a é o raio do fio;

$$k = \frac{(i+1)}{\delta_m} \quad (2.2)$$

e a profundidade de penetração magnética (δ_m) é dada por:

$$\delta_m = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\sigma\mu_0}} \quad (2.3)$$

sendo:

i é o imaginário;

c é a velocidade da luz;

ω é a frequência;

σ é a condutividade elétrica;

μ_0 é a permeabilidade magnética circular;

A expressão para a impedância do efeito em fitas ferromagnéticas amorfas é dada por:

$$Z = R_{DC} \frac{kt}{2} \coth\left(\frac{kt}{2}\right) \quad (2.4)$$

onde t é a espessura da fita. A Magnetoimpedância é definida como:

$$\text{GMI}(\%) = \left| \frac{Z(H) - Z(H=0)}{Z(H=0)} \right| \times 100 \quad (2.5)$$

O regime de frequências é definido da seguinte forma:

- Regime de baixas frequências (poucos Hz-10kHz);
- Regime de frequências moderadas (0.01-20 MHz);
- Regime de altas frequências (20 MHz- Alguns GHz);

Destes citados acima só nos importa o regime de baixas e moderadas frequências. A sua abordagem no presente trabalho implica ao fato de que para a medida da impedância elétrica em um dado material (no caso a amostra de CoFeSiB) é necessário levar em conta parâmetros intrínsecos ao experimento.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

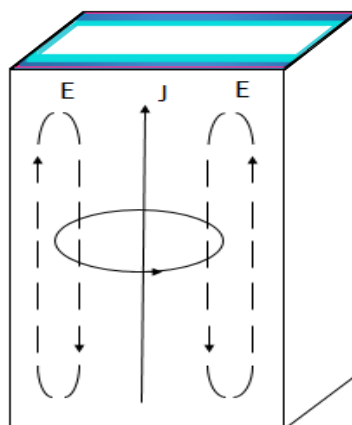
Um destes parâmetros é a frequência, pois é ela que determina a profundidade de penetração magnética. Quando ocorrem frequências muito baixas essa profundidade de penetração magnética torna-se muito maior que as dimensões transversais da amostra e com isso somente a componente imaginária muda com a aplicação do campo magnético externo (efeito denominado magneto-indutivo).

Quando ocorre a passagem do regime de baixas frequências para frequências moderadas há um aumento na parte real da tensão induzida. Isso ocorre devido a permeabilidade magnética diminuir com a aplicação do campo magnético e assim o produto da frequência pela permeabilidade circular (que determina o comprimento de penetração) aumenta.

O efeito pelicular é o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre. Uma corrente alternada quando atravessa uma seção transversal não se distribui uniformemente. Tal distribuição depende da frequência, do campo elétrico, da condutividade elétrica, das dimensões e da forma geométrica do condutor.

Considerando a Fig.1 onde tem-se um condutor percorrido por uma corrente I tal que $\frac{dI}{dt} > 0$. A Lei de Indução de Faraday afirma que um campo magnético $\mathbf{B}$, gerado pela corrente I produzirá um campo elétrico $\mathbf{E}$. Portanto o campo elétrico gerado tende a reforçar a corrente próximo à superfície enfraquecendo-a no centro [7].

Fig.1 – Distribuição de campo elétrico e magnético no efeito pelicular



Fonte: (Araújo)

Este efeito pelicular é exemplificado na Fig. 2, onde a densidade da corrente varia de 100 Hz a 100 kHz. Analisando as imagens observa-se que com o aumento da frequência da corrente, a área pela qual a corrente passa diminui, ou seja, na área branca vista nas frequências de 50 kHz e 100 kHz não há passagem considerável de corrente [8]. As figuras abaixo podem ser entendidas como cortes transversais da fita.

Fig. 2 – Efeito pelicular para frequências de 100 Hz à 100 kHz.



Fonte: (Araújo)

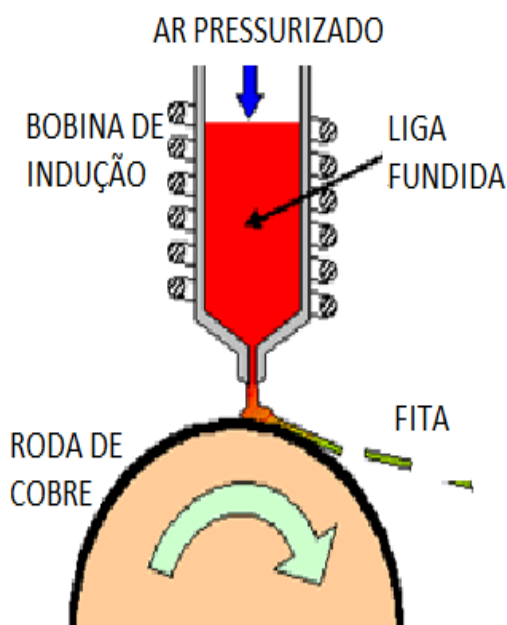
2. Materiais e Métodos

As medidas foram realizadas em uma fita de CoFeSiB produzida por *melt-spinning*, mostrada na Fig. 3-a. Neste processo a liga é colocada em um cadinho de quartzo que possui um orifício em sua base (ver Fig. 3-b). O cadinho é envolto por uma bobina de radio frequência que gera corrente na liga, aquecendo-a. Ao atingir uma temperatura de 1500 °C, a liga é ejetada sob uma roda de cobre que gira a uma velocidade de 3100 rpm. A liga resfria-se rapidamente e forma uma fita com alguns metros de comprimento

Fig. 3 - a) Foto do *Melt-spinning* e b) Imagem apresentando a formação da fita



a)



b)

Fonte: (Santos)

Na medição da Magnetoimpedância os equipamentos utilizados foram os seguintes: gerador de áudio, osciloscópio digital, bobina de Helmholtz e uma fonte de corrente para gerar

o campo magnético. Os dados experimentais foram obtidos no Laboratório Didático de Física (LDF) da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP).

Para as medidas magneto-ópticas (MO) as fitas foram mecanicamente polidas usando pasta de diamante e polidas eletroliticamente usando uma solução de HCl em metanol. Após tal processo foi coberta por uma camada de 33 nm de sulfeto de zinco (ZnS) antirreflexiva. Um magnetômetro a efeito Kerr magneto-óptico (MOKE) permite a determinação do sinal MO para diferentes polarizações. Neste sistema uma onda incidente polarizada de um LED ($\lambda = 670$ nm) é refletida pela amostra e detectada pelo photodiodo após passar pelo analisador.

3. Resultados e Discussão

Para se obter as configurações de domínios foram feitas imagens usando o efeito Kerr magneto-óptico longitudinal (LMOKE). Um microscópio jenapol acoplado a uma câmera de vídeo Hamamatsu foi usada. Estas imagens foram obtidas em colaboração com o Prof. Dr. Antônio Domingues Santos do IFUSP. A Fig. 10 imagem superior corresponde a um amostra na qual não foi feito o tratamento térmico. Observe que nestas condições não existe estruturas de domínios uniformes. Na Fig. 10 imagem inferior o tratamento foi em uma temperatura de 573 K com um campo magnético de 3kOe perpendicular ao comprimento maior da amostra. Observe que existe a formação de domínios paralelos e antiparalelos que são observados pelas faixas claras e escuras. A largura do domínio é de aproximadamente 100 μ m. Ao se fazer o tratamento térmico com o campo perpendicular a fita se induz uma anisotropia e os momentos magnéticos magnéticos individuais dos átomos se alinham formando os domínios alternados de forma que minimiza-se a energia do sistema.

Fig. - 10: Imagens dos domínios usando o microscópio a efeito kerr.

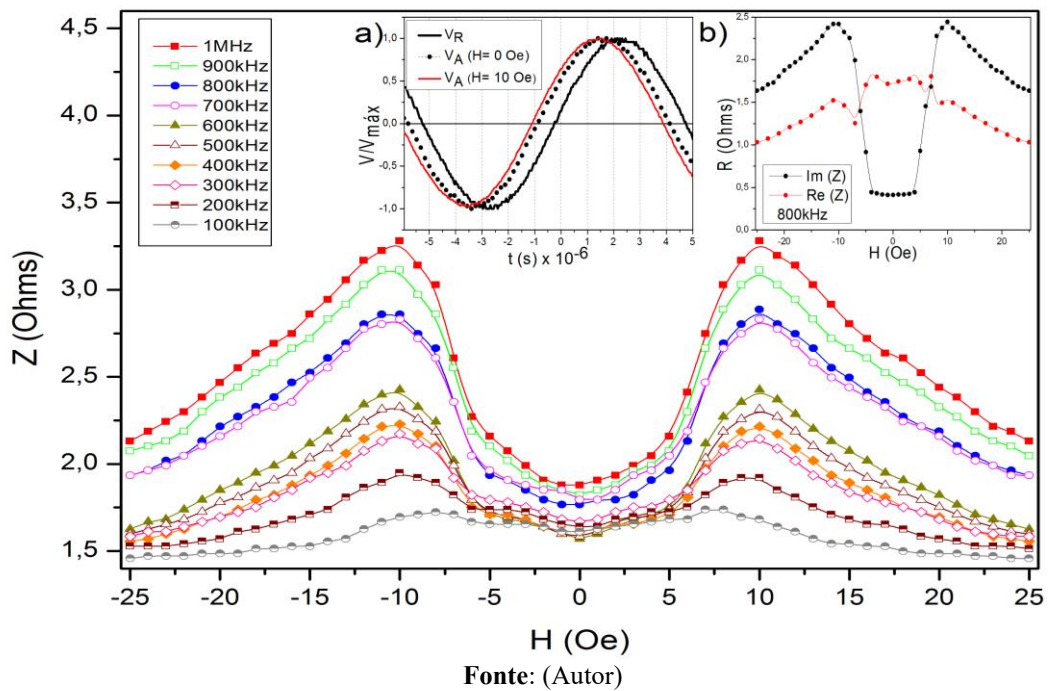


Fonte: (Santos)

Primeiramente foi realizado o gráfico do valor do módulo da impedância Z em função do campo aplicado em uma faixa de frequências de 100 kHz a 1 MHz, mostrado na Fig. 5. Ainda analisando a Fig. 5 é possível observar que ocorre uma variação da impedância de acordo

com o campo aplicado, tendo um pico em 10 Oe. Em 1 MHz obteve-se uma impedância em campo nulo de 1,87 Ohms e no pico, de 3,28 Ohms, representando uma variação gigante de 75%. Na Fig. 5a é mostrado as tensões em cima de um resistor que foi colocado em série a amostra e a tensão na amostra, observe que existe uma defasagem entre eles. Com o valor da defasagem obteve-se tanto a parte real quanto a imaginária do módulo da impedância (ver Fig. 5b). Foi observado que o aumento do valor da impedância com a frequência está relacionado ao aumento da contribuição imaginária

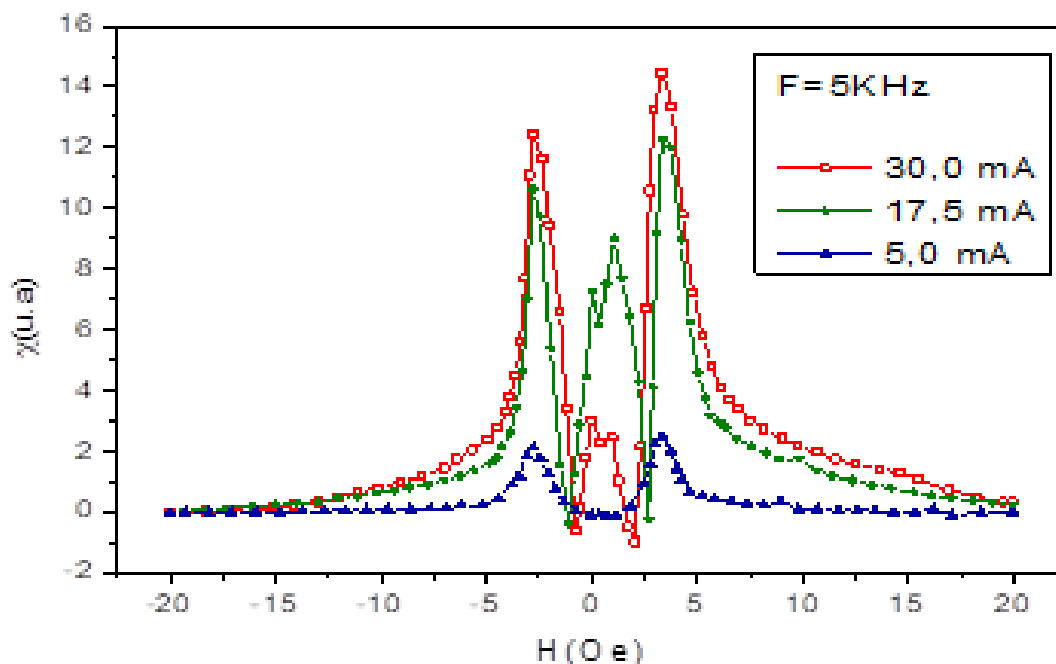
Fig. – 5: Impedância em função do campo magnético para várias frequências



Fonte: (Autor)

A Fig. 6 mostra a curva de susceptibilidade transversal em função do campo magnético medido por efeito Kerr, para três valores de correntes. Em trabalhos anteriores foi observado um comportamento análogo para microfios amorfos com composição $Co_{68,25}Fe_{4,5}Si_{12,2}B_{10}$. [9]. Na figura observa-se que a susceptibilidade apresenta um pico e este comportamento é análogo as curvas de magnetoimpedância.

Fig. – 6: Susceptibilidade em função do campo magnético para uma frequência de 5KHz.



Fonte: (Autor)

Para frequências moderadas a profundidade de penetração (δ) é bem menor que a espessura da fita (t), ou seja, a corrente flui próxima à superfície. Assim, a impedância será proporcional à resistência $Z \sim R \sim \rho l / 2b\delta \sim \sqrt{\mu f}$. Onde b é a largura da fita. l é o comprimento e ρ é a resistividade. Portanto, a impedância é proporcional à suscetibilidade e também a frequência da corrente [10].

4. Considerações finais

Na análise dos dados da Magnetoimpedância Gigante observou-se que a origem do crescimento do valor da impedância com a frequência está relacionada com o aumento da contribuição imaginária. Sendo levantada a hipótese inicial sobre a estrutura de picos bem definidos da GMI, até hoje não explicada cientificamente.

O valor máximo de magnetoimpedância foi de 75 % para um campo de 10 Oe, resultando numa sensibilidade de 7,5 %/Oe. Devido a grande variação da impedância em campos baixos, estes materiais têm grande potencial para aplicações em sensores magnéticos.

Agradecimentos

Agradecemos primeiramente ao Profº. Dr. A. D. Santos (IFUSP) pela ajuda nas medidas de susceptibilidade usando o MOKE. Agradecemos a I. G. de Araújo (UNESP) pela ajuda na produção das imagens.

Referências

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

- [1] DUQUE, J.G.S. Magnetoimpedância Gigante Linear e Não- Linear em Ligas Amorfas. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [2] MACHADO, F. L. A. et al. Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co_{70.4}Fe_{4.6}Si₁₅B₁₀. J. Appl. Phys, 75 (1994) 6563..
- [3] WANG, T. et al. Magnetic impedance biosensor: A review.; Journal Sensors: Biosensors and Bioelectronics. 90 (2017) 418.
- [4] BEACH, R.S.; BERKOWITZ, A.E.; Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire; J. Appl Phys. 76 (1994) 6209.
- [5] LANDAU, L. D. e LIFSCHITZ, E. M.; Electrodynamics of Continuous Media, (1984) 195.
- [6] KRAUS. L. GMI modeling and material optimization, Sensors and Actuators. A 106 (2003) 187
- [7] ROBERT, R. Efeito Pelicular. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 2, Junho, 2000.
- [8] LUCIANO, B. A.; Impedância e permeabilidade magnética inicial dos compostos Heusler Pb₂MnSn e Pb₂MnSb próximo da temperatura de Curie – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [9] SUN, S. et al. Magnetization and Giant Magnetoimpedance Effect of Co-Rich Microwires under Different Driven Currents. *Journal Sensors*. 2016 (2016) 1.
- [10] CORTE-LEÓN, P. et al. Giant magnetoimpedance and magneto-optical Kerr effect in (Co₆₃Ni₃₇)₇₅Si₁₅B₁₀ amorphous ribbon. *Intermetallics*, october, 125, (2020).