COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DE MULTICAMADAS FERRIMAGNÉTICAS DE Pt/CoGd/Pt PARA APLICAÇÕES EM SPINTRÔNICA

Palavras-Chave: NANOMAGNETISMO, SPINTRÔNICA, FILMES FINOS.

Autores(as):

THAÍS SILVA DE ALMEIDA, IFGW – UNICAMP

Profª. Drª. FANNY BÉRON (orientadora), IFGW – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Esse projeto se baseia em um artigo anterior a ele, J, Brandão, D.A. Dugato, M.V. Puydinger dos Santos, Fanny Béron, J.C, Cezar, Applied Surface Science, Volume 585, 2022 [1], e se configura como uma continuação dele. Entre os autores do artigo estão a orientadora desse projeto, Fanny Béron, e pessoas que trabalham no CNPEM. O artigo foi feito com objetivo de criar uma camada ferrimagnética que estabilizasse skyrmions. Nele foram feitas diversas caracterizações da multicamada e foi concluído que a liga de CoGd é ferrimagnética, mesmo para espessuras tão finas quanto 0,7nm, e há uma mudança na textura de magnetização para diferentes espessuras para as camadas de CoGd, além disso foi observado a presença de skyrmions nas camadas de CoGd com espessuras de 0,7nm, e 0,9nm. A partir desse estudo, para estudar mais sobre esse material, foi montado o presente projeto.

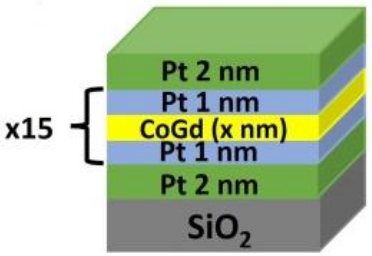

Figura 1 - Esquema das multicamadas ferrimagnéticas de Pt/Co80Gd20/Pt estudadas. Fonte: [1]

As multicamadas de $Pt/Co_{80}Gd_{20}/Pt$ foram fabricadas em um substrato de SiO_2 e depositadas por pulverização catódica. Nas amostras as camadas seguem o seguinte padrão: uma camada de Pt de 2nm de espessura, uma camada de Pt de 1nm, uma camada de liga de CoGd cuja espessura pode ser 0,7nm, 0,9nm ou 1,5nm, uma camada de Pt de 1nm e uma camada de Pt de 2nm (Figura 01). A camada ferromagnética de repete 15 vezes, sendo que considera-se como sendo a camada ferromagnética as duas camadas de Pt de 1nm e a camada de CoGd, a princípio somente a CoGd tem características ferrimagnéticas, mas essa camada em contato com a camada de Pt a torna ferromagnética. Para facilitar a linguagem, por vezes as amostras são referidas como CoGd-1,5, CoGd-0,9 e CoGd-0,7, se referindo às amostras pela espessura da camada mais importante delas.

METODOLOGIA:

Para a realização das medidas experimentais foram usados dois instrumentos de medição, o VSM (Magnetômetro de Amostra Vibratória, ou Vibrating Sample Magnetometer em inglês) da marca LakeShore modelo 7400 e o SQUID-VSM (Dispositivo Supercondutor de Interferência Quântica, ou Superconducting Quantum

Interference Device em inglês, e o VSM tem o mesmo significado anteriormente citado) da marca Quantum Desing modelo de Terceira Geração MPMS SQUID 7.0 Tesla.

As medidas realizadas podem ser agrupadas em quatro tipos, diferenciadas por objetivo e método. A fim de calcular a anisotropia magnética efetiva nas três multicamadas estudadas e observar a dependência da curva de histerese com a direção do campo aplicado, foram executadas medidas à temperatura ambiente nas três amostras utilizando o VSM e para cada uma delas foram obtidas sete curvas de momento magnético por campo, cada uma dessas curvas para um ângulo diferente. Esses ângulos foram variados de 00º (campo aplicado paralelo ao plano da amostra, também chamada de medida no plano, ou, em inglês, *"in plane" (IP)*) a 90º (campo aplicado perpendicular ao plano, também chamada de medida fora do plano, ou, em inglês, *"out of plane" (OOP)*) com um incremento de 15º. O campo aplicado foi de 1,2T a -1,2T para todas as medidas exceto as de 00º e 15º para a multicamada de 0,7nm de espessura da liga de CoGd, onde o campo variou de 1,5T a -1,5T para se certificar que a amostra havia saturado e o número de pontos foi ajustado para obter mais pontos no intervalo de interesse e menos no de saturação, para que as medidas ficassem mais rápidas, sem perder informações relevantes, e esses intervalos variam de acordo com a amostra e com o ângulo da medida. Durante a preparação da medida, para o posicionamento na amostra no medidor foi utilizada uma vareta de quartzo de ponta achatada e os ângulos são modificados na interface do VSM, que gira a vareta.

Com o objetivo de verificar a possível existência de um eixo preferencial no plano da multicamada, foram realizadas medidas à temperatura ambiente de curva de histerese com a utilização do VSM. Para isso foi escolhida a amostra de 0,7nm de espessura, foi avaliado que se houvesse anisotropia magnética no plano seria por uma característica do material que se supunha antes não existir, e, se fosse o caso, a mais provável de apresentar isso seria a de menor espessura, que no artigo prévio usado de base [1] foi concluído que apresenta skyrmions. As medições foram feitas com o campo variando de 1,5T a -1,5T e os ângulos no plano (todos paralelos ao plano, aqui o parâmetro dos ângulos foram os eixos x e y, considerando z para o plano sendo o perpendicular à sua face) foram escolhidos 0º, 15º, 30º, 40º, 60º, 75º, 90º, 180º e 270º, pois a partir de uma pesquisa sobre a cristalografia do material [2], foi aproximado que a estrutura se repete a cada 90º, então somente o primeiro quadrante foi melhor caracterizado. Durante o posicionamento foi utilizada uma vareta de quartzo de ponta reta e os ângulos foram modificados com utilização da interface pelo VSM. Para evitar adicionar incertezas às medidas, essas medidas foram realizadas todas sem desmontar o aparato experimental, evitando assim possíveis mudanças no ângulo de referência e por consequência nos demais.

Então, como os momentos magnéticos do Co e do Gd variam de maneira distinta entre si, com o propósito de explorar o comportamento magnético das amostras em outras temperaturas foram feitas medidas de magnetometria com a utilização do SQUID-VSM. Foram medidas as multicamadas de CoGd com 1,5nm, 0,9nm, 0,7nm de espessura, o aparato de medida foi montado usando um porta amostras e as multicamadas precisaram ser clivadas para encaixar no aparato. Para cada uma delas foram realizadas medidas de momento magnético por campo aplicado perpendicular ao plano, o campo aplicado variou de 1T a -1T e foram medidos em diversas temperaturas, de 350K a 2K, a fim de explorar como as curvas de histerese com campo fora do plano para essas amostras se desenvolviam perto da temperatura de compensação (cerca de 55K segundo [01]).

Por fim, para analisar melhor a temperatura de compensação das amostras, foram feitas medidas da magnetização remanente em função da temperatura para as duas amostras menos espessas. Para isso primeiro as amostras foram desmagnetizadas, depois sujeitas a um campo magnético de 0,5T, que então retirado linearmente para que a magnetização remanente estivesse presente nas amostras, assim a foram feitas medidas do momento magnético em função da temperatura, variada linearmente de 2K a 350K.

Para o tratamento de dados foi desenvolvido um código em Python que automatiza o tratamento das curvas de momento magnético em função do campo aplicado, deixando somente a contribuição ferromagnética das amostras nas medidas e transformando momento magnético em magnetização. Além disso, o código também retorna alguns valores de interesse: magnetização de saturação média, campo coercivo e magnetização remanente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir do tratamento de dados e confecção dos gráficos, foram obtidos os gráficos representados na Figura 2 de curvas de Magnetização (KA/m) por Campo (T) para os ângulos definidos em amostras com CoGd de espessuras 0,7nm, 0,9nm e 1,5nm.

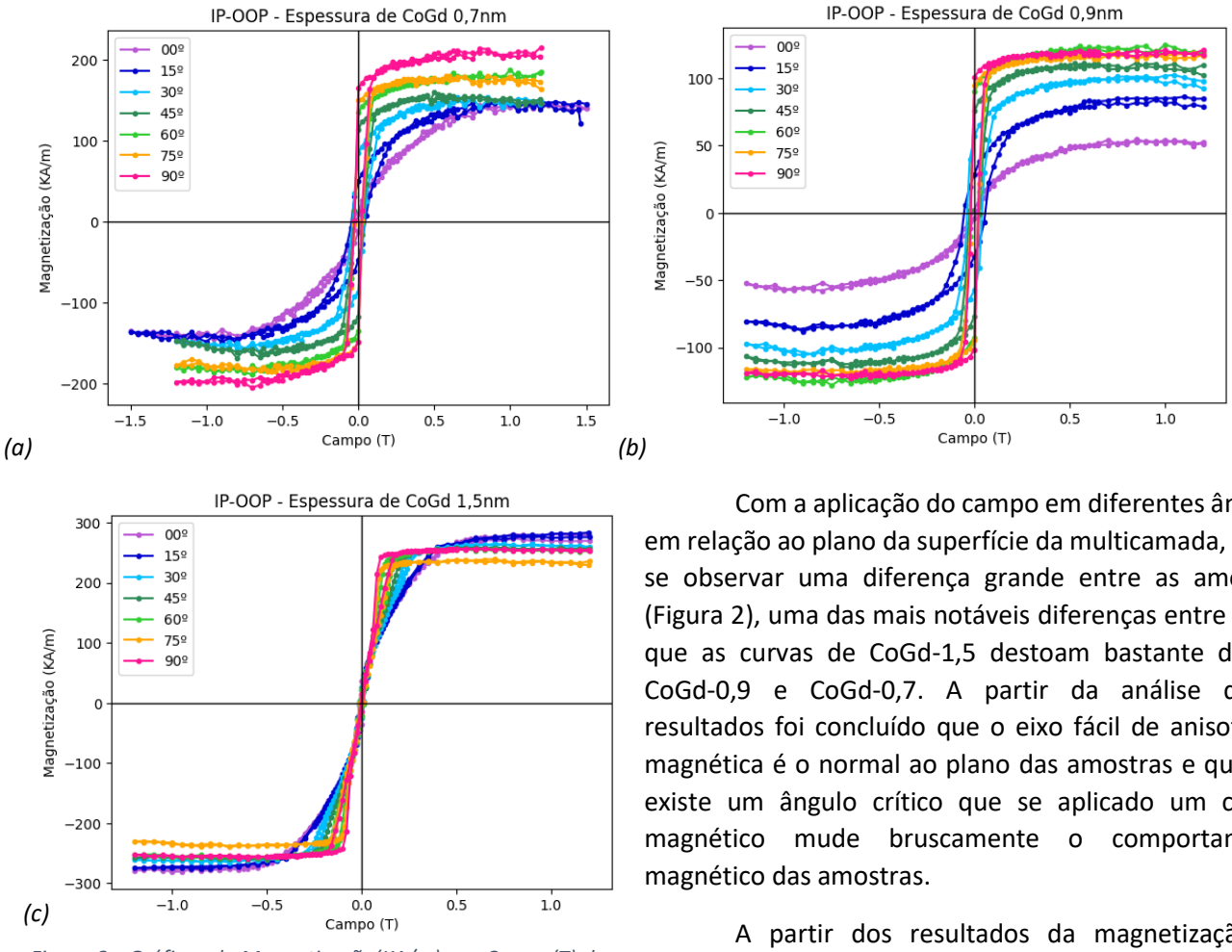

Figura 2 - Gráficos de Magnetização(KA/m) por Campo(T) das multicamadas com curvas de ângulos de 00º (campo paralelo ao plano da multicamada) a 90º (campo perpendicular) com incremento de 15º. (a) Gráfico para a amostra com camada de CoGd com 0,7nm de espessura. (b) Gráfico para a amostra com camada de CoGd com 0,9nm de espessura. (c) Gráfico para a amostra com camada de CoGd com e 1,5nm de espessura.

Com a aplicação do campo em diferentes ângulos em relação ao plano da superfície da multicamada, pode-se observar uma diferença grande entre as amostras (Figura 2), uma das mais notáveis diferenças entre elas é que as curvas de CoGd-1,5 destoam bastante das de CoGd-0,9 e CoGd-0,7. A partir da análise desses resultados foi concluído que o eixo fácil de anisotropia magnética é o normal ao plano das amostras e que não existe um ângulo crítico que se aplicado um campo magnético mude bruscamente o comportamento magnético das amostras.

A partir dos resultados da magnetização de saturação média (M_S) e do campo coercivo (H_K) para as amostras, foi calculada a anisotropia magnética efetiva de cada uma das amostras. Para o cálculo da anisotropia magnética efetiva foi utilizada a Equação (1), obtida por B. Hebler, et al, Physical ReviewB, 95(10):104410,mar2017[3].

$$K_{eff} = \frac{M_s H_k}{2} + 2\pi M_s \qquad (1)$$

Em que K_{eff} é a anisotropia efetiva. O primeiro termo do lado direito da Equação (1) é uma modelagem da anisotropia magnetocristalina e o segundo termo é a anisotropia de forma, para o cálculo da anisotropia desejada foi utilizado apenas o primeiro termo. Assim, foi confeccionado um gráfico com as anisotropias magnéticas efetivas para as três amostras, representado na Figura 3, onde a evolução da anisotropia magnética efetiva aparenta crescer linearmente com a espessura, mas não se pode afirmar que isso ocorre de fato por falta de mais dados (que exigiram mais amostras, algo fora da proposta da pesquisa).

Com uso do algoritmo criado para a confecção e tratamento automatizado dos gráficos, foi obtido também o gráfico de curvas de Magnetização (KA/m) por Campo (T) para os ângulos no plano, para a multicamada de CoGd de 0,7nm de espessura, apresentado na Figura 4. Este resultado mostra que não há eixo preferencial de orientação no plano. A divergência na magnetização de saturação foi interpretada como uma consequência do instrumento de medida escolhido, o VSM tem uma resposta melhor para amostras com sinal maior, o baixo sinal magnético das amostras estudadas (que se deve às espessuras nanométricas das camadas) resultou em uma medida ruidosa ao utilizar esse instrumento.

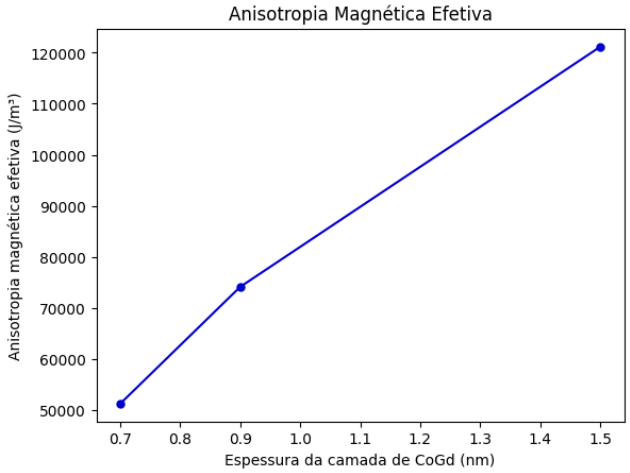

Figura 3 - Gráfico da anisotropia magnética efetiva (J/m³) pela espessura da camada de CoGd (nm) da amostra à qual pertence a anisotropia.

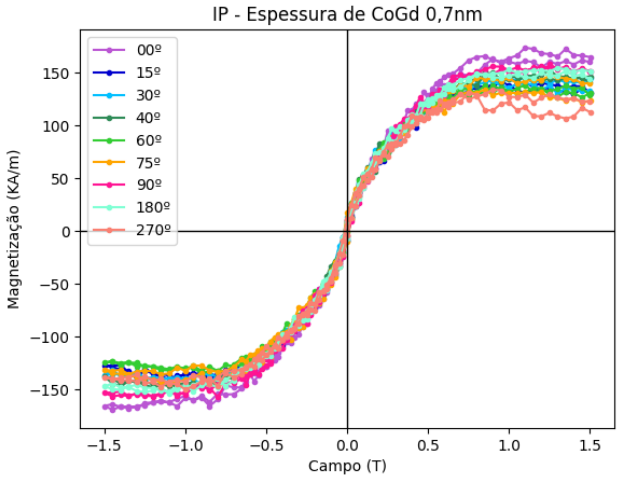

Figura 4 - Gráfico de Magnetização(KA/m) por Campo(T) da amostra de CoGd, 0,7nm de espessura, com curvas de ângulos de 00º, 15º, 30º, 40º, 60º, 75º, 90º, 180º e 270º no plano.

Também com uso do algoritmo, foram obtidos gráficos para as curvas de magnetização para as amostras de CoGd de 1,5nm, 0,9nm e 0,7nm de espessura, medidas no SQUID-VSM a diversas temperaturas, variando de 350K a 2K e com mais medições abaixo de 115K, onde estariam comportamentos de interesse, com base em [01]. As temperaturas medidas foram: 350K, 225K, 115K, 100K, 85K, 60K, 45K, 20K e 2K para as amostras de CoGd-0,7nm e CoGd-0,9nm; 300K, 225K, 125K, 85K, 70K, 55K, 30K e 2K para a amostra de CoGd-1,5nm.

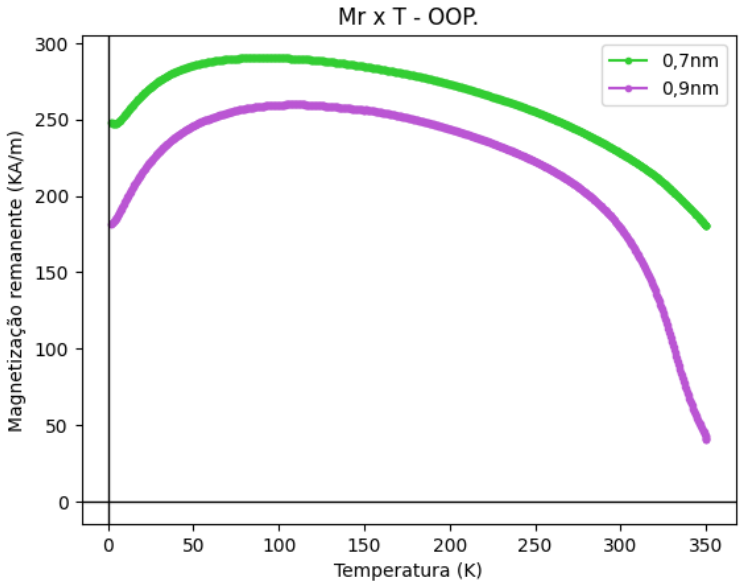

Figura 3 - Gráfico da Magnetização remanente (KA/m) em função da Temperatura (K) para amostras de CoGd com 0,7nm e 0,9nm de espessura.

Por fim, os resultados da medição da magnetização remanente em função da temperatura estão representados na Figura 5. Fica evidente então que as amostras estudadas não apresentam mais uma temperatura de compensação, como o instrumento de medida, amostras e o procedimento foram os mesmos do artigo anterior [01], onde foi encontrada uma temperatura de compensação próxima de 55K, conclui-se então que as amostras se degradaram com o tempo, provavelmente por oxidação. Por esse motivo, também não foi possível tirar conclusões sobre o comportamento magnético das amostras a diferentes temperaturas a partir das curvas de histereses realizadas.

CONCLUSÕES:

Portanto, foram caracterizadas as multicamadas ferromagnéticas de CoGd de 1,5nm, 0,9nm e 0,7nm em função do ângulo entre o campo externo aplicado em magnetometria e o plano da amostra, disso foi concluído que o eixo fácil de anisotropia magnética é o normal ao plano. Para essas medidas foi obtida a anisotropia magnética efetiva das amostras com auxílio do código desenvolvido. Além disso, como supracitado foi concluído que há um comportamento semelhante para as multicamadas de CoGd com 0,9nm e 0,7nm de espessura, que se difere do comportamento da multicamada de CoGd com 1,5nm de espessura, o que era esperado desde a conclusão do artigo que inspirou esse projeto. Também, com sucesso foi estabelecido que não há um eixo preferencial de orientação no plano das multicamadas ferrimagnéticas de CoGd.

Além disso as magnetometrias realizadas para diferentes temperaturas apresentaram satisfizeram a proposta inicial de exploração dessa caracterização, mas não possibilitou conclusões sobre o comportamento magnético ideal dessas multicamadas ferrimagnéticas em diferentes temperaturas, pois foi concluído que as amostras foram degradadas e não apresentam mais o comportamento de interesse observado anteriormente.

A fim de tratamento de dados para as curvas de histerese, o código desenvolvido com essa finalidade apresentou resultados satisfatórios, automatizando esse processo.

Por fim, o estudo amplia o conhecimento sobre o comportamento magnético das multicamadas ferrimagnéticas de Pt/CoGd/Pt já exploradas anteriormente em J, Brandão, D.A. Dugato, M.V. Puydinger dos Santos, Fanny Béron, J.C, Cezar, Applied Surface Science, Volume 585, 2022, é esperado que contribua para o avanço de futuras pesquisas nesse material, assim contribuindo para o desenvolvimento de novas tecnologias.

BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS:

[1] J. Brandão et al. “Tuning isolated zero-field skyrmions and spin spirals at room-temperature in synthetic ferrimagnetic multilayers”. Em: Applied Surface Science 585 (2022).

[2] Crystallography. https://www.crystallography.net/cod/1524066.html. Acesso: 02/05/2024.

[3] B. Hebler et al. “Double exchange bias in ferromagnetic heterostructures”. Em: Physical Review B 95.10 (2017), p. 104410.

[4] Alberto Passos GUIMARÃES. Magnetismo e Ressonância Magnética em Sólidos. São Paulo: EDUSP, 2009.

[5] J. M. D. COEY. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.