

1.05.07 - Física / Física da Matéria Condensada.

**MODULAÇÃO DA RESPOSTA TERMOELÉTRICA ATRAVÉS DA INDUÇÃO DE ANISOTROPIA EM MATERIAIS HEUSLER**M.V.P. Lopes<sup>1</sup>, E.C. Souza<sup>2\*</sup>, J.G.S. Santos<sup>3</sup>, F. Bohn<sup>4</sup>, M.A. Correa<sup>5</sup>

1. Estudante de doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) / Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFC)
2. Estudante de graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
3. Estudante de doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
4. Professor Associado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
5. Professor Associado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

**Resumo**

Novas e mais eficientes maneiras de utilizar a conversão de energia interna em calor em dispositivos eletrônicos são de extrema importância para a produção de dispositivos sustentáveis. Neste contexto, sabe-se que a eletrônica atual deixa de ser viável à medida que seus dispositivos (transistores, por exemplo) são miniaturizados. A spintrônica surge como promissora área para produção de dispositivos de alto desempenho energético, para isso diferentes fenômenos físicos são estudados tais como: efeito Hall de spin, efeito Hall de spin inverso e efeito Seebeck de spin. Focados nesta perspectiva, investigamos o Efeito Seebeck de Spin Longitudinal (LSSE) em bicamadas de  $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{W}$  crescidas sobre substrato orientado de GaAs (100). A manipulação da anisotropia é realizada através da indução simultânea da anisotropia uniaxial e cúbica durante a deposição. Pela comparação entre teoria e resultados experimentais mostramos que as bicamadas de CFA/W sobre substrato orientado de GaAs (100) tornam-se candidatos promissores para dispositivos spintrônicos.

**Palavras-chave:** Spintrônica, Efeito Seebeck de Spin,  $\text{Co}_2\text{FeAl}$ .

**Apoio financeiro:** CNPq e CAPES.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UFRN

**Introdução**

Novas e mais eficientes maneiras de utilizar a conversão de energia interna em calor em dispositivos eletrônicos são de extrema importância para a produção de dispositivos sustentáveis [1]. Neste contexto, sabe-se que a eletrônica atual deixa de ser viável à medida que seus dispositivos (transistores, por exemplo) são miniaturizados [2]. A spintrônica surge como promissora área para produção de dispositivos de alto desempenho energético, para isso diferentes fenômenos físicos são estudados tais como: efeito Hall de spin, efeito Hall de spin inverso e efeito Seebeck de spin [3].

Sobre esta perspectiva, as ligas Heusler aparecem como candidatos promissores para aplicações em spintrônica [4,5,6-8], uma vez que teoricamente elas apresentam a energia de gap próxima ao nível de Fermi, podendo alcançar 100% de polarização de correntes de spin [9]. Dentre as ligas Heusler, o  $\text{Co}_2\text{FeAl}$  (CFA) é um material com a alta magnetização de saturação, alta permeabilidade magnética, propriedades magnéticas macias e anisotropias magnéticas controláveis [9,10]. Além disso, em condições estruturais adequadas pode-se alcançar um baixo fator de amortecimento. Todas estas características levam o CFA como uma ótima liga ferromagnética para aplicações como antenas de detecção de spin polarizado [1] e aplicações como Spin torque oscillators e biossensores [2].

Neste trabalho, exploramos a possibilidade de modular um efeito termoelétrico por meio da indução de anisotropia magnética. Em especial, investigamos o efeito Seebeck de spin longitudinal (LSSE) em bicamadas de CFA/W crescidas sobre o substrato orientado de GaAs (100). Além disso, simulamos o comportamento magnético e a resposta termoelétrica dos filmes. Pela comparação entre teoria e resultados experimentais mostramos que as bicamadas de CFA/W tornam-se candidatos promissores para aplicações em spintrônica.

**Metodologia**

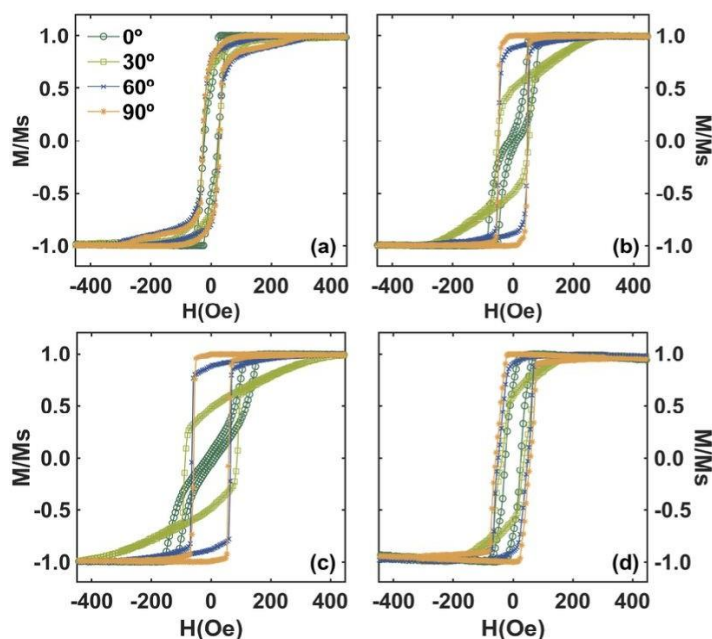
1. Produção de Amostras por "Magnetron Sputtering": As amostras apresentaram uma estrutura de bicamadas, onde a camada de CFA foi coberta por um metal não magnético com alto acoplamento spin-órbita como por exemplo a Pt ou W;

2. Tratamentos Térmicos: O sistema de deposição de filmes do LNMS tem um controle rigoroso de temperatura em ambiente controlado com a possibilidade de realização de sucessivos tratamentos térmicos em uma faixa de 20°C até 900°C. Este sistema de tratamento térmico será utilizado tanto durante o crescimento das amostras para mudanças e controle da estrutura e indução de diferentes fases no CFA;
3. Caracterização Magnética: A caracterização magnética foi realizada através de medidas de magnetização utilizando-se um magnetômetro de amostra vibrante (VSM).
4. Caracterização Termoelétrica: Finalmente a caracterização termoelétrica será realizada através de um sistema "home made" capaz de gerar um gradiente de temperatura controlado, perpendicular a superfície do filme, simultaneamente a aplicação de um campo magnético externo. O sistema conta com um goniômetro que nos permite a rotação da amostra durante as medidas para caracterizar a influência da anisotropia na tensão elétrica gerada.

## Resultados e Discussão

### PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Sobre as propriedades magnéticas, figura 2 mostra as curvas de magnetização obtidas para as bicamadas de CFA/W em diferentes valores de  $\varphi_H$ . A dependência angular das curvas nos revela a indução de anisotropia magnética em todas amostras produzidas. É claramente notável a diferença entre as curvas obtidas em valores distintos de  $\varphi_H$ , em especial para as amostras depositadas a 573K e 673K. Para todos os filmes, as curvas realizadas em  $\varphi_H = 0^\circ$  sugere a existência de um eixo de magnético intermediário resultado da sobreposição das anisotropias magnéticas uniaxial e cúbica (este fato será discutido mais adiante neste relatório). Além disso, os resultados também revelam um eixo de fácil magnetização ao longo da direção  $\varphi_H = 90^\circ$  e o eixo de difícil magnetização em  $\varphi_H = 45^\circ$ . Os resultados expressos aqui corroboram com os resultados encontrados nas referências [15,16], em que o CFA foi crescido sobre substratos de Si, MgO e GaAs.



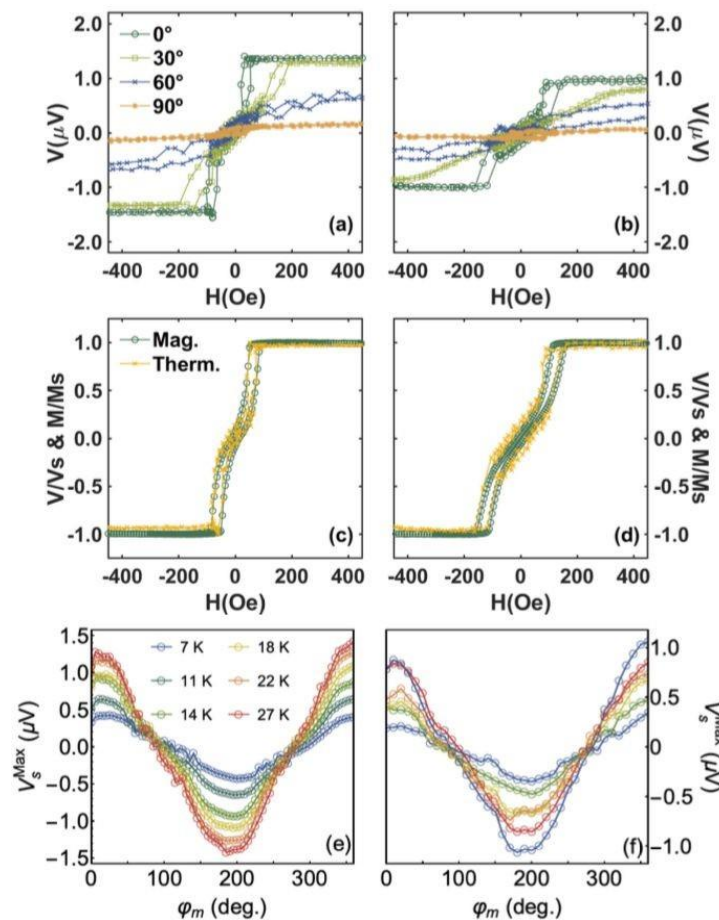
**Figura 8:** Curvas de magnetização normalizada para os filmes produzidos a 300,573,673 e 773 K. Todas amostras apresentam sobreposição de anisotropia uniaxial e cúbica sendo mais evidente nas depositada em 573 K e 673 K.

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O EFEITO SEEBECK DE SPIN

O foco da nossa atenção é as medidas das voltagem termoelétrica realizadas nas amostras no qual o CFA foi depositado à 573K e 673K.

A figura 2 mostra os resultados experimentais da resposta magnética e voltagem termoeétrica para ambas amostras. Em especial, as figuras 2 (a,b) apresenta a voltagem como função do campo, em distintos valores de  $\varphi$ , sobre  $\Delta T$  constante de 27 K. A evolução bastante interessante das formas das curvas mostra como a direção e a magnitude do campo são modificados. As medidas feitas em  $\varphi_H = 0^\circ$  levam a uma configuração de campo, no qual as curvas têm forma similar às curvas de magnetização, podemos ver este fato claramente na figura 2 (c,d). Contudo, com o aumento de  $\varphi_H$ , verifica-se a diminuição da voltagem de saturação, levando a uma voltagem mínima em  $\varphi_H = 90^\circ$ , como esperado. É importante comentar que a resposta da voltagem termoeétrica é resultado da combinação dos efeitos associado a anisotropias magnéticas e a configuração empregada no experimento[5].

As figuras 2 (e,f) mostram o comportamento de  $V$  como função de  $\varphi$  para um valor fixo de  $H = +500$  Oe e valores diferentes de  $\Delta T$ . Sobre este campo a amostra está magneticamente saturada. Como esperado, as curvas apresentam uma clara dependência de  $V$  com  $\varphi_H$ , evidenciado pela forma cossenoidal das curva e a alteração da sua amplitude com a variação de  $\Delta T$ .



**Figura 2:** Voltagem termoeétrica em função do campo magnético com  $\Delta T = 27$  K para amostra crescidas em (a) 573 K e (b) 673 K. (c,d) comparação das curvas normalizadas de magnetização e voltagem medidas em  $\varphi_H = 0^\circ$ . (e,f) dependência angular das voltagens termoeétrica em  $H = +500$  Oe.

### Conclusões

Em resumo, investigamos o efeito Seebeck de spin longitudinal em bicamadas de CFA/W crescidas sobre substrato orientado de GaAs(100). Notamos que as propriedades magnéticas são intensamente dependentes dos parâmetros utilizados durante o processo de deposição, tal como temperatura de deposição e tratamento térmico pós deposição. Após definir as condições ideais de temperatura, depositamos sistemas com anisotropia magnética induzida juntamente com a anisotropia magnetocristalina cúbica. Observamos claramente a dependência das curvas da voltagem

termoelétrica com a anisotropia magnética e os parâmetros empregados durante o experimento de efeito Seebeck de spin longitudinal. Comparando os resultados experimentais, confirmamos a possibilidade de modular o efeito termoelétrico através de anisotropia magnética em ligas Heusler de CFA. Nossos resultados trazem características importantes contribuindo para a integração entre propriedades elétricas e magnéticas, colocado as amostras de CFA/W sobre substrato de GaAs(100) como candidato promissor para aplicações em spintrônica.

### Referências bibliográficas

- [1] SHINJO, Teruya (Ed.). **Nanomagnetism and spintronics**. Elsevier, 2013.
- [2] GUIMARÃES, Alberto P.; GUIMARAES, Alberto Passos. **Principles of nanomagnetism**. Berlin: Springer, 2009.
- [3] VICTOR, Rodrigo Torrão. **Estudo da dinâmica de magnetização em sistemas FM/NM para aplicações em spintrônica**. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas(CBPF), Rio de Janeiro, 2019.
- [4] Holanda, J.; Alves Santos, O.; Cunha, R.O.; Mendes, J.B.; Rodríguez-Suárez, R.L.; Azevedo, A.; Rezende, S.M. Longitudinal spin Seebeck effect in permalloy separated from the anomalous Nernst effect: Theory and experiment. *Phys. Rev. B* **2017**, 95, 214421.
- [5] Melo, A.S.; de Oliveira, A.B.; Chesman, C.; Della Pace, R.D.; Bohn, F.; Correa, M.A. Anomalous Nernst effect in stressed magnetostrictive film grown onto flexible substrate. *Sci. Rep.* **2019**, 9, 15338.
- [6] Hu, S.; Itoh, H.; Kimura, T. Efficient thermal spin injection using Co<sub>2</sub>FeAl nanowire. *NPG Asia Mater.* **2014**, 6, e127–e127.
- [7] Inomata, K.; Ikeda, N.; Tezuka, N.; Goto, R.; Sugimoto, S.; Wojcik, M.; Jedryka, E. Highly spin-polarized materials and devices for spintronics. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2008**, 9, 014101.
- [8] Gabor, M.S.; Petrisor, Jr., T.; Tiusan, C.; Hehn, M.; Petrisor, T. Magnetic and structural anisotropies of Co<sub>2</sub>FeAl Heusler alloy epitaxial thin films. *Phys. Rev. B* **2011**, 84, 134413.
- [9] Lai, B.; Zhang, X.; Lu, X.; Yang, L.; Wang, J.; Chen, Y.; Zhao, Y.; Li, Y.; Ruan, X.; Wang, X.; others. Magnetic anisotropy of half-metallic Co<sub>2</sub>FeAl ultra-thin films epitaxially grown on GaAs (001). *AIP Advances* **2019**, 9, 065002.
- [10] Qiao, S.; Nie, S.; Zhao, J.; Zhang, X. Temperature dependent magnetic anisotropy of epitaxial Co<sub>2</sub>FeAl films grown on GaAs. *J. Appl. Phys.* **2015**, 117, 093904.
- [11] SILVA, Edimilson Felix da. **Propriedades magnéticas quase estáticas e dinâmicas de filmes ferromagnéticos bifásicos**.
- [12] SANTOS, J. G. S. et al. Role of the spin-orbit coupling on the effective damping parameter in Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/(Ag,W) bilayers explored through magnetoimpedance effect. *Materials Letters*, v. 256, p. 126662, **2019**.
- [13] Janik, E.; Dłuzewski, P.; Kret, S.; Presz, A.; Kirmse, H.; Neumann, W.; Zaleszczyk, W.; Baczewski, L.T.; Petroutchik, A.; Dynowska, E.; Sadowski, J.; Caliebe, W.; Karczewski, G.; Wojtowicz, T. Catalytic growth of ZnTe nanowires by molecular beam epitaxy: structural studies. *Nanotechnology* **2007**, 18, 475606.
- [14] Leo, G. Influence of a ZnTe buffer layer on the structural quality of CdTe epilayers grown on (100)GaAs by metalorganic vapor phase epitaxy. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **1996**, 14, 1739
- [15] Silva, A.; Escobar, V.; Callegari, G.; Agra, K.; Chesman, C.; Bohn, F.; Corrêa, M. Giant magnetoimpedance effect in Co<sub>2</sub>FeAl single layered and Co<sub>2</sub>FeAl/Ag multilayered films in amorphous substrates. *Mat. Lett.* **2015**, 156, 90–93.
- [16] De Teresa, J.M.; Serrate, D.; Cordoba, R.; Yusuf, S.M. Correlation between the synthesis conditions and the compositional and magnetic properties of Co<sub>2</sub>(Cr<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Al Heusler alloys. *J. Alloy. Compd.* **2008**, 450, 31–38.