

Origem da forte anisotropia magnética na liga ordenada de FePt

Pesquisador responsável: **Márcio Medeiros Soares, Coordenador da linha XRD2 do LNL**

Introdução e estado da arte

O estudo dos fenômenos magnéticos da matéria na escala nanométrica, tanto estáticos quanto dinâmicos, permitiu grandes avanços tecnológicos, notadamente nas áreas de gravação e processamento de informação e de sensores magnéticos. Como exemplo, a consolidada tecnologia de gravação magnética em discos rígidos alcança hoje densidades de informação da ordem de 500 GB/polegada². Vários desenvolvimentos tecnológicos foram necessários para alcançar tal marca, como o uso de filmes com anisotropia magnética perpendicular e cabeças de leitura extremamente sensíveis baseadas em magnetorresistência gigante. Além da gravação de informação, a ideia de usar o spin do elétron em vez de sua carga como portador de informação, que é uma consequência direta da descoberta da magnetorresistência gigante, abre diversos caminhos promissores na direção da nova área da spintrônica. Um dos grandes atrativos dos materiais magnéticos é a sua capacidade de manter seu estado sem gasto adicional de energia (como um ímã permanente mantém sua magnetização), o que abre espaço para dispositivos energeticamente eficientes e econômicos.

Filmes finos magnéticos apresentando uma forte anisotropia magnetocristalina com magnetização perpendicular (direção preferencial da magnetização normal ao plano do filme) despertam grande interesse para aplicações tanto em gravação magnética de ultra-alta densidade assim como para desenvolvimento de dispositivos spintrônicos. No caso de gravação magnética, materiais com maior anisotropia permitem fabricar menores bits de informação termicamente estáveis. Esse problema de estabilidade térmica da informação, conhecido como limite superparamagnético, é um dos obstáculos para o aumento da densidade de informação gravada em filmes magnéticos. Na spintrônica, foi mostrado que é possível manipular-se a magnetização de um material ao submetê-lo a uma corrente polarizada em spin [1]. Esse fenômeno é conhecido como transferência de torque pelo spin (ou em inglês *spin-transfer torque*). A densidade de corrente spin polarizada necessária para modificar a magnetização de um material é um fator limitante para dispositivos baseados nesse fenômeno, visto que a necessidade de uma grande densidade de corrente também significa perda de eficiência por aquecimento e eventualmente falha no dispositivo por sobre-aquecimento. Quando comparados a sistemas com anisotropia planar, sistemas com anisotropia magnética perpendicular apresentam uma menor corrente crítica para inversão da magnetização por transferência de torque pelo spin em uma junção túnel magnética [2].

A liga de FePt com ordem do tipo L1₀, em que planos atômicos de Fe e de Pt alternam-se ao longo do eixo tetragonal (eixo *c*), é um dos materiais conhecidos com a maior anisotropia magnetocristalina. Além disso, sua boa resistência a corrosão e sua moderada temperatura de Curie ($T_c \sim 750$ K) faz dessa liga ordenada um candidato ideal para gravação magnética auxiliada por aquecimento [3], a próxima geração de dispositivos de gravação magnética ultra-densa. Sua anisotropia está diretamente ligada ao parâmetro de ordem química “*S*” da liga: quanto mais

perto de uma ordem perfeita ($S=1$) maior a anisotropia, enquanto a liga desordenada quimicamente ($S=0$) não apresenta anisotropia.

De um ponto de vista fundamental a origem da anisotropia magnetocristalina em FePt e outras ligas metálicas compostas por metais de transição e metais nobres vem sendo intensamente estudada teoricamente [4,5]. Para metais de transição 3d, Bruno [6] mostrou usando teoria da perturbação, que a energia de anisotropia magnetocristalina deve ser diretamente proporcional à anisotropia do momento magnético orbital. Seguindo esse raciocínio, foi calculado para FePt que o átomo de Fe tem uma contribuição dominante para a energia de anisotropia [4] e que a anisotropia orbital do Fe seria favorecida pela hibridização com estados 5d da Pt, os quais apresentam uma grande interação spin-órbita. Contudo, essa contribuição dominante da anisotropia do momento orbital 3d para a energia de anisotropia magnetocristalina foi questionada para o caso de ligas 3d-5d [5]. De acordo com Soloyev e colaboradores [5] a energia magnetocristalina seria inteiramente relacionado com a sub-rede da Pt, enquanto o elemento 3d atuaria apenas como fonte de magnetismo, induzindo uma magnetização na Pt através da hibridização. Neste caso, a anisotropia orbital da Pt seria dominante. O confronto dessas duas visões teóricas da origem da anisotropia magnetocristalina com dados experimentais ainda está para ser feito.

A determinação experimental do momento orbital é obtida por dicroísmo circular magnético de raios-X e suas regras de soma. O único trabalho experimental que aborda a determinação da dependência angular desse momento orbital em FePt [7] foi feito por nosso grupo em amostras fabricadas para estudar o acoplamento de troca do FePt com materiais antiferromagnéticos. Ainda assim, apenas o momento orbital do Fe foi medido, uma vez que substratos de Pt foram usados. Outras determinações experimentais do momento orbital em filmes puros de FePt limitam-se a um único ângulo de incidência ou a nanopartículas aleatoriamente orientadas [8]. Um estudo sistemático da dependência angular do momento orbital da liga de FePt para ambos seus átomos constituintes irá contribuir na compreensão da origem da forte anisotropia magnetocristalina nesse material e esse projeto de iniciação científica se insere nesse contexto.

Metodologia e objetivos

Nesse projeto faremos o estudo da liga ordenada de FePt em suas diferentes etapas: crescimento por MBE, caracterização estrutural por refletividade e difração de raios X e estudo do magnetismo por dicroísmo circular magnético de raios X. As amostras serão crescidas por epitaxia de feixe molecular (MBE) em monocristais metálicos orientados, ex. Pd(001), usando técnicas de física de superfície (UHV, LEED, AES e RHEED) para controle da pureza e da qualidade das camadas crescidas. O grau de ordem da liga de FePt pode ser ajustado através da temperatura de deposição ou estratégia de empilhamento das camadas de Fe e Pt. Uma deposição alternada de camadas atômicas de Fe e de Pt com o substrato aquecido a 570 K favorece a ordem $L1_0$ com eixo c perpendicular [7], enquanto a co-deposição a temperatura ambiente favorece o crescimento de uma liga desordenada. Esse crescimento será feito nos equipamentos disponíveis na linha PGM do LNILS, que podem ser usados de forma independente à disponibilidade de feixe de raios X. Essas amostras serão caracterizadas quanto a sua estrutura (cristalinidade, grau de ordem, epitaxia e qualidade da superfície e interfaces) usando difração

e refletividade de raios X na linha XRD2 do LNLS. A otimização dos parâmetros de deposição e quantificação da ordem química será uma parte importante desse trabalho. O estudo da influência do grau de ordem na anisotropia do momento orbital do FePt será de grande valia para a compreensão da origem microscópica da anisotropia magnética nesse material e constituem sua motivação científica.

A produção de amostras policristalinas pela técnica de sputtering em substratos de Si ou MgO também fará parte desse projeto. Essas amostras servirão como referência para as medidas de difração, refletividade e dicroísmo. A técnica de sputtering tem a vantagem de ser de mais fácil acesso (equipamentos disponíveis no Laboratório de Microfabricação do LNNano) e o uso de substratos de Si ou MgO tem um custo bem menor que os monocristais metálicos orientados. Além das medidas de difração, refletividade e dicroísmo, as amostras produzidas dessa forma podem facilmente serem fracionadas para estudo do seu magnetismo por técnicas convencionais como MOKE e SQUID ou para medidas de transporte.

A motivação, o contexto científico e a metodologia desse projeto descritos acima vão muito além do que é esperado para um projeto no nível de graduação. Contudo, aqui não é proposto como objetivo que o estudante alcance, dentro do período do projeto, a uma compreensão acabada do complexo problema da anisotropia em ligas ordenadas, que é motivo de intenso debate na comunidade científica. A participação do estudante na realização desse projeto em um ambiente de efervescente atividade experimental, como é o caso do LNLS, tem como objetivos contribuir com sua formação em diversas técnicas experimentais que estão na fronteira do conhecimento, treiná-lo no desenvolvimento de instrumentação científica e formá-lo nos fundamentos do magnetismo de filmes finos. Espera-se como resultado concreto que o estudante envolvido no projeto aprenda a usar diversas técnicas de ultra-alto vácuo, de física de superfície, de crescimento de filmes finos e de caracterização estrutural e magnética usando técnicas de síncrotron, além de desenvolver instrumentações científicas específicas para adaptações necessárias aos experimentos. A formação na área de magnetismo de filmes finos será acompanhada por orientações e realização de seminários de grupo. É esperado que o estudante desenvolva boa capacidade de trabalho em equipe, fundamental para sua contribuição no projeto e para seu aprendizado.

Referências

- [1] J.C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1–L7 (1996).
- [2] S. Mangin, et al., *Nat. Mater.* **5**, 210 (2006).
- [3] M.H. Kryder, et al., *Proc. IEEE* **96**, 1810 (2008); S. Okamoto, et al., *PRB* **66**, 024413 (2002).
- [4] T. Burkert, et al., *PRB* **71**, 134411 (2005); G.H.O. Daalderop, et al., *PRB* **44**, 12054 (1991).
- [5] I.V. Solov'yev, P.H. et al., *PRB* **52**, 13419 (1995); C. Andersson, et al., *PRL* **99**, 177207 (2007).
- [6] P. Bruno, *PRB* **39**, 865 (1989).
- [7] M.M. Soares, et al. *PRB* **85**, 205417 (2012); M.M. Soares, et al., *J. Appl. Phys.* **109**, 07D725 (2011).
- [8] C.J. Sun, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 2539 (2006); C. Antoniak, et al., *Nat. Commun.* **2**, 528 (2011).