Estudo das propriedades magnéticas de nanodiscos para aplicação em sensores magnetorresistivos para diagnóstico de câncer

Palavras-Chave: Câncer, Nanomateriais, Magnetismo

Autores(as):

Maria Eduarda da Silva Mota, IFGW - Unicamp

Prof. Dr. Kleber Roberto Pirota (orientador), IFGW - Unicamp

Dr. Pablo Rafael Trajano Ribeiro (coorientador), IFGW - Unicamp

INTRODUÇÃO:

O câncer é uma das principais causas de morte no mundo, sendo responsável por aproximadamente uma em cada seis mortes em 2020, segundo dados da Organização Mundial da Saúde [1]. A detecção precoce da doença aumenta significativamente as chances de sucesso no tratamento. Nesse contexto, o projeto internacional *nanoCANdi* (Advanced Functional Nanomaterials for Precise Cancer Diagnosis), parte do programa M-ERA.NET, tem como objetivo desenvolver sensores magnetorresistivos (do tipo GMR – Magnetorresistência Gigante) capazes de identificar biomarcadores específicos do câncer de pele em estágios iniciais, ilustrado na Figura 1.

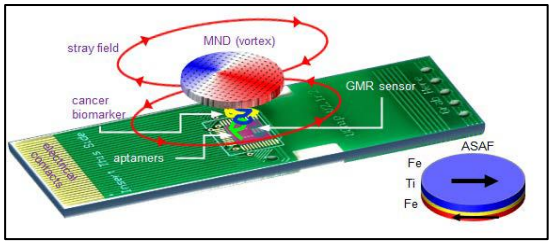

Figura 1 - Esquema da configuração e princípio de funcionamento do sensor magnetorresistivo. Em cima do sensor GMR, tem-se a configuração magnética de vórtex e, no canto inferior direito, a de SAF

Sensores GMR detectam variações em campos magnéticos a partir da mudança abrupta na resistência elétrica de multicamadas magnéticas. Em geral, esses dispositivos utilizam nanopartículas superparamagnéticas como marcadores biológicos [2]; entretanto, o projeto propõe a utilização de nanodiscos magnéticos, que possuem momento magnético mais elevado, aumentando o limite de detecção do sensor. Esses nanodiscos, ao se ligarem a proteínas específicas de um tumor, geram um campo magnético localizado detectável pelo sensor, permitindo à leitura da concentração de biomarcadores.

Para evitar aglomeração entre os nanodiscos causada por interação magnetostática, são necessárias estruturas magnéticas que apresentem remanência nula. Isso pode ser obtido por duas configurações principais: o estado de vórtex e a estrutura de Antiferromagneto Sintético (SAF). No primeiro, os momentos magnéticos se organizam em torno de um núcleo, fechando as linhas de campo e anulando o momento magnético total [3]. Já o SAF é obtido por meio de duas camadas ferromagnéticas

separadas por um espaçador não magnético, cuja interações dipolares e de acoplamento RKKY podem ser ajustadas para favorecer o alinhamento antiparalelo entre as camadas [4].

METODOLOGIA:

Os nanodiscos utilizados foram fabricados na Universidade do País Basco (UPV/EHU) por meio da técnica de litografia de interferência, que permite a criação de padrões periódicos com alta resolução sobre substratos de silício. Após a definição dos padrões, os materiais foram depositados por evaporação por feixe de elétrons.

As amostras foram divididas em dois grupos:

- **Grupo 1**: nanodiscos circulares de ferro (Fe) com diâmetro nominal de 749 nm e configuração magnética tipo vórtex.
- **Grupo 2**: nanodiscos elipsoidais com estrutura SAF, com três configurações principais:
  - Co(11)/Ti(5)/Py(x)/Ti(5), com x = 10, 20 e 30 nm;
  - Al(50)/Au(5)/Fe(x)/Ti(5)/Fe(x)/Au(5), com x = 25, 50 e 100 nm;
  - Py(50)/Ti(5)/Py(50)/Au(5).

Após o recebimento, foi feita caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A caracterização magnética foi realizada com o magnetômetro SQUID, que permite medidas precisas do momento magnético *M* em função do campo aplicado *H* (curvas *M vs H*) a temperaturas de 300 K e 2 K.

Adicionalmente, foram feitas simulações micromagnéticas no software Mumax3 [5], baseado na equação de Landau-Lifshitz-Gilbert, para investigar os estados de equilíbrio e as interações magnéticas entre os nanodiscos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Nanodiscos Circulares – Vórtex

A análise por MEV (Figura 2) mostrou que os novos discos circulares de Fe apresentam boa uniformidade, diferentemente de amostras anteriores com diâmetros de 300 nm e 700 nm, que mostravam formatos elipsoidais e conectados. O diâmetro real médio foi estimado em 791,8 nm, um pouco acima do valor nominal devido ao formato losangular observado.

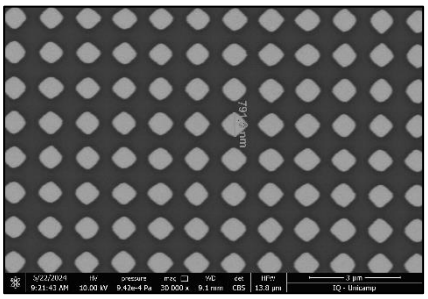

Figura 2- Imagem de MEV da amostra do tipo vortex. Com diâmetro de 749 nm, os discos apresentavam formato próximo ao circular.

As curvas *M vs H* a 300 K da Figura 3 apresentaram características típicas de vórtex, com nódulos antes da saturação e remanência praticamente nula. Além disso, a repetição da medida após quatro meses indicou estabilidade temporal das propriedades magnéticas.

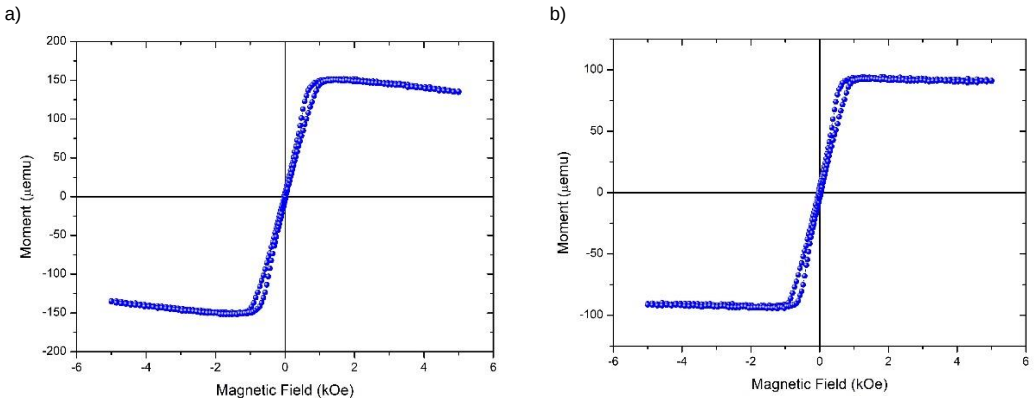

Figura 3 - Gráficos MxH dos nanodiscos circulares com 749 nm de diâmetro a 300 K. Imagem (a) medida em 21 de junho de 2024 e imagem (b) dia 30 de outubro de 2024. Medidas feitas no magnetômetro SQUID.

Simulações em disco isolado confirmaram o estado de vórtex e a curva *M vs H* simulada foi compatível com os dados experimentais. Foram também simulados pares de discos com diferentes combinações de polaridade e quiralidade. Observou-se que:

- A polaridade (direção do núcleo no plano) tem pouco impacto na energia total do sistema (Figura 4a).
- A quiralidade (sentido de rotação dos spins) influencia na interação entre discos vizinhos (Figura 4b). Configurações com quiralidades opostas são energeticamente mais favoráveis a curtas distâncias (<150 nm).

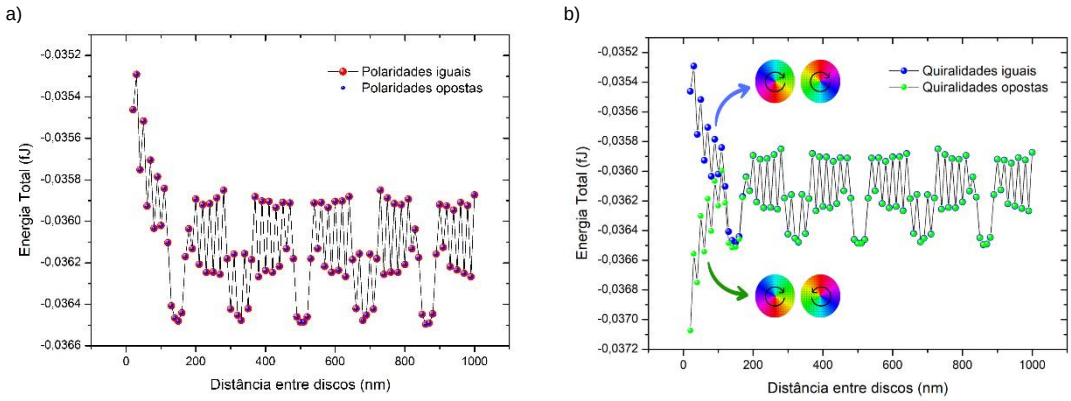

Figura 4 - Simulação da energia total de um sistema com dois nanodiscos em relação a distância entre suas bordas. Simulações feitas no programa Mumax3 de nanodiscos com diâmetro de 749 nm, espessura de 50 nm e composição de Fe.

Nanodiscos Elipsoidais – SAF

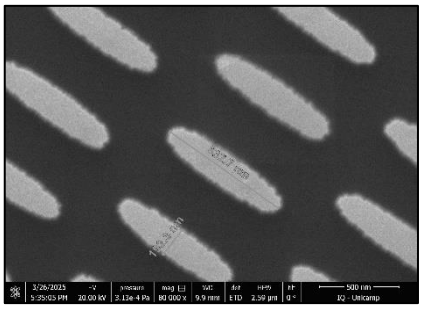

Figura 5 - Imagem de MEV da amostra do tipo SAF. Os discos apresentavam formato elipsoidais uniformes.

As imagens de MEV (Figura 5) mostraram discos com formato elipsoidal padronizado e dimensões homogêneas (eixo maior ~800 nm; eixo menor ~200 nm). A curva *M vs H* da multicamada Py(50)/Ti(5)/Py(50)/Au(5) a 300 K apresentaram remanência e coercividade baixas, indicando um alinhamento antiparalelo entre as camadas ferromagnéticas.

Ao repetir a medida a 2 K, observou-se um alargamento da curva de histerese, atribuído à maior ordem dos momentos magnéticos e aumento da energia necessária para a reversão de magnetização.

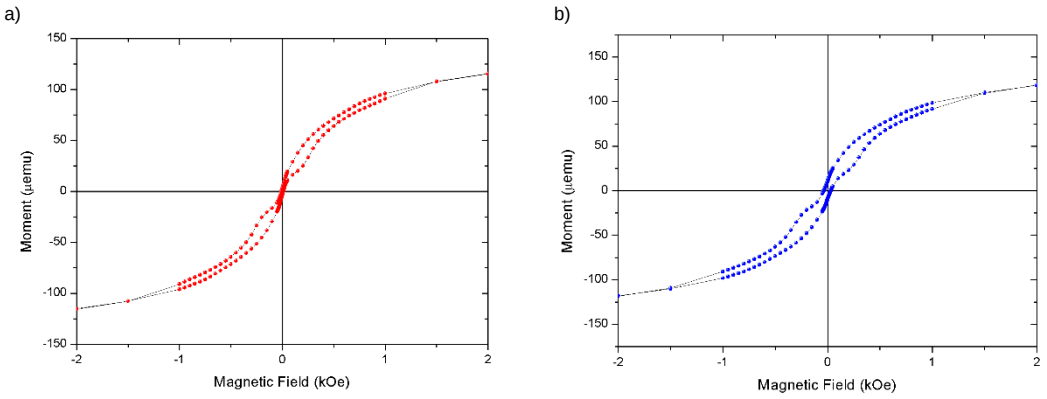

Figura 6 – Gráficos MxH dos nanodiscos multicamada Py (50)/Ti (5)/Py (50)/Au (5). Imagem (a) feita a 300K e imagem (b) a 2K. Medidas feitas no magnetômetro SQUID.

Nas amostras Al(50)/Au(5)/Fe(x)/Ti(5)/Fe(x)/Au(5), verificou-se que a remanência aumenta com a espessura das camadas de Fe. Isso ocorre pois o espaçador de Ti (5 nm) se torna relativamente mais fino, o que enfraquece a interação antiferromagnética e favorece o acoplamento ferromagnético. Assim, o controle da espessura é um parâmetro crucial para garantir o comportamento desejado do SAF.

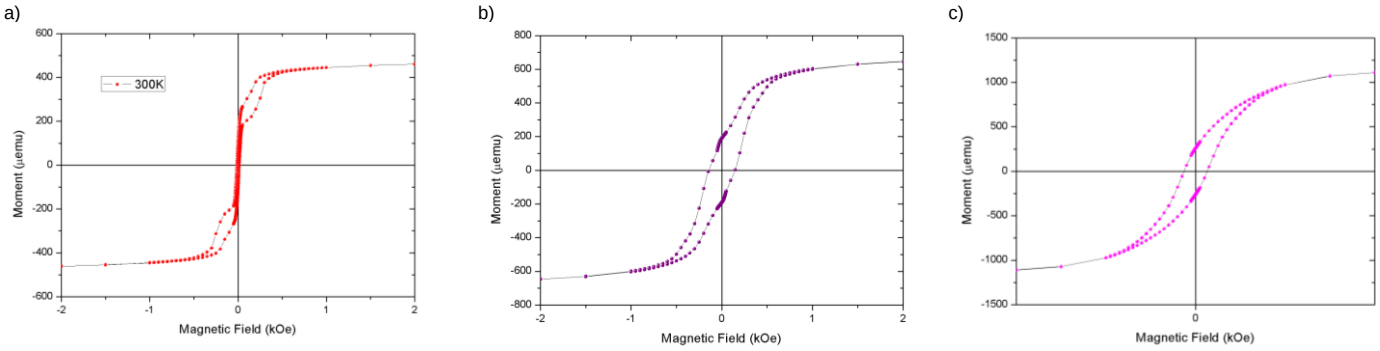

Figura 7 - Gráficos MxH dos nanodiscos multicamada Al(50)/Au(5)/Fe(x)/Ti(5)/Fe(x)/Au(5) a 300K. Imagens: (a) x=25 nm; (b) x=50 nm; (c) x=100 nm . Medidas feitas no magnetômetro SQUID

As amostras Co(11)/Ti(5)/Py(x)/Ti(5) apresentaram curvas de magnetização características, com dois platôs e quedas sucessivas (Fig. 8), resultantes das diferentes coercividades entre as camadas magnéticas. No caso de x = 20 nm, o segundo platô aparece menos definido, possivelmente devido a um acoplamento antiferromagnético via RKKY, mais forte nessa espessura. A 2 K, observou-se um alargamento assimétrico da histerese, comportamento incomum e ainda em estudo.

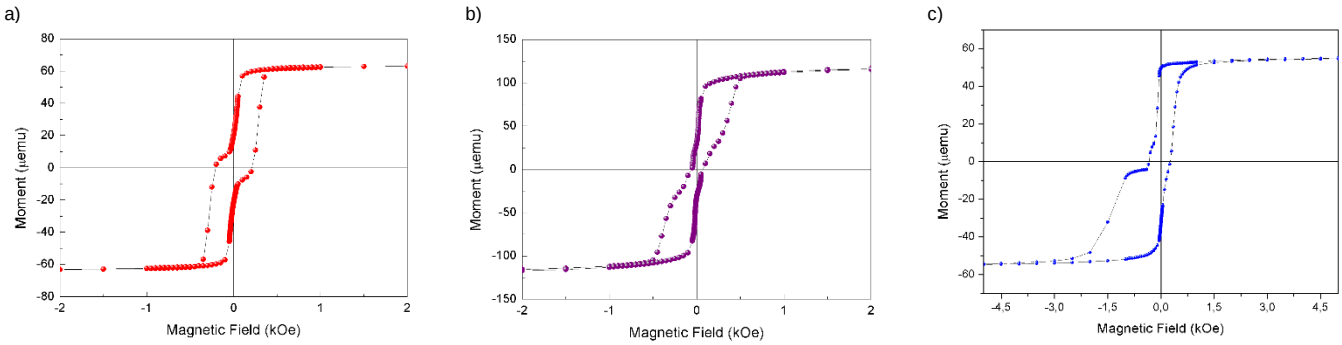

Figura 8 - Gráficos MxH dos nanodiscos multicamada Co(11)/Ti(5)/Py(x)/Ti(5). Imagem (a) x=10 nm e (b) x=20 nm, ambos a 300K e imagem (c) x=10 nm a 2K. Medidas feitas no magnetômetro SQUID

As simulações micromagnéticas realizadas no Mumax3 com a amostra de x = 10 nm mostraram que a configuração de menor energia ocorre com magnetizações opostas nas camadas de Co e Py,

compatível com acoplamento antiferromagnético. A curva simulada com campo ao longo do eixo maior (0°) apresentou platôs e quedas sucessivas semelhantes ao experimento (Fig. 9), e a simulação com campo a 90° revelou uma curva do tipo vórtex, atribuída à anisotropia de forma dos discos elipsoidais.

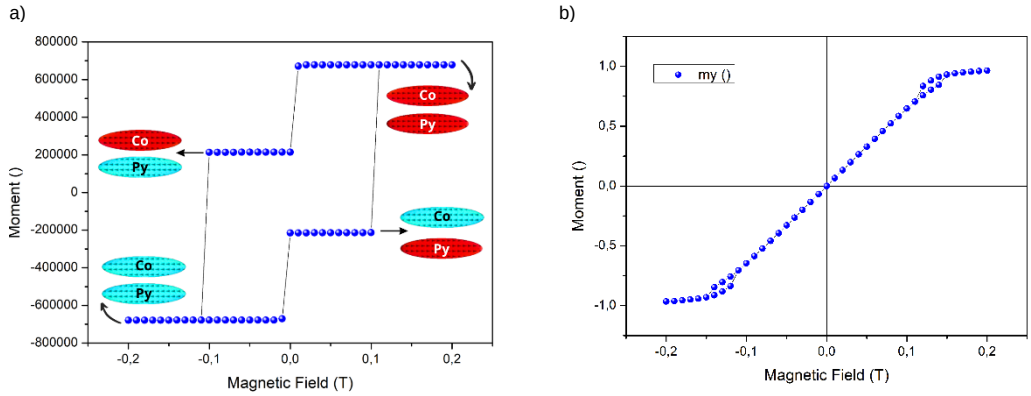

Figura 9 - Simulações de curvas MxH feitas no programa Mumax3 de nanodiscos com eixo maior de 800 nm e eixo menor de 200 nm, camada inferior de Co (11 nm), espaçamento de 5 nm e camada superior de Py (10 nm). Imagem (a) campo aplicado a 0° e imagem (b) a 90°

CONCLUSÕES:

Os nanodiscos circulares de ferro apresentaram comportamento magnético estável com configuração vórtex, comprovado tanto experimentalmente quanto por simulações, mostrando-se promissores para uso em sensores magnetorresistivos. As simulações revelaram que interações entre discos vizinho é influenciada por sua quiralidade em distâncias curtas, o que é relevante para aplicações sensoriais de alta densidade.

Já os nanodiscos elipsoidais com estrutura SAF mostraram baixa remanência e coerção, com possibilidade de ajuste fino do comportamento magnético pela espessura das camadas. Essas características são ideais para aplicações biomédicas, nas quais a estabilidade e a sensibilidade do sensor são fundamentais.

BIBLIOGRAFIA

[1] World Health Organization. Cancer: Fact sheets. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer , 2024. Acesso em: 10 jul. 2025.

[2] Ning Yang, Tao Li, Pengpeng Zhang, Xiaoyang Chen, Xuan Hu, et al. An early cancer diagnosis platform based on micro-magnetic sensor array demonstrates ultra-high sensitivity. Journal of Nanomedicine & Nanotechnology, 7:344, 2016.

[3] A. Wachowiak et al. Direct observation of internal spin structure of magnetic vortexcores. Science, 298:577–580, 2002.

[4] R. A. Duine, Kyung-Jin Lee, Stuart S. P. Parkin, and M. D. Stiles. Synthetic antiferromagnetic spintronics. Nature Physics, 14(3):217–219, 2018.

[5] Arne Vansteenkiste, Jonathan Leliaert, Mykola Dvornik, Mathias Helsen, Felipe Garcia-Sanchez, and Bartel Van Waeyenberge. The design and verification of Mumax3. AIP Advances, 4(10):107133, 2014.